

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

F-cha	Duración	Tema	Profesor
Julio 12	17 a 18:30 h	INTRODUCCION  Importancia del agua subterránea en México. Condiciones actuales y problemática. Antecedentes históricos.	Ing. Heinz Lesser
	18:45 a 20:30 h	CONCEPTOS BASICOS Generalidades. Distribución del agua en el subsuelo. Propiedades de las rocas. Tipos de acuíferos. Recarga y Descarga de agua subterránea.	Ing. Pedro Martínez L.
Julio 14	17 a 21 h	HIDROGEOLOGIA  Clasificación e identificación de las rocas. Reconocimientos de campo. Fotointerpretación. El agua subterránea en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.	Ings. J. Antonio Trujillo y Anselmo Ordaz
Julio 16	17 a 19:30 h	METODOS DE EXPLORACION  Pozos exploratorios. Métodos de Perforación. Recolección de datos. Desarrollo y Aforo.	Ings. Heinz Lesser y Arsenio Cienfuegos
	19:30 a 21 h	REGISTROS EN POZOS	Ing. Luis Lara
Julio 19	17 a 18:30 h	METODOS DE EXPLORACION	Ing. Luis Lara
	18:30 a 21 h	Registros eléctricos en pozos. Métodos geofísicos.	Ing. Alfonso Camarena
Julio 21	17 a 18:30 h	FLUJO EN MEDIOS POROSOS	Ing. Joaquín Méndez
	18:30 a 21 h	RECOLECCION, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE LOS DATOS RELATIVOS A LOS NIVELES DEL AGUA.	M. en I. Antonio List
Julio 23	17 a 21 h	HIDRAULICA DE POZOS DISEÑO DE POZOS	Ing. Rubén Chávez Guillén

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

Fecha	Duración	Tema	Profesor
Julio 26	17 a 18:30 h	QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA	Ing. Antonio List
	18:30 a 21 h	EL AGUA SUBTERRANEA EN RELACION CON LOS FENOMENOS QUE INTEGRAN EL CICLO HIDROLOGICO	Ing. Rubén Chávez Cuillén
Julio 28	17 a 18:30 h	QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA	Ing. Antonio List
	18:30 a 21 h	CUANTIFICACION DE RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA	Ing. Jaquín Méndez
Julio 30	17 a 19 h	MODELOS DE SIMULACION DE ACUIFEROS	Ing. Pedro Martínez L.
	19:00 a 21 h	PLANEACION DE APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS	Ing. Héctor Ramírez
Julio 31	9 a 11 a'm'	MESA REDONDA CLAUSURA	

edcs.



PROFESORES DEL CURSO HIDROLOGIA SUBTERRANEA

ING. ALFONSO CAMARENA LARRIVA  
JEFE DE LA SECC DE GEOFISICA  
DIR. GRAL. DE GEOHIDROLOGIA Y DE  
ZONAS ARIDAS  
S. R. H.  
ABRHAM GONZALEZ 3-4°  
TEL.: 566.18.59

ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ  
JEFE DEL DEPTO. DE POZOS DE LA  
COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE MEXICO  
S. R. H.  
BALDERAS NO. 55-4°  
TEL.: 585.50.66 EXT. 418

ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN  
JEFE DEL DEPTO. DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA  
DIR. DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
S. R. H.  
ABRIHAM GONZALEZ 3-4° PISO  
TEL.: 546.66.36. Y 566.24.90

ING. LUIS ENRIQUE LARA TRUJILLO  
JEFE DEL DEPTO. DE TECNOLOGIA  
PETROLEOS MEXICANOS  
MA. NAL. EDIF. 810-6° PISO  
TEL.: 531.03.08

ING. HEINZ LESSER JONES  
DIRECTOR DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
S. R. H.  
REFORMA 69-19° PISO  
TEL.: 546.57.36 Y 591.08.37

M. EN I. ANTONIO LIST MENDOZA  
JEFE DE LA OFI. DE HIDROGEOQUIMICA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
ABRHAM GONZALEZ 3-4° PISO  
TEL.: 535.09.57

ING. PEDRO MARTINEZ LEYVA  
JEFE DEL DEPTO. DE INFORMACION Y  
CONTROL DE DATOS  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y ZONAS ARIDAS  
SRH  
ABRIHAM GONZALEZ 3 MEZANINE  
TEL.: 546.59.85 y 86

ING. JOAQUIN MARIO MENDEZ SALDAÑA  
SUBJEFE DEL DEPTO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA  
S. R. H.  
ABRIHAM GONZALEZ 3-4°PISO  
TEL.: 566.18.59 Y 535.09.57

ING. ANSELMO ORDAZ AYALA  
AUX. DEL DEPTO. DE GEOHIDROLOGIA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
S. R. H.  
ABRIHAM GONZALEZ 3 MEZANINE  
TEL.: 535.08.17 Y 09.76

ING. HECTOR RAMIREZ LOPEZ  
JEFE DE PROYECTO DEL PLAN NACIONAL HIDRAULICO  
S. R. H.  
RIO MIXCOAC 25-3°  
TEL.: 524.39.95

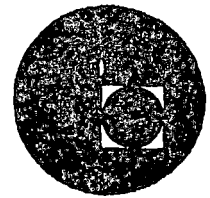
ING. JORGE ANTONIO TRUJILLO CANDELARIA  
JEFE DEL DEPTO. DE GEOHIDROLOGIA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
ABRIHAM GONZALEZ 3 MEZANINE  
TEL.: 535.08.17 Y 09.76

'cdcs.





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



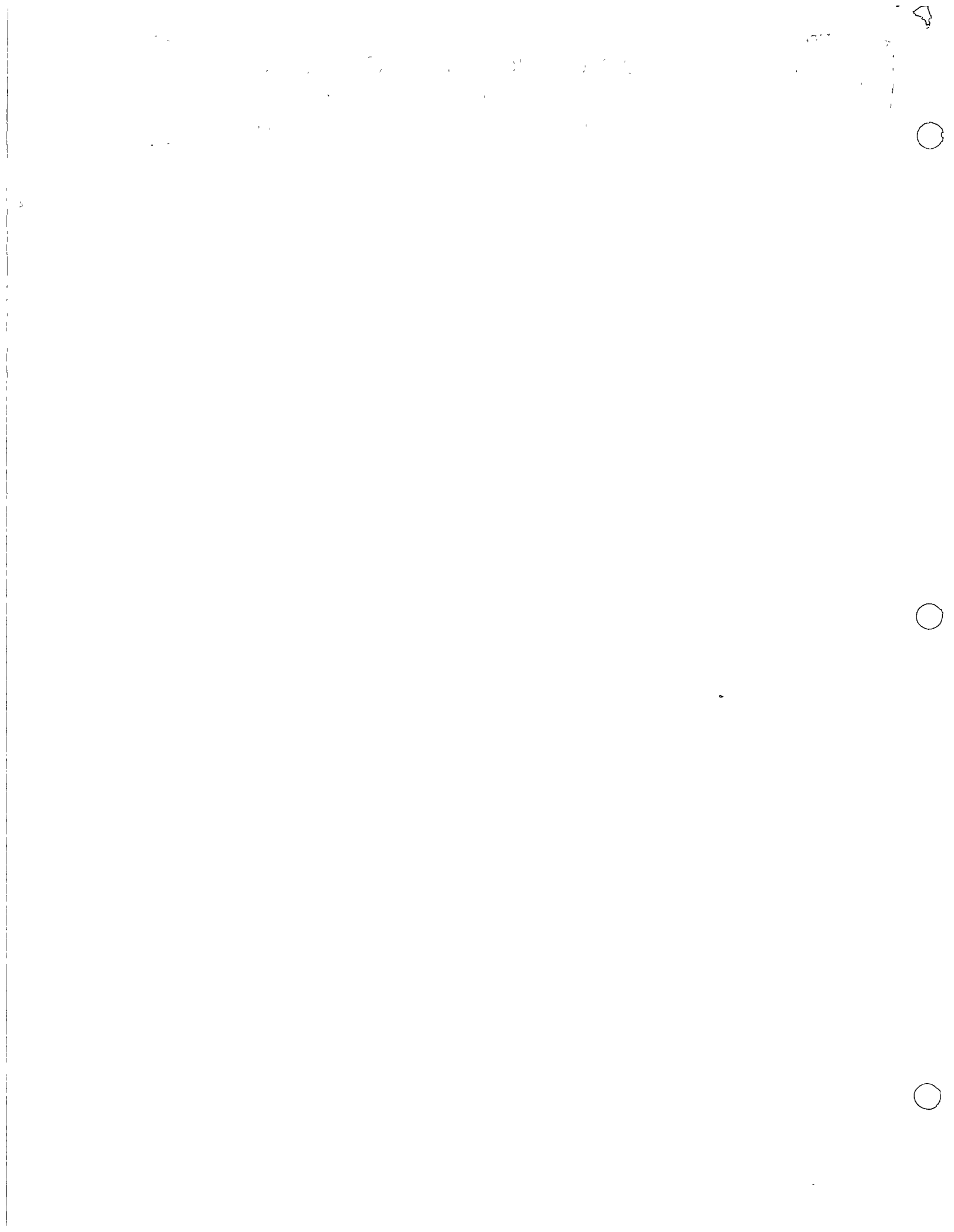
## HIDROLOGIA SUBTERRANEA



ING. J. ANTONIO TRUJILLO

ING. ANSELMO ORDAZ

JULIO DE 1976.



## PROSPECCION GEOHIDROLOGICA

Por los Ings.: J. Antonio Trujillo  
y Anselmo Ordaz.

### I.- EL CICLO HIDROLOGICO.-

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

En el ciclo hidrológico (Fig. 1) se explica como la gran evaporación producida principalmente en los océanos; forma nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde se condensan y caen en precipitaciones, parte de esta agua, escurre por los ríos y retorna al mar, otra parte, se evapora y otra se infiltra en el subsuelo formando los acuíferos subterráneos, los cuales también pueden descargar en el mar. En esta etapa del ciclo es en la que nos interesa encontrar el agua.

### 1.- DEFINICIONES.-

#### 2.1.- POROSIDAD.

Poros significa intersticio hueco. La porosidad de una roca es la relación del volumen de sus huecos con su volumen total (Fig. 2).

#### 2.2.- PERMEABILIDAD.

La palabra permeable significa penetrable, un cuerpo es permeable si se dejara 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.

Para que una roca sea permeable necesariamente debe ser porosa, sin embargo, puede ser porosa y no presentar permeabilidad: es decir, si los poros de una roca están intercomunicados habrá permeabilidad, si están aislados, la roca será impermeable.

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 depositando, o secundaria como en una roca riolítica compacta que por algún movimiento de la corteza terrestre se fractura y la adquiere.

### III.- PROSPECCION GEOTIDROLOGICA

En la prospección geohidrológica, son condiciones favorables:

- a).- La existencia de rocas permeables.
- b).- Estructuras geológicas apropiadas para servir como receptáculo para el almacenamiento del agua.
- c).- Precipitación.
- d).- Zonas de recarga, es decir, áreas por donde el agua tenga posibilidades de infiltrarse al acuífero.

En la búsqueda de estas condiciones, debemos investigar la constitución litológica, las estructuras geológicas y la hidrografía.

#### 3.1.- LITOLOGIA.

Al iniciarse el estudio de un lugar determinado, lo primero que se debe conocer es la litología, ya que cada tipo de roca tiene una permeabilidad característica; esta propiedad limita las áreas de interés, pues la búsqueda se enfocará 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 el siguiente cuadro en el que se muestran algunos de los tipos de rocas más comunes en nuestro País.

#### 3.2.- LA PERMEABILIDAD.

En el cuadro presentado, se observan tipos de rocas con características diferentes, sin embargo, son solo algunas de éstas, las que ofrecen posibilidades de permeabilidad; para constituir acuíferos importantes, gravas, arenas, basaltos y calizas.

##### Gravas y Arenas.

Las gravas son sedimentos no consolidados constituidos por fragmentos de roca arredondados por efecto del arrastre de los ríos que las transportan en grandes cantidades depositándolas en su propio cauce o en cuencas lacustres y marítimas. Sus dimensiones van de 4 a 64 mm.

La permeabilidad de estos depósitos es mayor cuando sean de forma más arredondada y 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. 2).

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

Las arenas son fragmentos arredondados de rocas y minerales cuyo tamaño queda comprendido entre 1/16 y 2 mm.

La permeabilidad de una arena será mayor, cuanto mayor sea el tamaño de sus granos y mejor su clasificación.

Para dar localizaciones sobre este tipo de rellenos aluviales deben buscarse dos cosas:

- 1°.- Que las gravas y arenas sean lo más seleccionadas posible evitando las zonas de lomas y arcillas.
- 2°.- Basándose en los afloramientos rocosos de las laderas del valle y si es necesario con métodos geofísicos o geosísmicos, debe procurarse cortar el mayor espesor posible de acarres.

En general son los acuíferos más fáciles de atacar, pues existen zonas donde aún sin conocimientos especiales de geología, se pueden dar buenas localizaciones.

Los acuíferos en sedimentos Terciarios lacustres del Altiplano Mexicano estudiado por el autor están constituidos principalmente por gravas, arenas y conglomerados y en ellos se alojan los más importantes acuíferos del país, en explotación.

Basalto.

El basalto es una roca ígnea, intrusiva básica; se presenta en forma de derrames lávicos, brechas y ...

aglomerados. 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 solidificadas, a las zonas de brechas y aglomerados de escoria y teozotite.

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. Por otra parte también hay más posibilidades de tener zonas permeables cuando hay intercalaciones de materiales lacustres y piroclásticos que cuando un cuerpo es demasiado potente y continuo.

La mayor permeabilidad en los basaltos se encuentra en forma horizontal, es decir, en los espacios huecos que quedan entre dos coladas superpuestas de lava. La permeabilidad vertical se debe, principalmente, al fracturamiento por enfriamiento y suele ser bastante menor que la horizontal, llegando a existir acuíferos confinados entre diferentes derrames lávicos.

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 localizaciones sobre este tipo de rocas, donde la permeabilidad generalmente es alta, es muy importante verificar que estén alojadas en estructuras impermeables que eviten que los materiales volcánicos se drenen, hacia los ríos y arroyos o que los niveles se vayan demandando profundos.

#### Calizas.

Las calizas son rocas formadas principalmente por carbonato de calcio, originados por procesos orgánicos y químicos en medios lacustres y marinos, los 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 atmosfera se carga de ácido carbónico, el cual ataca fuertemente a las rocas calcáreas, disolviéndolas. Al caer sobre ellas, si encuentra alguna zona, así sea poco permeable inicia su infiltración y ataque ensanchando las grietas y produciendo conductos y cavernas, lo cual incrementa grandemente su permeabilidad.

La permeabilidad horizontal a través de planos de estratificación, es más importante que la provocada a partir de fracturas verticales, estos generalmente contienen menos continuidad y frecuentemente se rellenan con arcilla del suelo que las cubre, mientras que los horizontales se mantienen más limpias.

Generalmente en las secuencias de rocas sedimentarias marinas se presentan las formaciones calcáreas por lo comunes intercaladas entre formaciones arcillosas impermeables. Estas formaciones constituidas principalmente por lutitas y areniscas tienen gran importancia en la producción acuifera, pues actúan como confinantes ya sea inferiores sosteniendo al acuífero, o superiores impidiendo frecuentemente que la formación se drene.

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

Los pliegues en las rocas sedimentarias se denominan "anticlinales" si tienen la concavidad hacia arriba y "sinclinales" si la tienen hacia abajo, por lo que es frecuente que las crestas de las sierras coincidan con los primeros y los valles con los segundos.

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

- a).- Zonas donde las calizas estén lo más puras que sea posible, o sea que su contenido de arcilla sea mínimo, pues mientras más contenga será menos permeable.
- b).- Las zonas donde se observan gran cantidad de cavernas y conductores de disolución son favorables.
- c).- Las zonas arrecifales, con restos de fósiles, frecuentemente ofrecen buena permeabilidad.
- d).- Que no haya capas de lutitas intercaladas en gran proporción.
- e).- El fracturamiento, por lo general es mayor en los lomos de los anticlinales y en los flancos de los sinclinales, por lo que son por lo general sitios buenos para la perforación de pozos, sin embargo, los lomos anticlinales hay ocasiones en que son de difícil acceso y los sinclinales frecuentemente que estén ocupados 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 interestatal la más importante, es conveniente dar las localizaciones de tal manera que contengan el mayor número de estratos posible. De esto se concluye que las calizas con echado horizontal serían más favorables que los que tengan echado vertical; sin embargo es frecuente que las calizas con echado horizontal hayan estado quietas que no están afectados por fracturas lo que disminuye sus posibilidades de permeabilidad, por lo que en caso de perforar sobre ellos es bueno verificar su estado.
- g).- Existen formaciones calcáreas que en un determinado lugar se presentan permeables y producen eficientemente y que en distancias más o menos cortas se encuentran impermeables o improducivas.



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

#### OTRAS ROCAS.-

Los demás tipos de rocas a excepción de las arcillas, 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 cortar las 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.

## RECONOCIMIENTOS GEOHIDROLOGICOS

El reconocimiento geohidrológico de un lugar, debe iniciarse con la recopilación de información, geológica, topográfica, climatológica y geohidrológica, las fuentes de información son por ejemplo; las distintas Direcciones de S.R.H., CETENAL, Instituto de Geología de la U.N.A.M., PEMEX, etc.

Cuando es posible llevar buena información al campo, las cosas se facilitan pues solo es necesario detalles para dar localizaciones para perforación de pozos o desechar el sitio. Así puede ser tan fácil por ejemplo, dar una localización en el Valle de San Juan del Río, Qro. donde las condiciones geohidrológicas son en general muy favorables y conocidas como desechar para la perforación de pozos en el área de Acapulco, Gro. donde las formaciones graníticas se presentan prácticamente impermeables.

Si no se tiene información del área, es de gran utilidad contar con fotografías aéreas escalas 1:25000 1: 50,000 de las que se puede observar y obtener lo siguiente:

Dado que el intemperismo y los agentes de erosión atacan en forma distinta a las diferentes rocas de acuerdo con

.....

sus características físicas; en la  
fácil marcar afloramientos de  
así como las estructuras que  
un plano base con la red hid  
minar sobre el que se pla  
po, seleccionando los puntos  
inútiles visitas a sitios con caracteris  
so.

Una vez efectuado el chequeo geológico  
campo y con algunos puntos de control para el traslape de las fotogra-  
fías se puede elaborar un plano confiable para utilizarlo en la prospec-  
ción geohidrológica del lugar.

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

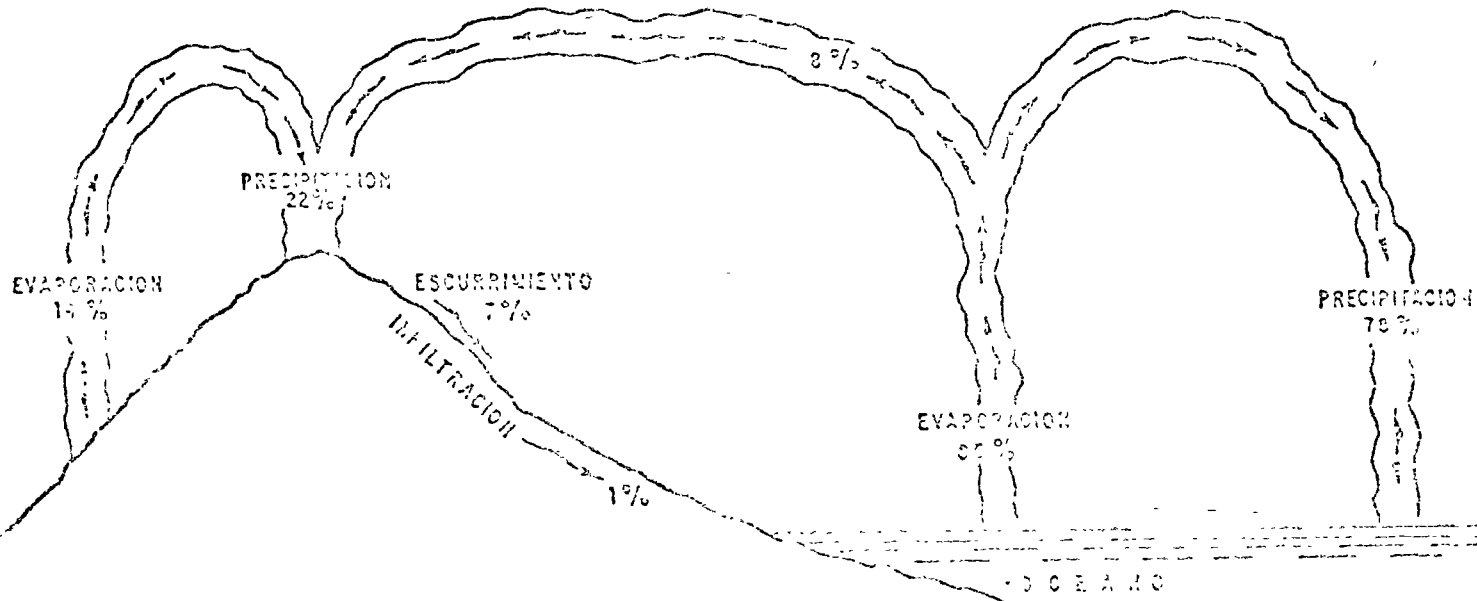
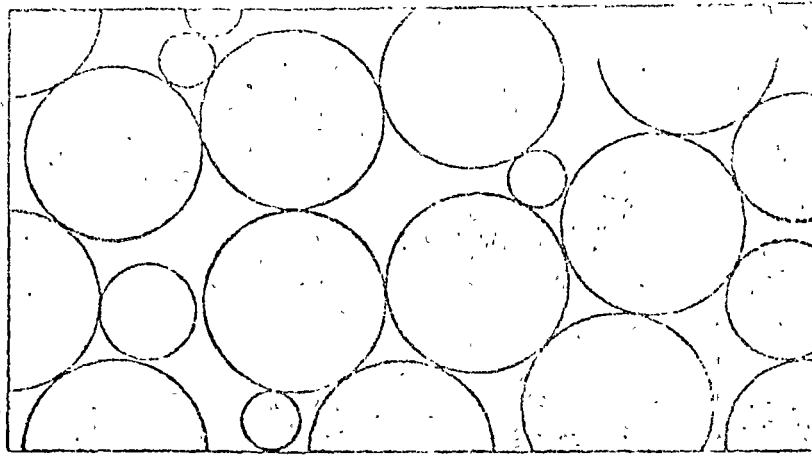
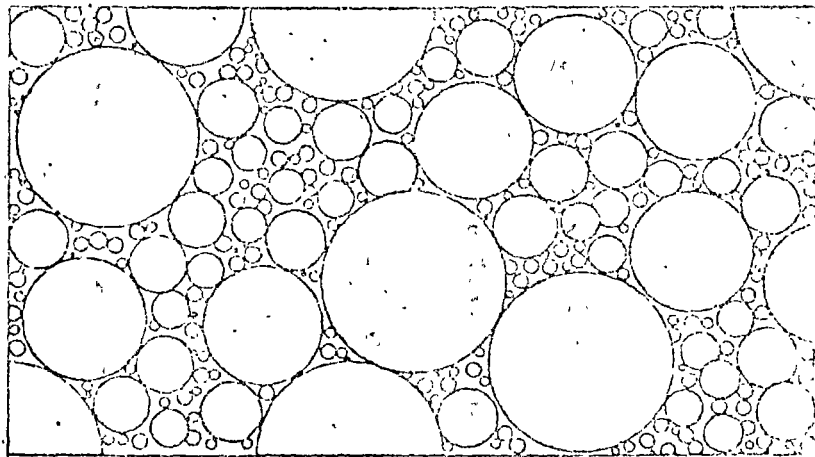


FIG. 2



20%



17%

FIG. 114 — 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.

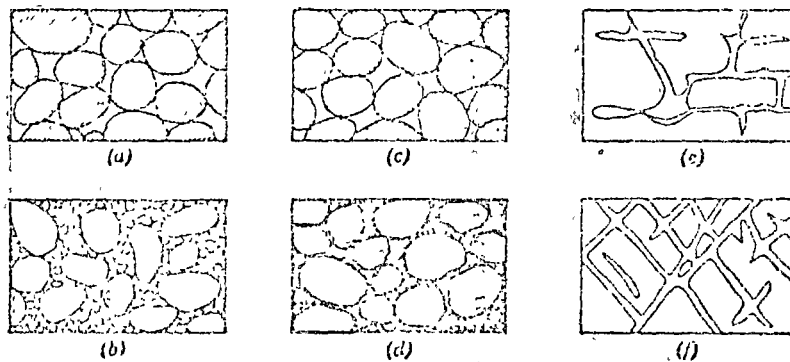


FIG. 63 — Distintos tipos de intersticios y relación entre la textura y la porosidad de las rocas. a) Depósito sedimentario de elementos del tamaño uniforme, porosidad alta. b) Depósito sedimentario constituido por elementos heterométricos, baja porosidad. c) Depósito homogéneo de cantos porosos; porosidad 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. (Meinzer, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper, 489, 1932, fig. 1, p. 3.)

IGNEAS

INTRUSIVAS  
O  
PLUTONICAS

ACIDAS  
INTERMEDIAS  
BASICAS

GRANITO  
DIORITA  
GABRO

EXTRUSIVAS  
O  
VOLCANICAS

ACIDAS  
INTERMEDIAS  
BASICAS

RIOLITA  
ANDESITA  
BASALTO

SEDIMENTARIAS

CONSOLIDADAS

CALIZAS  
ARENISCAS  
LUTITAS

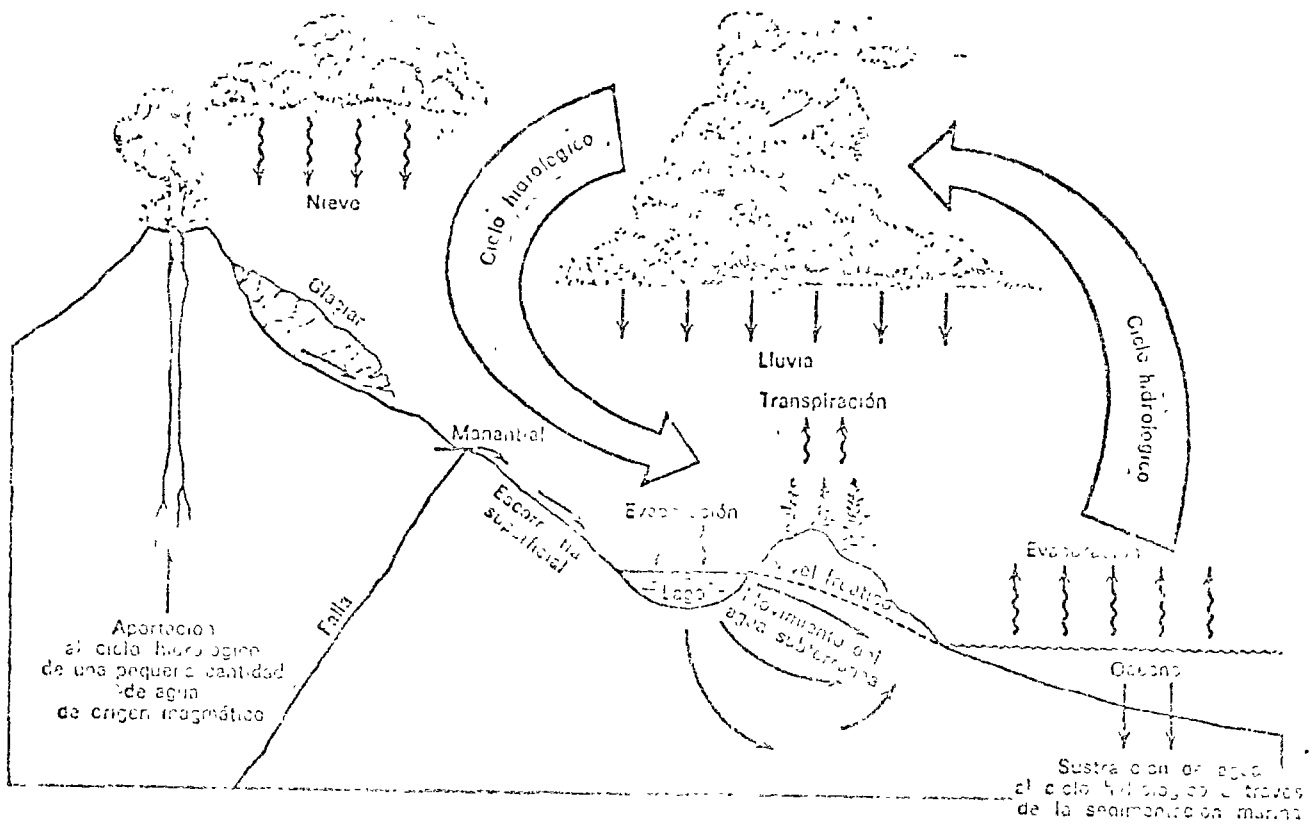
NO CONSOLIDADAS

GRAVA  
ARENA  
ARCILLA

METAMORFICAS

PIZARRA  
ESQUISTO  
GNEIS

Fig. 1.—El ciclo hidrológico.



EL CICLO HIDROLÓGICO

## LAS CUENCAS LACUSTRES Terciaria DEL ALTIPLANO MEXICANO.

Por: Ing. J. Antonio Trujillo C.

El Altiplano Mexicano, comprende una superficie aproximada de 600,000 Km<sup>2</sup> y se localiza longitudinalmente en la porción media del País, limitado por las Sierras Madre Occidental, Oriental y del Sur. Su fisiografía es relativamente plana y su elevación fluctúa entre los 1800 y 2400 metros sobre el nivel del mar.

Las rocas que predominan en la región son volcánicas de tipo riolítico, andesítico y basáltico, constituyendo las primeras, tal vez el afloramiento más grande del mundo en su tipo. También afloran sedimentos de edad terciaria y elevaciones recientes. Hacia el Este, la Sierra Madre Oriental está integrada por formaciones marinas cretácicas.

La historia geológica de esta zona es estructura se remonta al período Cretácico, en ese tiempo, lo que ahora es territorio mexicano, estaba casi totalmente ocupado por mares,



permaneciendo emergidas parte de la cordillera que ahora conocemos como Sierra Madre Occidental, constituida principalmente, por rocas ígneas extrusivas; hacia el Sur, en el área actual de los Estados de Guerrero y Oaxaca, formada por un complejo de rocas metamórficas e intrusivas, permanecía emergida la Sierra Madre del Sur.

El resto del País se encontraba sumergido en mares de diferentes profundidades en los que se depositaban sedimentos 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 localizados al Este de la Sierra Madre Occidental, se plegaran dando origen a la formación de la Sierra Madre Oriental.

Después de esto, la disposición de las tres grandes Sierras habían 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, formó extensas zonas lacustres, que existieron a principios del período Terciario, recibiendo un gran aporte de sedimentos los cuales tomaron una coloración rojiza

debido al ambiente en que se depositaron y por esta causa se los ha denominado conglomerados rojos, litológicamente están constituidos 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.

Generalmente, se presenta en capas inclinadas afectadas por fallas y fracturas, pero es difícil encontrarlas plegadas. La intercalación con tobas volcánicas es frecuente. La escasez de fósiles es notable y característica. El intenso tectonismo remanente 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 tan extensas como la de la base del Grupo Balsas, desde Cuernavaca hasta Chilpancingo, hace pensar que su depósito se efectuó en grandes cuencas lacustres.

Algunas de las localidades mejor estudiadas se encuentran en Zacatecas, Guanajuato y Taxco. Otras localidades conocidas son: Ahuichila, Coah., Apizolaya, Zac., Balsas, Gro., Cuicacuescó, Jal. y Huajuapam de León, Oax.

A principios del Mioceno, la deposición 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 salidas 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

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

La permeabilidad horizontal a través de planos de estratificación, es más importante que la provocada a partir de fracturas verticales, estos generalmente -- tienen menos continuidad y frecuentemente se rellenan con arcilla del suelo que las cubre, mientras que los horizontales se mantienen más limpias.

Generalmente en las secuencias de rocas sedimentarias marinas se presentan las formaciones calcáreas permeables intercaladas entre formaciones arcillosas impermeables. Estas formaciones constituidas principalmente por lutitas y areniscas tienen gran importancia en la producción acuifera, pues actúan como confinantes ya sea inferiores sosteniendo al acuífero, o superiores impidiendo frecuentemente que la formación se drene.

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.

Los pliegues en las rocas sedimentarias se denominan "anticlinales" si tienen la concavidad hacia arriba y "sinclinales" si la tienen hacia abajo, por lo que es frecuente que las crestas de las sierras coincidan -- con los primeros y los valles con los segundos.

mente por fragmentos de origen volcánico. Su color es gris claro : -  
beige.

El tectónismo 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 tales como la Paleontología y el estudio de las diatomeas para su determinación cronocstratigráfica.

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 solo son costras que no logan 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

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

#### OTRAS ROCAS.-

Los demás tipos de rocas a excepción de las arcillas, 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 cortar las 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.

custres, 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 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 las costas del Golfo de California, en los Estados de Sonora, Sinaloa y Baja California Norte y Sur y en el área denominada la Gran Cuenca en los Estados Unidos de Norteamérica, se presentan condiciones de depositación de edad terciaria semejantes a los observados en el Altiplano Mexicano, considerando que pueden estar relacionados.

## TERMALISMO

En el Altiplano Mexicano existen numero





definir los límites de las Cuencas Terciarias, por lo que se les ha considerado íntimamente ligados.

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 Lerch Jones, Director de Geología y de Zonas Afectadas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, autorizó y apoyó el estudio a detalle de este nuevo concepto a fin de obtener la siguiente tabulación.

1. - Extensión y continuidad de los sedimentos terciarios.
2. - Definir sus características geológicas.
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.
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 palcontológico ( polen y esporas).

- 5.- Censo de pozos piloto y manantiales que puedan ilustrar el funcionamiento regional del acuffero en sedimentos terciarios.
- 6.- Obtención de muestras de agua para análisis fisiogéomícos y su interpretación.

CONCLUSIONES

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

1º Se abrirá a la explotación acuffera algunas zonas ocupadas por rocas volcánicas impermeables, cuando se vea la posibilidad de encontrar subyacentes conglomerados permeables.

2º Se puede estudiar la posibilidad de una explotación intensiva de agua subterránea, aún en valles de 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.

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

4º 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.

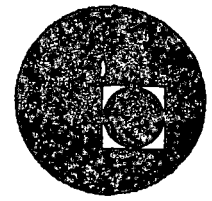
5º Se considera que los principales distritos de riego por bombeo, en el Altiplano Mexicano, están sobre sedimentos terciarios.

6º Los sedimentos terciarios son, en ocasiones tan impermeables que sirven como confinantes. Esto ocurre en la Mixteca Oaxaqueña, donde la Formación Yanhuatlán cubre a las calizas cretácicas de gran producción acuífera artesiana.

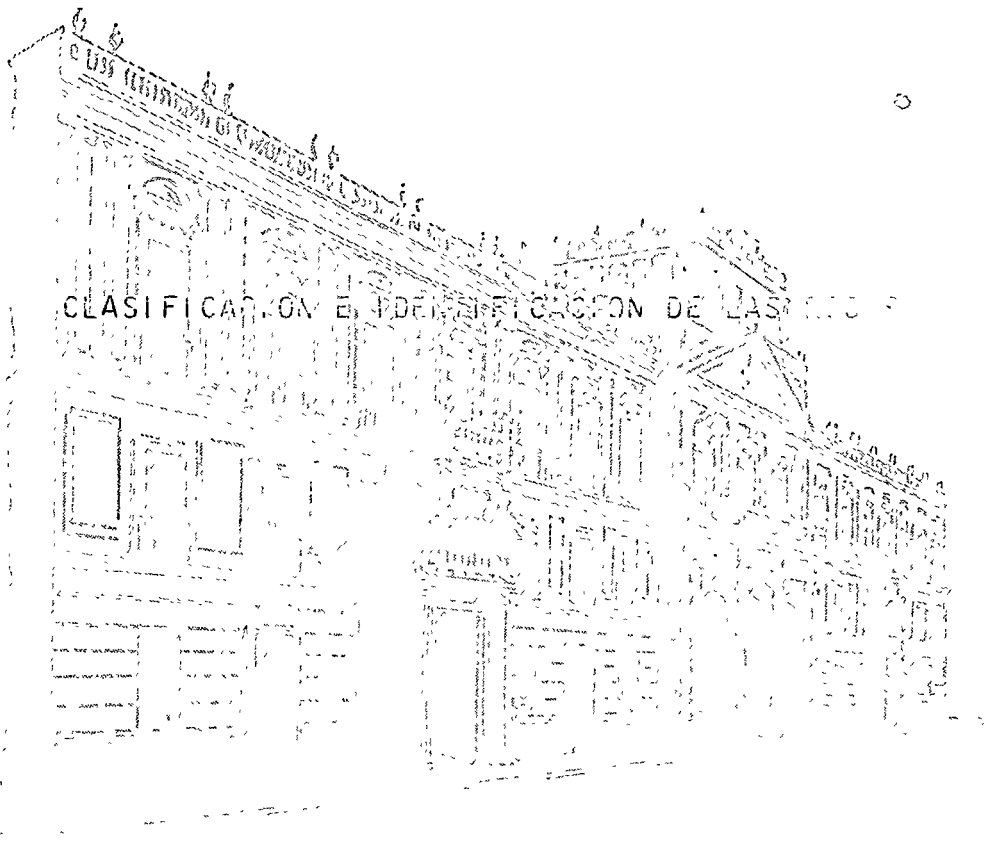




centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam

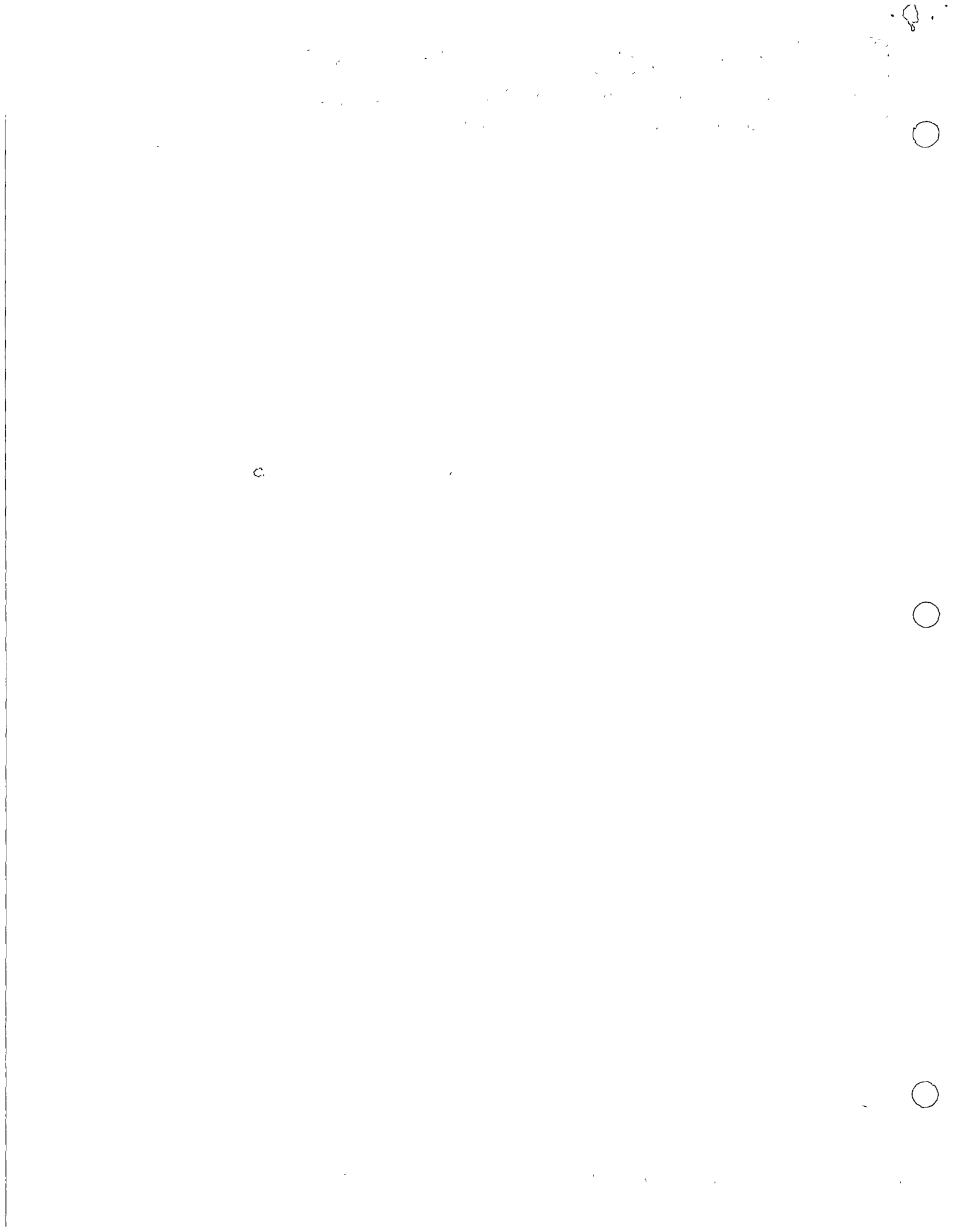


HIDROLOGIA SUBTERRANEA



ING. ANSELMO GREGAL

JULIO DE 1976.



## CLASIFICACION E IDENTIFICACION DE LAS ROCAS

Por el Ing. Anselmo Ordáz.

En esta guía se hará una descripción de las rocas observadas macroscópicamente y además se presentarán diagramas que se utilizan para la clasificación de las rocas en base a su origen, textura y composición mineralógica.

La descripción y clasificación de las rocas se iniciará con las de origen magmático, después con las sedimentarias y por último con las metamórficas.

### I. - ROCAS IGNEAS.

La determinación macroscópica de las rocas depende por completo de los elementos minerales constitutivos de las mismas y de su textura y la clasificación que aquí se utiliza está basada en el contenido de cuarzo o sílice libre y la textura de la roca. En la tabla 1 aparecen tabulados los cuatro tipos principales de rocas; a saber: las silíceas, las intermedias, las máficas y las ultramáficas y un grupo secundario: las alcalinas. La textura de la roca expresa las condiciones en las cuales tuvo lugar el enfriamiento del magma. Como ya se ha dicho, las rocas ígneas tienen dos modos de ocurrencia, ambiente de gran profundidad y somero, representando a las rocas plutónicas y a las rocas volcánicas, respectivamente.

Los minerales que se presentan en las rocas ígneas pueden clasificarse como esenciales, accesorios y secundarios. Los dos primeros son productos de la cristalización magmática y son, por tanto, también minerales primarios. Los minerales secundarios son aquellos formados por alteración siguiente o los introducidos por soluciones circulantes. Los minerales esenciales son aquellos que son necesarios para el diagnóstico y denominación de la roca, y cuya disminución o ausencia motivarían el cambio de una roca a otra. Por ejemplo: el cuarzo es esencial al granito, la sanadina a la traquita y la nefelina a la fonolita. El cuarzo se presenta en cantidad considerable en el granito, en mucho menor cantidad en la tonalita, y está casi ausente en la diorita. El feldespato alcalino domina entre los elementos minerales constitutivos de la sienita, pero puede pasar inadvertido en la diorita. A los demás minerales de una roca se les llama accesorios. Si están presentes en cantidades suficientes para justificar incluirlos en la denominación de la roca, se les llama característicos; por ejemplo: en el granito de biotita-muscovita, el basalto de olivino, la andesita de hornblenda, la diorita de hornblen-

da y el gabro de cuarzo. A los minerales que están presentes en cantidades pequeñas se les llaman accesorios menores, de los cuales son ejemplos comunes la magnetita, la apatita, la ilmenita y el zircón. Ejemplos de minerales secundarios son las zeolitas en los relictos basálticos de las volcánicas y los minerales arcillosos formados por alteración del feldespato alcalino en las rocas plutónicas. La presencia o ausencia de los accesorios menores y la de los minerales no son importantes para definir el tipo de roca.

Entre muchos de los minerales formadores de roca, el cuarzo se identifica fácilmente y puede estimarse con rapidez su cantidad relativa. Por esta razón, en la mayoría de las clasificaciones mineralógicas, el mineral cuarzo desempeña un papel importante. Cuando el porcentaje de cuarzo en volumen es de 10 por ciento, o mayor, puede observarse en un ejemplar de mano. En cambio, si la cantidad presente de cuarzo es menor de 10 por ciento, es difícil de reconocer y aún puede escapar de ser notado. En este caso, la respuesta es obvia en cuanto a cuál ha de ser la línea divisoria para el cuarzo. El porcentaje crítico es 10.

Si el porcentaje de cuarzo en volumen es menor de 10 por ciento, es una sienita más bien que granito. En algunos casos, cuando el contenido de cuarzo es menor de 10 por ciento, el cuarzo es un mineral característico, como sucede con el gabro de cuarzo y con la monzonita de cuarzo.

Los feldespatos están presentes prácticamente en todas las rocas ígneas, con excepción de las ultramáficas, y en muchas de ellas son los minerales principales o esenciales. Además la composición y el hábito de los feldespatos presentes en una roca son muy significativos para sugerir el modo de ocurrencia y la etapa de evolución magnética. Es obvio que la composición del feldespato y la relación de feldespato alcalino a plagioclasa se consideran factores importantes en casi todas las clasificaciones mineralógicas de las rocas ígneas. En esta obra, el mineral ortoclasa de la tabla I abarca a todos los feldespatos alcalinos, tales como la ortoclasa, la microclina, la perthita, la sanidina y la anortoclasa. Por conveniencia, se subdivide la plagioclasa en las variedades sódica y cálcica. El número de divisiones que deben hacerse sobre la base de la composición y la proporción del feldespato es un asunto de elección. Algunas autoridades se conforman con dos divisiones: rocas con más feldespato alcalino que la plagioclasa y rocas con menos. Pero otros prefieren tres divisiones, en las que los feldespatos alcalinos forman menos de



una tercera parte, entre una tercera y dos terceras partes, y más de dos terceras partes del feldespatos, respectivamente. Para el objeto de la determinación macroscópica fácil, se adopta el primer esquema; es decir: el de dos divisiones. Sin embargo, no se modifican en forma alguna las presentes sugerencias para la determinación de rocas aunque se adopte el esquema de tres divisiones de los feldespatos.

La trama de una roca refleja las condiciones en las cuales tuvo lugar la solidificación del magma. Las texturas características comúnmente exhibidas por las rocas volcánicas y plutónicas, ya se han descrito en las secciones anteriores; en la siguiente se encuentran algunas de las tramas esenciales para distinguir las rocas volcánicas de las plutónicas.

Guía para la identificación de las rocas.- Con la tabla determinativa (tabla 1) y el esquema de clasificación de las rocas bosquejado arriba, parece simple el método de identificación de las rocas. En la tabla, las rocas están ordenadas atendiendo a su modo de ocurrencia natural en el campo, es decir, considerando que las rocas plutónicas ocurren a profundidad, mientras que las volcánicas se forman a poca profundidad o sobre la superficie de la tierra. Por esta razón debe leerse la tabla de abajo -- arriba. También la tabla determinativa está dividida -- toscamente por la línea divisoria del cuarzo. Esta disposición permite al estudiante hacer su primera elección sobre la roca bajo investigación. Ahora bien, la primera cosa que hay que hacer al tratar de identificar una roca es identificar el cuarzo y su cantidad relativa. -- Todas las rocas silíceas con 10 por ciento, o más, de -- cuarzo se encuentran al lado izquierdo de la línea divisoria del cuarzo. Todas las demás, con menos de 10 por ciento o nada de cuarzo, se encuentran del lado derecho -- de la línea divisoria del cuarzo. El cuarzo se reconoce por su lustre grasoso y vítreo, por su color blanco a -- gris ahumado, dureza de 7 y su carencia ordinaria de forma de cristal, ya que es el último mineral que cristaliza a partir de un magma fundido y por ser obligado a llenar las cavidades interespaciales que quedan entre los -- minerales ya formados. Tomo muy poco tiempo determinar si la roca en cuestión debe situarse en el lado izquierdo o en el derecho de la línea divisoria del cuarzo.

Si óngase ahora que la roca contiene más de 10 por ciento de cuarzo: la roca se encuentra en el lado izquierdo de la línea divisoria. Ahora que se ha hecho la decisión respecto al lugar en que se encuentra la roca, se ha eliminado casi la mitad de la tabla. El segundo paso es estudiar la textura de la roca. Si la textura de la roca es granular, se encuentra en las rocas inferiores de la tabla, pero -- del lado izquierdo de la línea divisoria. Si la cantidad de cuarzo es aproximadamente 10 por ciento, la roca puede ser una cualquiera de las cuatro excepto el granito; el factor decisivo está en la relación de ortoclasa a plagioclasa, como se indica claramente en la tabla. Si hay más plagioclasa que ortoclasa, la roca es granodiorita. En la tonalita o diorita de cuarzo, la plagioclasa sobrepasa con mucho a la ortoclasa. Si la cantidad de cuarzo fuera considerable, por ejemplo, de 20 hasta 40 por ciento, no cabría duda de que la roca es granito, cualquiera -- que fuere el color y la relación de la ortoclasa a la plagioclasa. Para asegurarse respecto a la identificación del feldespato, se recuerda al lector la mineralogía y los métodos de determinación del mismo. -- Pero una breve descripción dada aquí será de alguna -- ayuda. En las rocas ígneas, los feldespatos tienden a formar cristales de forma más o menos perfecta, e -- invariablemente presentan una dureza cercana a la del cuarzo, por ejemplo  $H = 6$ , y cruceros bien desarrollados. La distinción entre la ortoclasa y la plagioclasa se logra mejor observando, con ayuda de una lente y a la luz brillante, la presencia de líneas paralelas diminutas (estriaciones de maclación) sobre ciertas caras de crucero en la plagioclasa, o su ausencia en la ortoclasa. Además, la ortoclasa es de color -- carne o rojiza, y la plagioclasa en numerosas ocasiones es gris.

Si la textura es porfirítica con abundancia de fenocristales, por ejemplo, 50 por ciento, o más, en una pasta granular, la roca es un pórfido. Si la cantidad de fenocristales fuera mucho menos impresionante, se usa el término porfirítico como atributo calificativo, como, por ejemplo, granito porfirítico, monzonita de cuarzo porfirítica, y así sucesivamente. De terminando los feldespatos puede identificarse uno -- de los pórfidos.

La presencia de vidrio no sólo asegura el origen ígneo de la roca, sino que también indica su carácter volcánico. Así, si la textura es de vítrea a afanítica (de grano fino) o pórvido-afanítica, la roca es volcánica. En general, las rocas volcánicas están mal cristalizadas; se deben estudiar e identificar todos los fenocristales disponibles críticamente para obtener alguna idea de la roca en cuestión. El número de fenocristales puede ser grande, o bien apenas unos cuantos, pero aunque así sea, la identificación de los fenocristales es de gran ayuda en la determinación de las rocas volcánicas. El nombre de roca pórvido cuarzoso es una expresión general; es de valor cuando sólo están presentes fenocristales de cuarzo o cuando los fenocristales de feldespato asociados son indeterminables. Al identificar las rocas volcánicas es mejor dar al ejemplar un nombre correcto más o menos generalizado que uno más específico que pueda ser erróneo. Se puede nombrar a la roca por su color más bien que suponer la presencia de minerales. El término general felsita es de valor para referirse a todas las rocas volcánicas de color claro. Entre los vidrios volcánicos, la obsidiana es el más común, variando su composición desde la granítica hasta la tonalítica. Su color oscuro y lustroso y su fractura fácilmente concoidea son características de diagnóstico. La hematita pulverizada dispersada puede dar a la obsidiana un color rojo o café profundos. Las piedras pez son riolíticas vítreas con lustre semejante al de la pez más bien que un lustre vítreo. La perlita es un vidrio desvitrificado con grietas concéntricas o perlíticas y lustre aperlado.

Ahora vuélvase al lado derecho de la línea divisoria del cuarzo de la tabla, en el cual ninguna de las rocas contienen cuarzo. Del estudio de la textura de la roca se puede hacer la elección. Una vez decidido cuál, se proseguirá con la investigación de los minerales esenciales.

Si la roca es granular y está compuesta de feldespatos, dicha roca es intermedia o máfica y se encuentra en la parte inferior de la tabla, pero a la derecha de la línea divisoria. La roca puede ser sienita, monzonita, diorita, gabro, dependiendo del feldespato predominante. Verifíquese con la tabla para decidir cuál. Si la roca está compuesta enteramente por minerales máfi-

cos, la roca es ultramáfica; la determinación de los minerales máficos prominentes debe permitir decidir de cuál de las cinco rocas ultramáficas se trata. Debe mencionarse que algunas son un tanto brecciosas y de grano fino, asemejándose a las rocas volcánicas. Esto se debe a que ciertas peridotitas son productos de explosión violenta y que sus minerales principales son susceptibles de serpentización.

La diabasa que se caracteriza por la textura diabásica es intermedia respecto a su ocurrencia en el campo, entre los derrames basálticos y el gabbro plutónico.

Por último, si la textura y los minerales presentes sugieren definitivamente una roca volcánica, dicha roca se encuentra en las rocas superiores de la tabla, pero a la derecha de la línea divisoria. Aquí la roca es vítrea y de grano fino; los minerales de alta temperatura hacen su aparición. Con frecuencia son indistinguibles el basalto y la andesita. La diferencia principal radica en la composición de la plagioclasa, conteniendo la andesita la variedad más sódica. La presencia de hornblenda y biotita indica por lo general andesita, puesto que estos minerales se asocian más comúnmente con la plagioclasa sódica. También, el color de la andesita es claro, mientras que el del basalto es oscuro. Todas las rocas volcánicas pueden ser porfiríticas, como la dacita porfirítica o pórfido dacítico, o la riolita porfirítica o pórfido riolítico, dependiendo de las cantidades de feldespatos cristales.

Cuando se ha reconocido una roca, el mineral característico prominente debe incluirse en el nombre de la misma, tal como granito muscovita, diorita de hornblenda, andesita de hornblenda, basalto de olivino y basalto de leucita. Con esto, la determinación macroscópica de la roca es completa.

Por lo anterior, es claro que el cuarzo y los feldespatos juntos con las texturas de las rocas, son dos factores que ayudan a situar la roca bajo investigación en alguno de los compartimientos de la tabla. El procedimiento completo toma muy poco tiempo. Debe ponerse énfasis en que cada paso hay que tomarlo con actitud crítica. Por razones de práctica, el alumno debe estudiar primero las rocas volcánicas de grano fino. En la tabla solo se han incluido las rocas más comunes, pero durante el aprendizaje de los principios básicos de identificación de las rocas el estudiante puede aplicar un término apropiado a las demás.

CLASIFICACION DE LAS ROCAS IGNEAS  
 TABLA-(I)-3)

CARACTERISTICA TEXTURA		TOBA		TOBA DE LAPILLI		BRECHA VOLCANICA		AGLOMERADO		
ACUMULACIONES — POR CAPAS O FI- NTAS CON CO- NTE SUPERFICIALES Y ALGUNS EXPUL- SIONES	PIROCLASTICA	VIDRIO RICO EN SILICE— OBSIDIANA, PERLITA, RETINITA, PIEDRA POHEZ Y PIECÁ PEZ				VIDRIO POBRE EN SILICE TAQUILITA Y PALAGONITA.				
CORRIENTES DE PROFUNDIDAD O DI- CUES DE Poca — PROFUNDIDAD.	AFANITICA Y PORFIDICA	RIOLITA	CUARZOLATITA	DACITA	TRAQUITA	LATITA	ANDESITA	BASALTO		
DIGUES O CUERPO DE PERFILADO CONTRA	PORFIDICA Y FANITICA	APLITAS O PEGMATITAS			LAMPPOFIDOS			DIABASA O DOPLEPITA		
DIGUES PROFUNDOS O INTRUSIVOS — GRANDES	FANITICA O GRANULAR	GRANITO	GRANODIORITA	TONALITA	SLENITA	MONZONITA	DIORITA	GABRO	DUNITA HARRBURGITA WHERLITA PIROXENITA MOPBLENDITA.	
MINERALOGIA PRINCIPAL		CUARZO ORTOCLASA ALBITA BIOTITA MOPBLENDITA	CUARZO ORTOCLASA ALBITA BIOTITA MOPBLENDITA	CUARZO OLIGOCCLASA MOPBLENDITA BIOTITA	ORTOCLASA MOPBLENDITA BIOTITA	OLIGOCCLASA YANDESINA MOPBLENDITA BIOTITA	ANDESINA MOPBLENDITA ALBITA	LABRADORITA BYTOWNITA ALBITA OLIVINO	OLIVINO ALBITA MOPBLENDITA	
		ROCAS ACIDAS O FELSICAS			ROCAS INTERMEDIAS		ROCAS BASICAS		ROCAS ULTR	

## II.- ROCAS SEDIMENTARIAS.

### II.1.- Clasificación.

Cualquier consideración de las rocas sedimentarias abarca su clasificación. Como sucede con la mayoría de las rocas, tal tarea es delicada a causa de la gradación que se observa de una forma de sedimentos a otra y de la mezcla de materiales de distinta composición, origen y depositación por agentes diferentes. Sin embargo, es imprescindible tener alguna clasificación, aunque no sea por otra razón que la de la propia conveniencia.

Las propiedades de las rocas sedimentarias proporcionan una base para su clasificación atendiendo a las semejanzas en su forma de origen, su trama, su composición y otras características. Hace muchos años A. W. Grabau dividió a las rocas en dos amplios tipos, las endogenéticas y las exogenéticas, cristalizando las primeras a partir de una disolución y formándose las segundas a partir de los productos del intemperismo y la erosión.

Por razones de simplicidad, se han distinguido dos amplias clases de rocas sedimentarias. Ellas son las clásticas y las no clásticas. Las primeras son acumulaciones mecánicas de fragmentos de mineral y roca, mientras que las segundas son las depositadas por medios químicos o bioquímicos. La tabla II-2, presenta una clasificación de las rocas sedimentarias basada en las dos amplias formas de origen: a saber; la mecánica y la bioquímica, entrelazada con otras características de composición y textura, proporcionando así un sistema de clasificación que abarca los rasgos notables descriptivos y los aspectos genéticos extensos.

### II.2.- El Tetraedro Fundamental.

La mayoría de las rocas sedimentarias son mezclas de componentes clásticos y no clásticos. Por ejemplo, la mayoría de las areniscas contienen arcilla y material calcáreo muy clastos; la mayoría de las calizas y dolomitas contienen fracciones arcillosas o arenosas, y la mayoría de las pizarras contienen carbonato, arena y elementos de limo. Esto puede expresarse usando un adjetivo calificativo como arena arcillosa o calcárea, caliza arenácea o arcillosa, y así sucesivamente. Los dos géneros principales de componentes, los clásticos y los no clásticos comprenden a los miembros extremos clásticos (detríticos) y no clásticos (químicos) descritos en una sección anterior.

Es conveniente recordar que las bien marcadas especies de las clasificaciones hechas por el hombre sólo raras veces son adoptadas por las rocas representativas naturales. En las rocas sedimentarias, así como en las rocas ígneas y metamórficas, son comunes las gradaciones, y muchas rocas están comprendidas entre dos o más miembros extremos. Las rocas con cuatro componentes pueden representarse por medio de un tetraedro, en el que cada una de las cuatro caras triangulares representa mezclas de tres componentes. Las mezclas más simples de dos componentes se representan por las aristas del tetraedro, y los sedimentos casi puros se representan por los cuatro vértices.

En la figura 2-1, al centro, se representa el tetraedro fundamental de Pettijohn mostrando los principales elementos constitutivos clásticos y no clásticos de los sedimentos. Los cuatro componentes más comunes, cuarzo, arcilla, carbonato y pizarra, ocupan los cuatro vértices del tetraedro, representando a la arenisca, la pizarra (shale), la caliza y los sedimentos silíceos formados químicamente. Cualquier sedimento que contiene más de 5 por ciento de estos cuatro miembros extremos se representa por un punto interior al tetraedro. Entre los sedimentos de los miembros extremos están las rocas de composición intermedia. Por ejemplo, la caliza arenácea y la arenisca calcárea se encuentran entre los vértices del carbonato y el cuarzo (fig. 3), y la pizarra arenácea y la arenisca arcillosa se encuentran entre los vértices de la arcilla y el cuarzo (inferior derecha). Las mezclas de estos miembros extremos son sistemas de dos componentes situados a lo largo de las aristas de los diagramas triangulares.

Los estimativos visuales de la composición de un sedimento se expresan en función del porcentaje de los diversos miembros extremos minerales presentes. Una arenisca calcárea, pizarrosa, puede tener 70 por ciento de granos de cuarzo, 20 por ciento de carbonatos y 10 por ciento de minerales arcillosos. Estos porcentajes son transportados gráficamente a lo largo de los ejes del tetraedro que bisecta el ángulo del vértice correspondiente, y se obtiene así un punto del diagrama. Ese punto representa la composición en función de los tres componentes.

En el tetraedro fundamental puede suceder que uno de sus miembros extremos se cambie por otro componente de

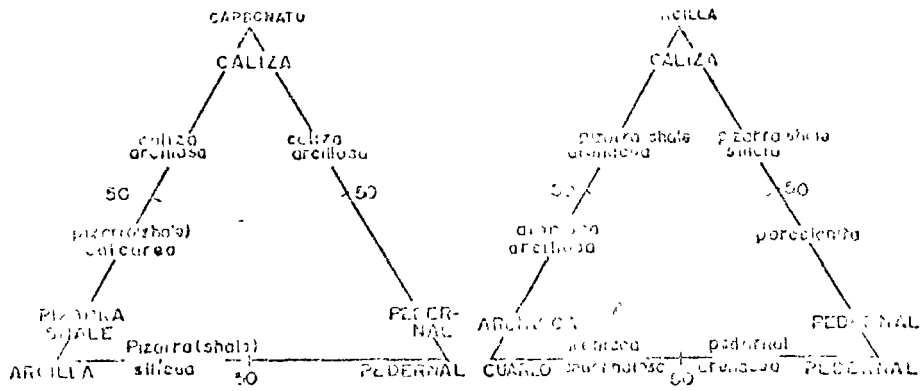
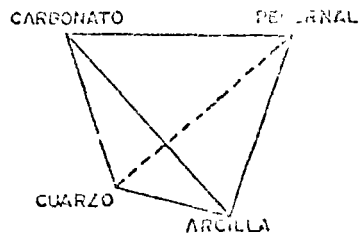
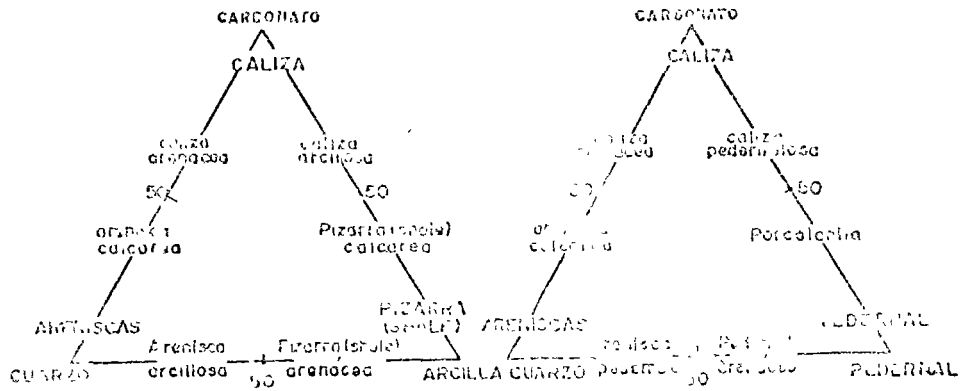


FIG. 2-1



modo de formar tetraedros adicionales. Por ejemplo, el tetraedro de la figura 2 puede tener su miembro calizo o pedregal cambiado por materia orgánica o por sulfato. Así se desarrollan dos tetraedros para indicar los sistemas carbonato-cuarzo-arcilla-materia orgánica y carbonato-cuarzo-arcilla-sulfato, respectivamente. El tetraedro, y sus caras triangulares derivadas pueden usarse para demostrar todas las mezclas posibles de composición entre las rocas sedimentarias. Además, los cuatro miembros extremos del tetraedro fundamental representan no solamente cuatro elementos constitutivos principales, sino también las peculiaridades de textura de los sedimentos. Por tanto, las rocas sedimentarias pueden estudiarse por la selección apropiada de los elementos de composición y textura de sus miembros extremos.

### II.3.- Guía para la determinación macroscópica de las rocas sedimentarias.

La mayoría de las rocas sedimentarias se componen de fragmentos variados de forma redondeada o angulosa conocidos como clastos más o menos cementados entre sí, y el nombre de la roca es determinado más por el tamaño y la forma de los clastos que por su composición. Estas son las rocas sedimentarias clásticas. Por otra parte, los nombres de las rocas sedimentarias densas, no clásticas y de textura cristalina, son determinados por su composición química o mineralógica.

Además de los minerales resistentes, como el cuarzo, el feldespato, la mica y otros, que se encuentran en las rocas ígneas o metamórficas, debe familiarizarse uno con la calcita, la dolomita, el ópalo, la calcedonia, la limonita, el yeso arcilloso, la anhidrita, la halita y quizá otros. Todos éstos son fáciles de identificar por simples pruebas de dureza, cruzero, fractura, reacción con los ácidos y olor.

Las rocas sedimentarias, siendo por lo general mezclas en todas proporciones, son de carácter gradual y debe dárseles un adjetivo; por ello, frecuentemente se hace referencia a areniscas calcáreas, calizas arcillosas, pizarras arenáceas, etc. Otras variedades útiles de composición, como pedregalosa, carbonácea, bituminosa, dolomítica, feldespática, ferruginosa, yesífera, micácea, fosfática y tobácea se aplica con facilidad a la mayoría de los nombres de las rocas sedimentarias. Además

se aplican los términos modificadores estructurales como masiva, laminada, vávica, estratificada en banco grueso, estratificada en manto delgado, de estratificación cruzada, fosilífera, concrecionada, oolítica y pisolítica.

La tabla 3 ha sido preparada de modo de hacer sencilla la determinación macroscópica de las rocas sedimentarias, a la vez que satisfactoria. En dicha tabla aparecen tabuladas las rocas caracterizadas por las texturas clástica y no clástica respectivamente.

La naturaleza de las texturas clástica y no clástica de las rocas sedimentarias ha sido completamente descrita. Aquí el término clástico se aplica a la trama de cualquier agregado cuyo carácter fragmentario original sea claramente reconocible y cuya porosidad intergranular sea visible. Una textura no clástica típica consta de cristales entrelazados tan moldeados entre sí que tienen la apariencia de un mosaico; a esta textura se le denomina comúnmente granular cristalina.

Con la tabla 3 y el reconocimiento de las texturas clásticas y no clásticas, aparece sencillo el método de identificación de muchas rocas sedimentarias comunes.

Las rocas sedimentarias con textura clástica se encuentran en la parte superior de la tabla. Si las partículas de una roca tienen más de 2 mm de diámetro, la roca es de grano grueso. Puede tratarse de un conglomerado, una brecha, un anglomerado o una tillita. Los rasgos de diagnóstico que se encuentran a la derecha de la tabla deben permitirle a uno identificar la roca de grano grueso en cuestión. Debe mencionarse que el conglomerado puede confinarse solamente en el campo con el fin de determinar si las partículas de grano grueso petrificadas son de un abanico aluvial o de depósito de pie de monte; lo mismo debe hacerse también con la tillita glacial, en la cual las partículas de roca son característicamente estiradas. A un agregado compuesto principalmente de granos del tamaño de la arena, 1/6 a 2 mm, se le llama arenisca cuando está petrificada. Las cinco clases de arenisca anotadas en la tabla pueden ser determinadas por la composición, la madurez y la pureza; o bien examinando el grado de clasificación y redondeo de las partículas. Si las partículas son más finas que la arena, pero más gruesas que la arcilla, 1/256 a 1/16 mm, la roca es un sedimento de grano fino. La determinación de los sedimentos de grano fino depende principalmente de las caracte-

terísticas de textura más bien que de la composición mineral, porque los minerales presentes son todos de grano demasiado fino para permitir la identificación macroscópica. Entre las rocas de grano fino, la pizarra (shale) se caracteriza por su propiedad física única, a saber, la hendibilidad o fisilidad. La limolita o piedra de tango es la de grano más grueso entre las rocas de grano fino, y es enteramente carente de hendibilidad. La argilita y el esquisto arcilloso (de lodo o barro) están esencialmente constituidos por minerales arcillosos, son densos de apariencia más o menos uniforme. Mientras que la argilita mojada es claramente plástica, la piedra de lodo no lo es, debido a la presencia de elementos barro-  
sos.

Por otra parte, las rocas no clásticas son de textura claramente granular cristalina. Ellas están agrupadas en la parte inferior de la tabla. La mayoría de las rocas sedimentarias no clásticas o depositadas bioquímicamente son esencialmente monominerálicas. Entre las rocas no clásticas, las de carbonatos son, con ventaja, las más abundantes. La caliza está compuesta de calcita y debe reaccionar vigorosamente con el HCl diluido frío; si la reacción es débil, la caliza es dolomítica; si no tiene lugar ninguna reacción cuando se aplica el HCl diluido, la roca de carbonato es probablemente dolomita. La creta es una roca calcárea, pero su coherencia es tal que la roca es desmenuzable (friable). El pedernal o silex (chert) está compuesto predominantemente por cuarzo criptocristalino y calcedonia de grano fino; se distingue por su dureza superior ( $H = 7$ ) y su fractura concoidea. Las evaporitas comunes, como la roca yesífera, la roca anhidrita y la sal de roca (sal gema), pueden identificarse por su elemento mineral principal. Los diferentes carbones se reconocen por propiedades físicas de diagnóstico tales como el lustre, el color, la fractura, la dureza y la presencia o ausencia de fósiles de plantas; las observaciones dadas en la tabla pueden ser de valor en la identificación del carbón mineral.

Naturalmente muchas rocas sedimentarias, como la diatomita, la fosforita, etc., no están incluidas en la tabla; pero por el aprendizaje del procedimiento apropiado para la identificación de las rocas puede asignárseles un nombre provisional. Aunque la tabla y el procedimiento establecidos arriba simplifican la identificación de las rocas, es importante el conocimiento de la petrogénesis sedimentaria para la comprensión y la determinación de las rocas sedimentarias.

## CLASIFICACION DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

Las rocas clásticas, como es sabido, están constituidas por fragmentos de rocas o minerales de diferente forma y tamaño, considerando que, si los fragmentos son mayores de 2 mm y son redondeados, se denominan cantos rodados, guijarros, guijas y gránulos. En cambio si son angulosos, éstos reciben el nombre de bloques y gravas. Por lo que toca a los fragmentos cuyo tamaño varía entre 2 y 0.0625 mm., son denominados arenas y, si son más pequeños, se conocen como limos y arcillas.

Si los procesos de litificación (transformación del sedimento a roca) actúan sobre los cantos rodados y gravas, la roca se denomina conglomerado; si actúan sobre las arenas, la roca será una arenisca (grauvaca, subgrauvaca, arcosa, subarcosa, protoarenisca u ortocuarcita) y por último los limos y arcillas, se convertirán en limolitas y lutitas, respectivamente.

Las rocas no clásticas, son todas aquellas que han sido formadas por la precipitación de minerales a partir de una solución en un medio lacustre o marino, o por la acción de los organismos: de esta forma, los sedimentos carboníferos, conducen a las calizas y a las dolomitas, los sulfúricos, al yeso, al hidrato y barita; los silíceos, al pedernal, jaspe, diatomea y radiolarita; los fosfóricos, a la caliza fosfática y fosforita, y los haluros, a la sal gema (halita), silvita y carnalita.

T A B L A No. 2

TABLE PARA LA DETERMINACION MACROSCOPICA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS CLASTICAS Y NO CLASTICAS.

C L A S T I C A S	TAMANO DE LA PARTICULA	COMPONENTES: PARTICULAS DE ROCA Y MINERALES	R A S G O DIAGNOSTICO.	OBSERVACIONES DE CAMPO	ROCA SEDIMENTARIA	
	C L A S T I C A S	RUDITAS 2mm.	UNO O VARIOS FRAGMENTOS DE ROCA MINERALES MESCLOSADOS.	PREDOMINAN PARTICULAS REDONDEADAS O SUBREDONDEADAS FRAGMENTO DE PIE DE MONTE O DE FOCO TRANSPORTE PRINCIPALMENTE FRAGMENTALES FRAGMENTOS DE ROCA ETRADA Y MAL CLASIFICADA	DE TAMANO Y GRADO DE ESTRATIFICACION VARIABLE	CONGLOMERADO FANGLOMERADO BRECHA TILLITA
C L A S T I C A S		PSEFITAS ENTRE	25% DE CUARZO 15% DE ARCILLA	FORMADA POR CORRIENTES DE TURBIDES	DE COLOR OSCURO O CRIS VERDOSA Y GRAN DUREZA	GRAVVACA
		75% DE CUARZO 25% DE FELDES	FORMADA POR CORRIENTES FLUVIALES	DE COLOR ROSA O GRIS PALIDO, ESTRATIFICACION ENTRECruzADA	ARCOSA	
		75% DE CUARZO 25% FRAG ROCA	FORMADA POR LAS CORRIENTES DE BAJA DEL TIPO DE LAS CULAS	DE COLOR GRIS Y DE ESTRATIFICACION GRADUADA	SUBGRAVVACA	
		75% DE CUARZO 25% FELDES	FORMADA POR CORRIENTES FLUVIALES	DE COLOR GRIS PALIDO A ROZADO, ESTRATIFICACION ENTRECruzADA	SUBARCOSA	
		75% DE CUARZO 25% FRAG ROCA	FORMADA POR LAS CORRIENTES DE BAJA DEL TIPO DE LAS CULAS	DE COLOR GRIS CLARO Y ESTRATIFICACION VARIABLE	PROTOCUARCITA	
C L A S T I C A S	PELUTAS	PRINCIPALMENTE MINERALES ARCILLOSOS O FRAGMENTOS MUY FINOS	AL MOJARSE SE HACE PLASTICA.	ROCA DURA DE CUALQUIER COLOR Y ASPECTO MASIVO	ARCILLITA	
				IGUAL QUE LA ARCILLA PERO DE GRANO MAS GRUESO	LIMOLITA	
				ROCA DURA CON CLARA FISILIDAD.	LUTITA	
				ROCA LUTITA CON METAMORFISMO INCIPIENTE	ARCILITA	
N O C L A S T I C A S	EN CRISTALES FINOS O EN FORMA DE UN MOSAICO.	PRINCIPALMENTE CALCITA EN INTRACLASTOS OCLITAS, FOSILES, ETC.	REACCIONAN FACILMENTE CON EL HCl FRIO	EN ESTRATOS O EN FORMA MASIVA.	CALIZA	
		PRINCIPALMENTE DOLOMITA.	NO REACCIONAN FACILMENTE CON EL HCl FRIO.	POR REEMPLAZAMIENTO EN LA CALIZA PRINCIPALMENTE	DOLOMITA	
		CALCITA	BLANCO A GRIS CLARO MUY DESMENUZABLE	DE GRANO FINO	CRETA	
		CALCITA Y MINERALES ARCILLOSOS	GRIS CLARO DESMENUZABLE	DE ESTRATOS DELGADOS Y DE GRAN DUREZA	MARGA	
		SILICE EN OVALO, CALCEDONIA, ETC	ABIGARRADO, DURA LUSTRE Mate Y FRACTURA CONCOIDEA	EN LENTES O NODULOS	PEDERNA	
		YESO, ANHIDRITA, HALITA	SE RAYAN CON LA UÑA Y NO EFERVECA CON HCl FRIO.	EN ESTRATOS DELGADOS Y EN FORMA MASIVA	YESOS, ANHIDRITA, HALITA (SAL GEMA)	
		MINERALES FOSFATICOS Y FRAG DE INTRUSO	CON ANALISIS QUIMICOS.		FOSFORITA	
		HUMOS CARBONO Y HUMEDAD.	COLOR PARDO O CAFE	EN DELGADOS LENTES Y ESTRATOS	CARBONES LIGNITO	
			FRACTURA PRISMATICA		BITUMINOSO	
FRACTURA CONCOIDEA	ANTRACITA.					

### III.- CLASIFICACION DE LAS ROCAS METAMORFICAS

Hay muchos modos de cómo pueden clasificarse convenientemente las rocas metamórficas. El método más sencillo y práctico consiste en dividir las rocas exfoliadas y no exfoliadas, como lo han hecho Pirsson y A. Knopf.

Los criterios de campo son fundamentalmente en el estudio de las rocas metamórficas. Algunas rocas metamórficas están íntimamente asociadas con las intrusiones ígneas; otras rocas deformadas dinámicamente están localizadas a lo largo de las bases de las fallas de empuje o zonas de cisalleo intenso; y aun otras rocas metamorfoseadas dinámicamente están relacionadas en una escala regional con la deformación de la corteza. Los estudios de campo de las asociaciones de origen de las rocas metamórficas. Por consiguiente, los criterios de los orígenes ígneo o sedimentario son únicamente las relaciones de campo. El paso gradual de una roca metamórfica a sedimento o ígnea es una buena rielita (añadida, pero no borrada), tan conclusivos respecto al origen de las rocas metamórficas, se demuestra mejor en el campo.

La constitución del agrupamiento mineral producido por el metamorfismo es el mejor criterio de la temperatura y la presión. Los minerales proporcionan también cierta información de la naturaleza de la roca madre. Por ejemplo, la escapolita es típicamente un mineral de los esquistsos de derivación pelítica. El grafito se deriva en su mayoría de un sedimento. Los minerales se han usado extensamente para calificar el grado o intensidad del metamorfismo.

La textura de las rocas metamórficas determinada tanto en el campo como en el laboratorio, por métodos tales como la observación macroscópica, la microscópica y la petrografía, constituye un registro completo de la intensidad y clase de deformación que intervienen en el metamorfismo.

Como otros criterios, el mineralógico y el estructural, pueden ser reconocidos con facilidad en los ejemplares de campo, el método macroscópico es el medio más simple y práctico de clasificar las rocas metamórficas. Por esta razón se ha preparado la tabla 3-1 de manera que incluya a las rocas metamórficas comunes, dispuestas según las tres texturas distintas; a saber: cataclásica, no exfoliada y exfoliada.

Los tipos de metamorfismo, minerales metamórficos y texturas (estructura y textura) metamórficas ya antes tracados, indican que las rocas metamórficas tienen un campo único de ocurrencia y formación física. Ciertas rocas metamórficas formadas en un ambiente metamórfico particular se caracterizan por minerales y texturas metamórficas diferentes. Por ejemplo, las rocas térmicamente metamorfoseadas, como los mármoles y los skarns, se caracterizan por su textura granoblástica, originada porque el esfuerzo desempeñó un papel muy pequeño en su formación. Por otra parte, las rocas metamorfoseadas regionalmente, como las pizarras (slates) y los esquistos, formadas bajo un potente esfuerzo, se caracterizan por su diversas texturas exfoliadas. Por tanto, para identificar las rocas metamórficas es esencial reconocer las texturas metamórficas comunes en tres texturas distintas; a saber: la cataclástica, la no exfoliada y la exfoliada. Una vez que se ha determinado la textura, puede uno acercarse más a la roca que se tiene bajo investigación. Entre las rocas no exfoliadas, como el mármol, la cuarcita y el hornfels, las texturas pueden ser de grano fino, mediano o grueso. Entre las rocas típicamente granulosas y típicamente esquistosas, algunas pueden ser de transición; tales rocas pueden manejarse usando un adjetivo calificativo, como gneis bandeados, mármoles esquistosos y cuarcitas esquistosas.

La textura cataclástica se manifiesta por la fragmentación intensa o por una apariencia de mosaico granular que afecta a toda la roca excepto los centros de los elementos minerales constitutivos más grandes de una roca metamórfica como resultado de la deformación mecánica ocurrida durante el metamorfismo de dislocación o el cataclástico. Las rocas metamórficas con textura cataclástica, como la brecha triturada, las rocas flaser, la milonita, etc., son difíciles de estudiar en los ejemplares de mano y deben comprobarse en el campo.

El término "exfoliación" se refiere al paralelismo mutuo o alineamiento de los minerales laminares; como la biotita, la muscovita, la clorita, el talco; etc., en las rocas metamórficas. Como cada uno de estos minerales tiene su crecimiento en hojas delgadas, las rocas en las que están alineados se parten fácilmente en una dirección con superficies regularmente lisas. Esta orientación paralela con hojas delgadas y fácil de dividirse, es la textura común de muchas rocas metamórficas, como las pizarras (slates), las filitas, los

los cristales, etc. Los gneis pueden estar fuertemente foliados con hojas gruesas y superficies lisas, debido a la preponderancia de los minerales cuarzo-feldespáticos sobre otros componentes escamosos.

La textura descrita como granoblástica se realiza principalmente en las rocas compuestas esencialmente de minerales equidimensionales, como el cuarzo, el feldespato, la calcita, la augita, la diópsida, etc. Por tanto, las rocas no son exfoliadas.

Entre las rocas metamórficas no exfoliadas, se encuentran (rocas de silicatos de calcio) y los hornosales por lo que se clasifican en los ejemplares de mano. Son esenciales para su identificación las relaciones de campo con las intrusiones ígneas. Los mármoles o rocas de mármol desde la de grano fino hasta la de grano grueso en el extremo. Muchos minerales que se encuentran en los mármoles, como la diópsida, la wollastonita, la vesubianita, la grosularita, son únicos, y no están presentes como tales en las rocas carbonatadas premetamórficas. Las cuarcitas son rocas metamórficas compuestas principalmente de cuarzo que ha sufrido recristalización. Su durabilidad y resistencia provienen del mutuo entrelazamiento de los cristales de cuarzo.

Entre las rocas finamente exfoliadas, el grado de recristalización, el tamaño del grano y el lustre, varían desde la argilita y la pizarra (plate) hasta la mica. Las argilitas están fuertemente endurecidas y son tan plásticas como las pizarras (shales) que es necesario el estudio en el campo para confirmar su identidad. Las pizarras (plate) exhiben una esquistosidad planar perfecta, aunque por lo general los minerales no pueden determinarse macroscópicamente. Las filitas son rocas esquistosas de grano fino que ocasionalmente muestran fajeado producido por segregación incoherente; característicamente, los planos de esquistosidad tienen un lustre satinado originado por la abundancia de muscovita y de clorita.

Los esquistos son productos de metamorfismo regional, y los esquistos son fuertemente esquistosos. Los minerales de hábito laminar son parte integrante de los esquistos y su orientación subparalela a la notable esquistosidad; la formación de ellos por segregación está generalmente bien realizada. El tamaño del grano de los minerales principales permite su fácil identificación en los ejemplares de mano. Sobre la base de los minerales característicos



rísticos prominentes, pueden identificarse los esquistos de todas clases con exactitud, como esquisto de clorita, esquisto de biotita, esquisto de actinolita, etc.

Los gneis son rocas de grano grueso, fajeadas irregularmente, en las que la exfoliación está deficientemente definida a causa de la preponderancia de los minerales granoblásticos sobre los laminares. Las variedades comunes del gneis son el gneis de granito, el gneis de gabro, etc.

Las anfibolitas son rocas de grano mediano a grueso, compuestas principalmente de hornblenda y plagioclasa; su exfoliación se debe al alineamiento paralelo de los prismas de hornblenda, pero es menos clara que en los esquistos típicos.

Las granulitas son rocas metamórficas granoblásticas de grano uniforme formadas por metamorfismo regional a temperatura y presión elevadas. Las rocas no son manifiestamente esquistosas; la exfoliación que está presente se debe a la orientación paralela de lentes planas compuestas de cuarzo, feldespatos, hiperstena y granate.

La charnockita y la eclogita son rocas raras. Son productos de metamorfismo regional o de metamorfismo plutónico, formados a extremada presión y elevada temperatura, y su aparición se limita a las áreas de escudo precámbricas. La charnockita incluye a las rocas graníticas portadoras de hiperstena y a las variedades intermedias y ródicas afines. La eclogita es una roca muy densa, compuesta principalmente de omfacita, piropo-almendina y rutilo.

Las migmatitas son rocas mezcladas y ocurren como rocas de la zona de los bordes en torno de los plutones ígneos, o bien están limitadas a las áreas de escudo precámbricas. El entremezclamiento del material granítico y metamórfico tiene lugar a una escala tan fina que es difícil distinguirlo en un ejemplar de mano.

La tabla y la breve descripción presentadas antes deben simplificar la clasificación y la determinación del origen de las rocas metamórficas comunes y su determinación macroscópica.

S  
A  
F  
U  
X  
E  
T

NOMBRE DE LA ROCA

TIPO DE METAMORFISMO

ROCA PREEXISTENTE

ESQUISTOSA

PIZARRAS  
FILITAS  
ESQUISTOS DE MICAS  
ESQUISTOS DE ESTAUROLITA  
ESQUISTO DE.....

R E G I O N A L

L U T I T A S

CUALQUIER TIPO DE ROCA

ESQUISTOSIDAD DEFICIENTE.

GNEIS DE CUARZO Y FELDSP  
GNFIS DE.....

CUALQUIER TIPO DE ROCA

NO ESQUISTOSA

HORNFELS O CORNEANA  
SKARN  
MARMOL  
METACUARCITA

D E C O N T A C T O

DE CUALQUIER TIPO DE ROCA

D E C O N T A C T O

CALIZAS IMPURAS

D E C O N T A C T O O R E G I O N A L

D E C A L I Z A S

D E C O N T A C T O O R E G I O N A L

ARENISCAS, ROLITAS, GRANITOS

ESQUISTOSA  
O  
NO ESQUISTOSA

BRECHA DE FALLA  
MILONITA  
FILONITA  
CATACLASITA

C A T A C L A S T I C O

DE CUALQUIER TIPO DE ROCA



MINERALES ESSENCIALES.		FELDSPATOS K > 66% DEL TOTAL DE FELDS.				FELDSPATO (K33-66%) EL TOTAL DE FELDS.				
		CUARZO >10%	CUARZO <10%			CUARZO >10%	CUARZO <10%			
		FELDSPATOS < 10%	FELDSPATOS > 10%		FELDSPATOS < 10%	FELDSPATOS > 10%		FELDSPATO K >10%		
MINERALES ACCESORIOS.		PREDOMINANTES: HORNBLENDA, BIODITA, PIROXENAS Y MUSCOVITA				PREDOMINANTES: HORNBLENDA, BIODITA Y PIROXENAS.				PREDOMINANTE: HORNBLENDA BIODITA
CARACTERISTICOS		OCASIONALES: ANFIBOLES SODICOS, ALEIRINA, CANCRINITA, BOPALITA Y TURMALITA				OCASIONALES: ANFIBOLES SODICOS Y ALEIRINA				OCASIONALES: PIROXENAS FELDS
FANERITICA	EQUIGRANULAR	GRANITO	SIENITA	SIENITA						
	RATOLITOS LOPOLITOS STOCKS LACOLITOS GRANDES DIQUES GRUESOS Y MANTOS	ALASQUITA POCOS MINERALES, OSCUROS. GRANITO GRANITO TEXTURA GRANITA. GRANITO ALCALINO ALBITA ABUNDANTE, PIROXENAS O ANFIBOLES CHARNOQUITA CON OTROS PIROXENOS. LUXULLIANITA TURMALINIZADA.	SIENITA CON CUARZO SIENITA ALCALINA CON CUARZO, EXCEPTO ALBITA. EULASKITA CON FUCHA NEFELINA CON POCO CUARZO LARYNITA CON FELDSPATO AZUL SHONKINITA ABUNDANTES FERRO-MAGNESIANOS	SIENITA NEFELINICA SIENITA LEUCITICA CON FELDSPATO, SOLO SEUDOLEUCITA SIENITA SODICA FELDSPATOIDES SODALITA EGYPTA CON ANFIBOLES FELDSPATOS MALIGNA CON OTROS MINERALES LOCALS						
	MATRIZ FANERITICA	GRANITO PORFIDICO	SIENITA PORFIDICO	SIENITA NEFELINICA PORFIDICA						
PORFIDICA	LACOLITOS, DIQUES, MANTOS Y BORDES DE GRANDES MASAS	GRANITO PORFIDICO	SIENITA PORFIDICO	SIENITA NEFELINICA PORFIDICA						
	MATRIZ AFANITICA DIQUES, MANTOS PEQUEÑOS STOCKS Y BORDES DE GRANDES MASAS	RIOLITA PORFIDICA	TRAQUITA PORFIDICA	FONOLITA PORFIDICA						
AFANITICA	MICROCISTALINA DIQUES, MANTOS, FLUJOS SUPERFICIALES, BORDES DE GRANDES MASAS Y TODAS BOLDADAS.	RIOLITA	TRAQUITA	FONOLITA FORALITA LEUCITA (TRAQUITA LEUCITICA) SOLO LEUCITA TINGUAITA CON ABUNDANTE AEGIRINA WYOMINGITA CON LEUCITA Y FLOGOPITA						
	VITREA FLUJOS SUPERFICIALES, BORDES DE DIQUES, MANTOS Y TODAS BOLDADAS.	OBSIDIANA NEGRA PIEDRA PEZ: RESINOZA VITROFIDO: PORFIDICO PERLITA: FRACTURAS CONCENTRICAS PUMICITA: FINAMENTE CELULAR, COLORES CLAVOS ESCORIA: CELULAR GRUESA, COLORES OSCUROS							NUNCA HAY CEMENTO DE LA COLUMNA DE LA DISTRIBUCION EXCEPTO LA ESCORIA, SON MINERALIZACIONES DEL FONDO DE SILICE (POR INDIQUE DE LAS MASAS ROCAS PUEDEN SER FORMADAS ALA TASQUITA O "VITROFIDO LACTICO" LLAMADA "TAQUILITA" Y LA TAQUILITA	
	PROCLASTICA	NOMBRE DE LA ROCA PROCLASTICOS APORRACION POR EMPUJONES VULCANICOS Y SE ENCIENTRAN ACUMULADAS SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE	COMPONENTES PRINCIPALES BORDES Y BOQUES CRISTALES LITICOS VIDRIOS PROCLASTICOS Y CLASTICOS SEGMENTARIOS CRISTALES Y VIDRIOS O VIDRIOS SEPARATE			TODAS LAS TUBOS DE... SIMILAR A LAS...				
LACOLITOS	PORFIDICA Y PANOMORFICA	NOMBRE DE LA ROCA VORTITA MIBAHITA MESSANTITA ALBITA CHARNOQUITA ANFIBOL ALCALINO MIBAHITA ALCALINA		MINERALES ESSENCIALES BIODITA, TOCLASA O SANILINO ALBITA O HORNBLENDA VORTUCLESA O SANILINO BIODITA, PLACIOCLASA ALBITA O HORNBLENDA, PLACIOCLASA SIENITA NEFELINICA Y ALBINO ANFIBOL ALCALINO O ANFIBOL ALCALINO Y ANALCINA ANFIBOL ALCALINO Y DORTUCLESA O SANILINO ANFIBOL ALCALINO VORTUCLESA O SANILINO						



# E LAS ROCAS IGNEAS

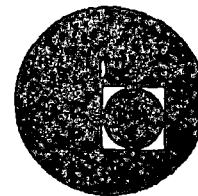
LOGIA

MASAS > 66% DEL TOTAL DE FELDESPATOS.				POCO O NADA DE FELDESPATOS		TIPOS ESPECIALES.
PLAGIOCLASAS SODICAS FELDESPATO K < 10%		PLAGIOCLASAS CALCICAS FELDESPATO K < 10%		PRINCIPALMENTE PIROXENOS Y/O OLIVINO	PRINCIPALES MINERALES FERROMAGNETICOS Y FELDESPATOS	
CUARZO > 10%	CUARZO < 10% FELDESPATOIDE < 10%	CUARZO < 10% FELDESPATOIDE < 10%	PIROXENO > 10% FELDESPATOIDE > 10%			
S ITA, PIROXENAS EN ANDESITA.		PREDOMINANTES PIROXENAS, URACITA Y OLIVINO.		PREDOMINANTES SERPENTINA Y MENA DE HIERRO		P EGHATITA CANELOCISTALINA TALLENITE, MELIOLITA ROCA FELDSPATICA O MASAS IRREGULARES PEQUEÑAS; TENS- TURA GRUESA CONSISTENCIA
SPATOS, ANFIBOLES SODICOS		OCASIONALES HORNBLENDA, BIOTITA, CUARZO, ANALCIMA, ENGININA, ANFIBOLES SODICOS		OCASIONALES: HORNBLENDA		
CUARZODIORITA	DIORITA MANGUERITA CON ORTOCLASA.	GABRO	THERALITA LICHENITA TIENE COMO FELDESPATOIDE LA NEFELINA TRESCHENITA CON FELDESPATOIDES, -- SOLO ANALCIMA THERALITA TIENE NEFELINA Y OLIVINO	PERIDOTITAS	MISORITA CON -- PIROXENOS, OLIVINO Y SCODALCITAS MOLITA PIROXENOS Y NEFELINA PEROSITA CON -- PIROXENOS O SCOD- LEUCITAS UNICOPIROXITA (PIROXENITA MELI- OLITICA) CON PI- ROXENOS Y MELIOLITA	APLITA ROCA METACRISTALINA FUSIONADA, TENE UNA TEXTURA SACAROSA, METAMORFICA, CAM- GRANULAR DE GRANO FINO GENERALMENTE CON POCOS CUARZOS ACMA A FINEZA CARACTERISTICO ROCA FELD- SPATICA DE MOUNTAIN CAMPANOCISTALES DE MOUNTAIN CAMPANOCISTALES EXCLUSIVAMENTE Y/O MOUNTAIN CAMPANOCISTALES EN LA MATRIZ CLASIFICACION EN EL WANG
		GABRO DE OLIVINO CON OLIVINO FROSTOLITA SOLO OLIVINO Y FLUOXELS ANDRITONITA SOLO FLUOXELASAS GABRO DE CUARZO CON CUARZO		DIABASA (DOLERITA DE TIPO TERRA) TEXTURA AFANITICA BASICA, NORMALMENTE DE GRANO MEDIO O FINO (MICROPIROXITA)		
CUARZODIORITA PORFIDICA	DIORITA PORFIDICA	GABRO PORFIDICO	THERALITA PORFIDICA.	PERIDOTITA PORFIDICA KIMBERLITA PERIDOTITA PORFIDICA O BRECHA DE PERIDOTITA.		
DACITA PORFIDICA	ANDESITA PORFIDICA	BASALTO PORFIDICA	TEFRITA PORFIDICA	LIMBURGITA PORFIDICA		LAMPROFIDOS ROCA AFANITICA DE COLORES OSCUROS FELSITA ROCA AFANITICA DE COLORES CLAROS CO- NUNQUE ALKALINO TEXTURA FELSITICA O CRIPTO- CISTALINA
DACITA	ANDESITA	BASALTO BASALTO CON OLIVINO BASALTO CON ANALCIMA BASALTO CON CUARZO OCENITA CON ABUN- DANTE OLIVINO TRACHIBASALTO CON SANGUINA O ANTECLASA	TEFRITA TEFRITA LEUCITICA CON FELDESPATOIDES SOLO LEUCITA BASANITA CON OLIVINO Y ANALCIMA DASALTO FELDESPATO- IDIC BASANITA LEUCITICA CON OLIVINO	LIMBURGITA	DIABASA (DOLERITA DE TIPO TERRA) TEXTURA AFANITICA BASICA, NORMALMENTE DE GRANO MEDIO O FINO (MICROPIROXITA)	
<p>LA COMPOSICION DE ESTAS ROCAS, ELAS SON COMUNMENTE DESIGNADAS CON LOS LOS OTROS DATOS SON RAROS, POR LO TANTO LAS ROCAS MENCIONADAS, -- LAS SI LA COMPOSICION APROXIMADA (POR ASOCIACION CERRADA) O CON UNO O ANALISIS QUIMICO) PUEDEN SER DETERMINADOS, AL NOMBRE DE ES- NOMBRE DE LA ROCA AFANITICA APROPIADA, POR EJEMPLO, "ORBINANA" EN GENERAL LA ESCORIA ES BASICA, LA OBSIDIANA BASICA ES -- TEFRITICA ES LLAMADA "VAROLITA".</p>				<p>FRECUENCIA DE OCURRENCIA</p> <p>== ROCAS COMUNES</p> <p>== ROCAS NO COMUNES</p> <p>== ROCAS RARAS.</p>		
<p>UNA COMPOSICION MINERALOGICA. BASALTO, BASALTO, TRACHITAS, ETC.</p>						
<p>FORMULO</p> <p>IND ANTES DE 1902 AYALA.</p>						

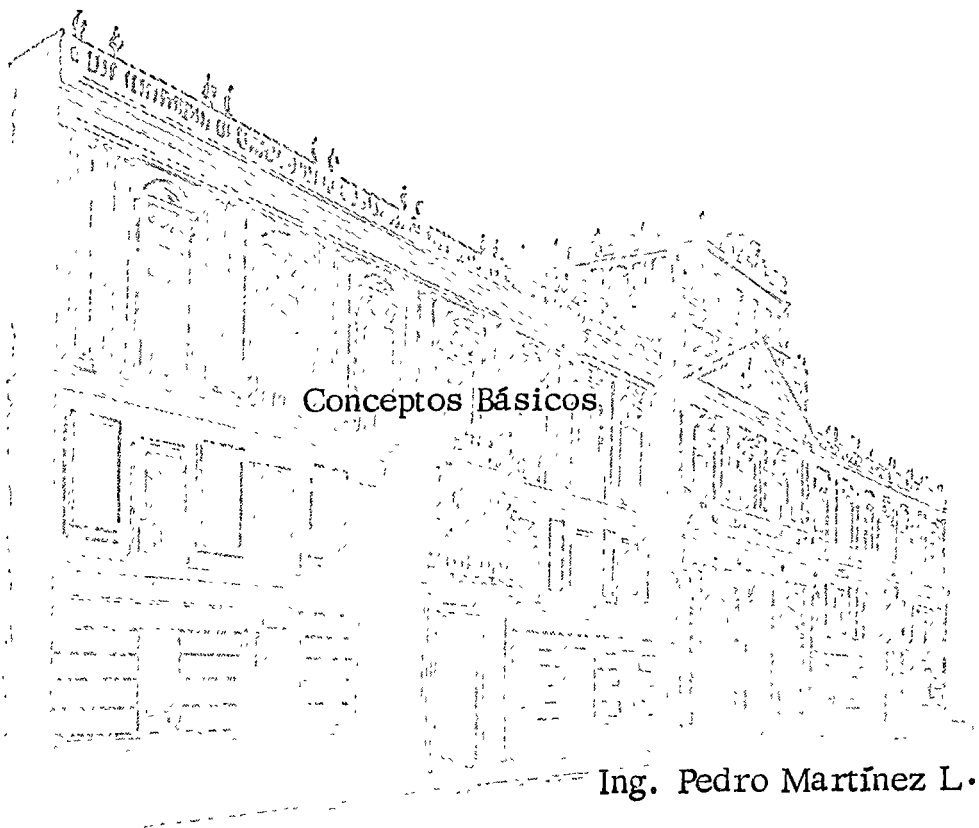




centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## HIDROLOGIA SUBTERRANEA



Ing. Pedro Martínez L.

Handwritten text, possibly a header or title, including the number '100' and other illegible characters.





## II.- CONCEPTOS BASICOS

### 2.1.- EL AGUA SUBTERRANEA.- GENERALIDADES

La mayoría de las rocas contienen numerosos espacios abiertos, llamados intersticios en los cuáles el agua puede ser almacenada y circular a través de ellos. El agua que se encuentra en los intersticios de las rocas es llamada agua del subsuelo; aquélla parte de la misma que existe en una zona de intersticios completamente saturados, se denomina agua subterránea.

La apertura de pozos para captar el agua del subsuelo, es realmente una de las prácticas más antiguas del hombre; pero no obstante la antigüedad de los conocimientos prácticos sobre el alumbramiento de aguas subterráneas mediante pozos, el verdadero desarrollo de las técnicas científicas de exploración y captación de ellas ha tenido lugar muy recientemente, en los últimos cuarenta años. Las modernas maquinarias y técnicas de sondeos, el empleo de equipos de bombeo modernos, han sido factores determinantes del incremento reciente del uso de las aguas subterráneas. Pero es desde luego, el incremento de las demandas de agua, como consecuencia del desarrollo agrícola, la industrialización y explosión demográfica, - lo que ha motivado la utilización cada vez mayor del agua del subsuelo y más aún en aquéllas regiones donde el subsuelo constituye la única fuente para proporcionar agua - en forma constante y en cantidades apreciables.

Es un recurso importante también en aquéllas regiones donde los recursos hidráulicos superficiales están siendo aprovechados en su totalidad.

Comparado con los almacenamientos superficiales el almacenamiento de agua subterránea presenta ventajas - y desventajas, entre ellas podemos mencionar las siguientes:

V E N T A J A S :

- \_\_\_ Distribución amplia en el área
- \_\_\_ No se pierde por evaporación directa.
- \_\_\_ No esta expuesta a la contaminación ambiental
- \_\_\_ El almacenamiento subterráneo no se azolva.
- \_\_\_ Posee una temperatura constante.
- \_\_\_ Es generalmente buena en calidad.

D E S V E N T A J A S :

- \_\_\_ No está a la vista, consecuentemente es difícil conocer su comportamiento y su cuantía.
- \_\_\_ Su regularización es difícil de obtener.
- \_\_\_ Al circular en el medio poroso disuelve los minerales constituyentes de las rocas, modificando su calidad, hasta hacerla inaprovechable en algunos casos.

2.2.- DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

Es muy común la creencia de que el agua en el subsuelo se encuentra formando grandes lagos o fluyendo a través de conductos de gran tamaño (ríos subterráneos), esto se puede presentar en casos especiales de rocas calizas o basaltos fracturados; pero generalmente el agua circula y se almacena en los poros o intersticios que dejan entre sí las partículas de material; es decir en un medio poroso.

Las rocas y el suelo constituyen el medio poroso por el que circula el agua subterránea bajo la acción de diversas fuerzas. Este medio poroso tiene una matriz sólida, o esqueleto, constituido por una agregación de granos minerales sólidos, los cuáles pueden estar llenos de agua, de gases o de materia orgánica.

Las diferencias en el número, tamaño, forma, interconexión y arreglo de los intersticios son originadas por la gran diversidad de procesos geológicos que forman las rocas y las modifican posteriormente. Los intersticios de las rocas se clasifican en dos grandes grupos:-- los de origen; engendrados al mismo tiempo que se forma-

# DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

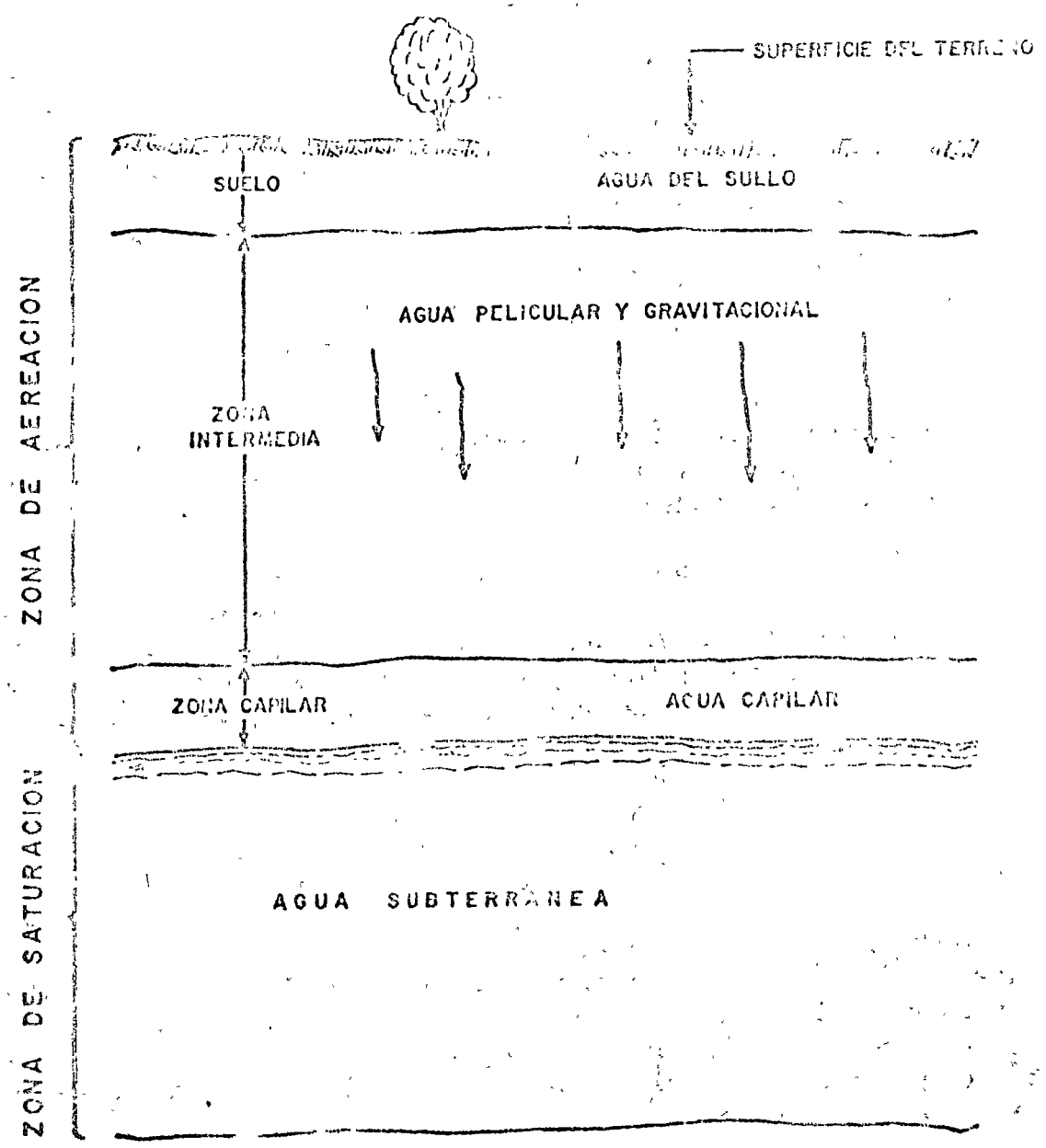


Fig. No. 1

ron las rocas que los contienen, y los secundarios; tales como diaclasas, fisuras de meteorización o conductos formados por disolución cuyo origen es posterior e independiente del de las rocas que los contienen.

En el subsuelo, el agua se encuentra distribuida en dos grandes zonas; la de aereación y la de saturación. La zona de aereación se encuentra parcialmente saturada y es subdividida en zona de agua del suelo, zona intermedia y zona capilar. (Fig.1)

En la zona de agua del suelo, constituida por suelo y otros materiales, el contenido de agua está influenciado por lluvia, riego, drenaje y evapotranspiración.

Esta zona por estar próxima a la superficie permite que pase una cantidad considerable de agua de su seno a la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación directa del terreno.

En condiciones ordinarias es difícil que la evaporación directa se extienda a más de un metro de profundidad. En cambio, la transpiración vegetal puede afectar a zonas más profundas; por ejemplo se han observado raíces de trigo hasta 2 metros de profundidad, de alfalfa hasta 9 metros y de algunas plantas desérticas hasta 15 metros y más.

La zona intermedia limitada superiormente por la de agua del suelo e inferiormente por la capilar, contiene agua llamada pelicular adherida a los granos por fuerzas de atracción molecular y, temporalmente, agua gravitacional que fluye verticalmente hacia la zona de saturación durante los períodos de infiltración. Esta zona tiene interés para el geohidrólogo en los estudios de la recarga de los acuíferos inferiores, ya que el agua superficial tiene que pasar por ella antes de integrarse al almacén de la zona de saturación.

La zona capilar es la que limita superiormente la zona de saturación y sus intersticios están en comunicación con ella, estando todos o en parte llenos de agua, mantenida por atracción capilar. El espesor de la zona capilar en materiales granulares es, función del diámetro eficaz de sus partículas y, generalmente, aumenta al disminuir este diámetro. Puede variar su espesor de pocos centímetros en gravas o arenas gruesas hasta 3 metros o más en arcillas y limos finos.

El efecto del factor temperatura también es importante en la determinación del espesor del manto capilar, ya que hace variar al de tensión superficial del agua y, por tanto, los fenómenos de elevación capilar.

La zona de saturación tiene como límite superior al nivel freático o superficie freática, la cual es definida por el agua que se encuentra a la presión atmosférica.

Todos los estratos situados abajo del nivel freático se encuentran totalmente saturados.

El agua situada por debajo de la superficie freática es generalmente denominada agua subterránea, o sea el agua que se encuentra en la zona de saturación cuyo límite inferior es una zona donde la compacidad del terreno hace que éste tenga muy pocos poros, no conectados entre sí, con lo que el agua no puede emigrar en profundidad. La profundidad de este estrato compacto varía con el medio geológico.

### 2.3.- ACUIFEROS

Los acuíferos son aquéllas formaciones geológicas, dentro de la zona de saturación, que gracias a los espacios porosos que existen en su interior, son capaces de almacenar y transmitir agua a las captaciones en cantidades significativas.

Un acuitardo es un estrato o formación geológica que proporciona cantidades inapreciables de agua, pero a través de él puede circular un volumen apreciable de agua.

El término acuicludo se refiere a formaciones geológicas que pueden almacenar agua pero no la transmiten en cantidades significativas.

Una roca que ni almacena agua ni la transmite se llama acuífugo.

Los términos arriba antes mencionados son relativos, y pueden variar de acuerdo a las condiciones geohidrológicas existentes en un determinado lugar.

Por esta razón, algunos hidrogeólogos prefieren definir los acuíferos como zonas naturales situadas por -- debajo de la superficie del suelo que son capaces de sumi-

nistrar 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 cárstificadas y por otros muchos contextos geológicos diferentes.

Un acuífero sirve como medio transmisor y recipiente de almacenamiento, transporta agua de áreas de recarga a manantiales, áreas de evapotranspiración, pozos, áreas inundadas, almacenamientos y corrientes superficiales, etc. Como recipiente de almacenamiento proporciona una reserva de agua para ser usada durante periodos en los que la extracción excede a la recarga.

TIPOS DE ACUIFEROS: (Fig.2)

#### Acuífero Libre

Quando un acuífero tiene como límite superior el nivel freático, se le da el nombre de acuífero libre o no confinado o freático. Las variaciones del nivel freático corresponden a cambios en el espesor de la zona de saturación.

#### Acuífero Semiconfinado

Es cuando el acuífero está limitado por formaciones a través de las cuáles puede recibir o ceder, volúmenes significativos de agua, se le llama acuífero "Semiconfinado" (Fig.3)

#### Acuífero Confinado

Un acuífero confinado es aquel en el cual el agua subterránea es confinada bajo presión por estratos relativamente impermeables que lo limitan superior e inferiormente.

En pozos que penetran en acuíferos confinados o semiconfinados, el nivel del agua asciende por arriba del "techo" del acuífero. La superficie imaginaria definida por los niveles del agua en los pozos que penetran en este tipo de acuíferos, recibe el nombre de "Superficie piezométrica"; sus variaciones corresponden a cambios en la presión del agua del acuífero, y puede encontrarse en el

# DIFERENTES TIPOS DE ACUIFEROS

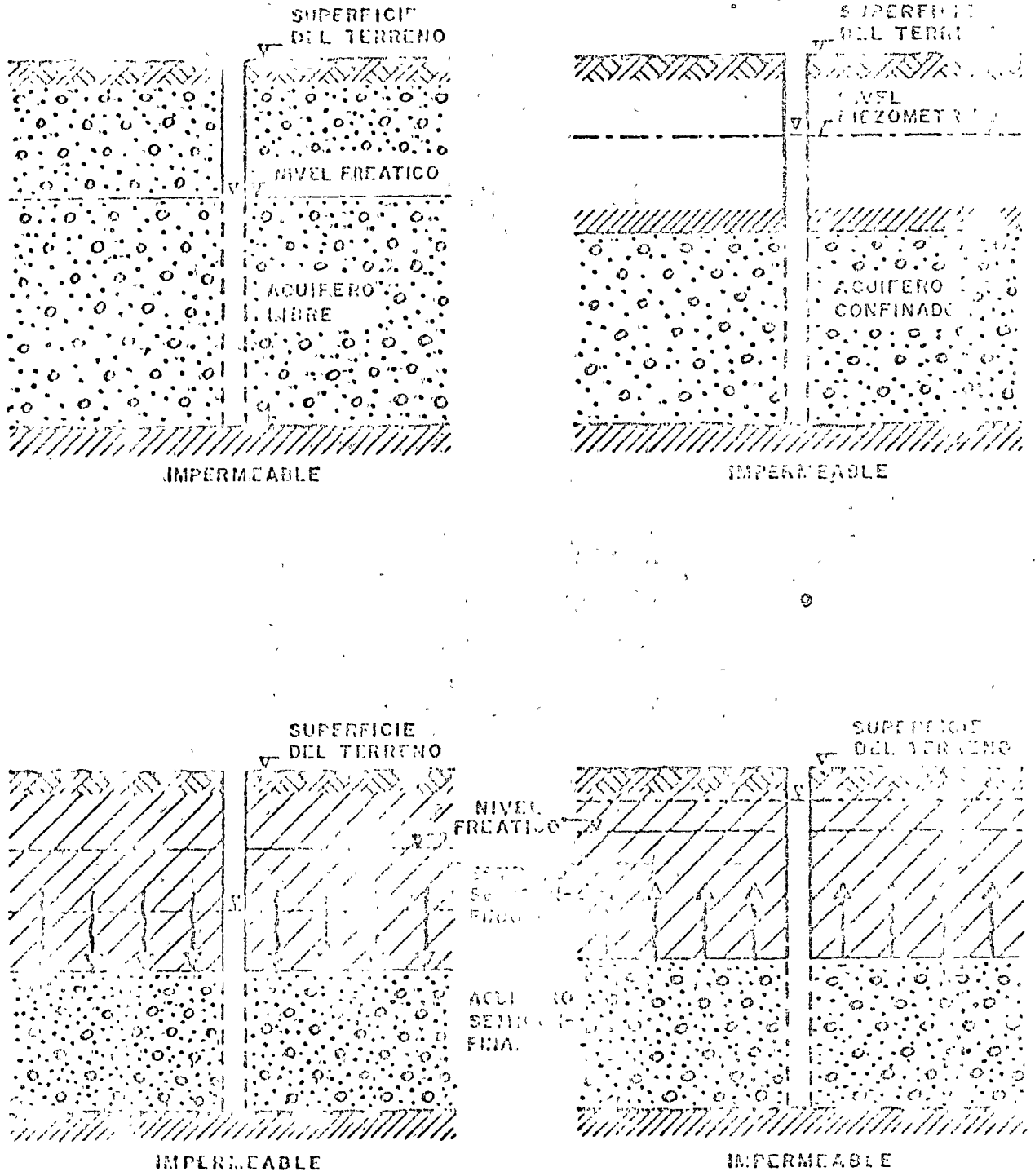


Fig. No. 2

# RESUME DE UN ACUITARDO EN UN ACUIFERO

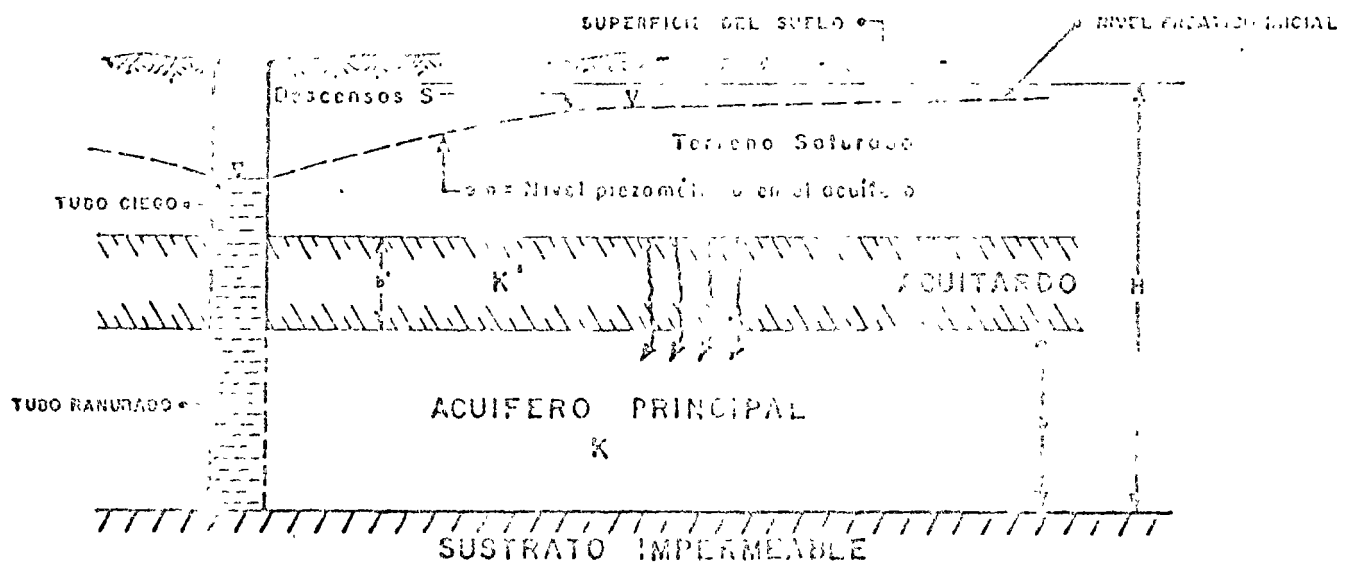


Fig. No. 3



caso de acuíferos semiconfinados en un punto dado, arriba o abajo del nivel freático.

Cuando dicha superficie se encuentra arriba de la superficie del terreno, da lugar a pozos brotantes. Los acuíferos confinados y semiconfinados puede transformarse en libres, cuando la superficie piezométrica desciende bajo el "techo del" acuífero.

El agua de un acuífero confinado se denomina agua confinada a la que también se le suele denominar agua artesiana. 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 emergentes o brotantes. En los últimos años, el término artesiano se ha venido utilizando más o menos como sinónimo de confinado.

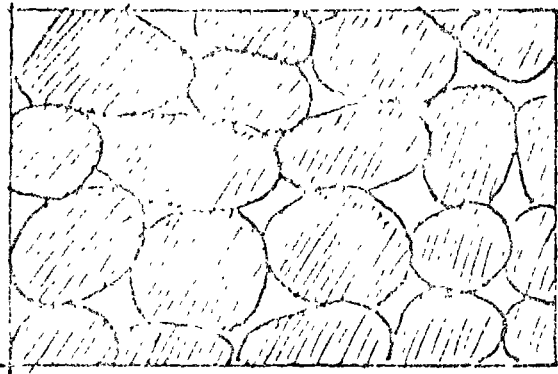
#### 2.4.- PROPIEDADES DE LAS ROCAS

Las propiedades más importantes de las rocas desde el punto de vista de un estudio del agua subterránea son la porosidad, rendimiento específico, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisibilidad.

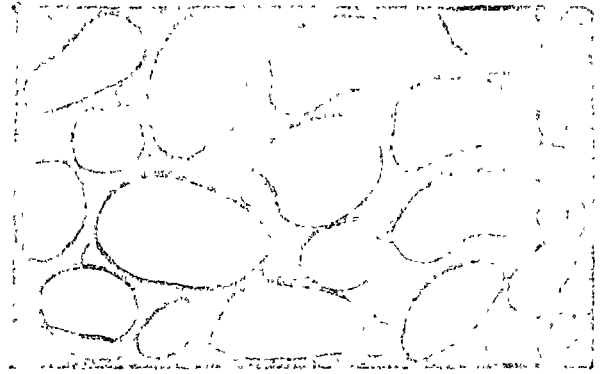
##### POROSIDAD (n)

Un volumen dado del medio poroso está constituido por un volumen de sólidos y un volumen de huecos. La porosidad (n) de una roca es una medida del volumen de huecos o vacíos que contiene, y se expresa como un porcentaje del volumen total. Un estrato está saturado cuando el volumen de sus huecos está totalmente lleno de agua. En este caso la porosidad será una medida de la cantidad de agua que puede contener una roca por unidad de volumen. La porosidad de los materiales consolidados depende del grado de cementación y del estado de disolución y de fracturación de la roca; la porosidad de los materiales sueltos depende del grado de compactación de los granos, de su forma, de su tipo de empaquetamiento y de su distribución por tamaños. Los granos pequeños pueden encajar dentro de los huecos existentes entre los granos de mayor diámetro, de forma que un medio heterométrico suele tener una porosidad más pequeña que otro en el que los granos estén bien clasificados. (Fig.4).

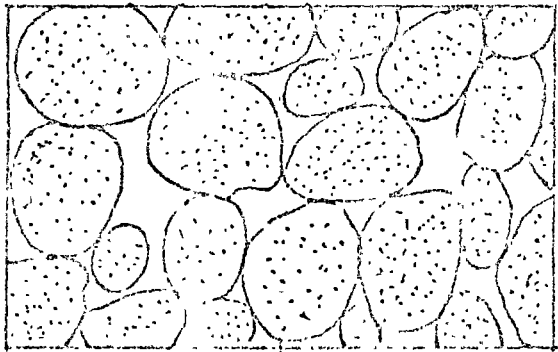
# DISTINTOS TIPOS DE INTERSTICIOS Y RELACION ENTRE LA TEXTURA Y LA POROSIDAD DE LAS ROCAS.



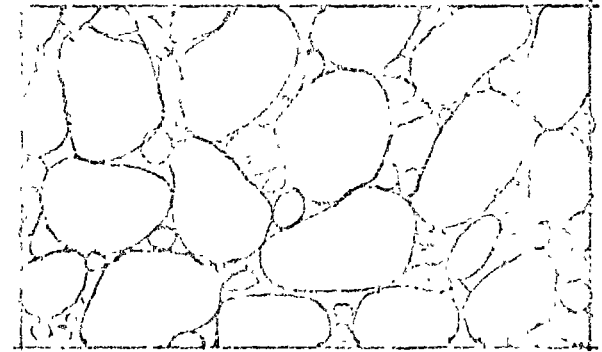
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HOMOGENEA Y GRAN POROSIDAD



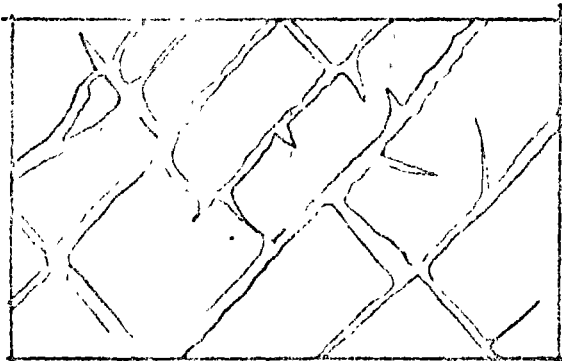
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HOMOGENEA CUYA POROSIDAD HA DECREMENTADO POR CEMENTACION DE SUS INTERSTICIOS CON MATERIAS ANEXAS



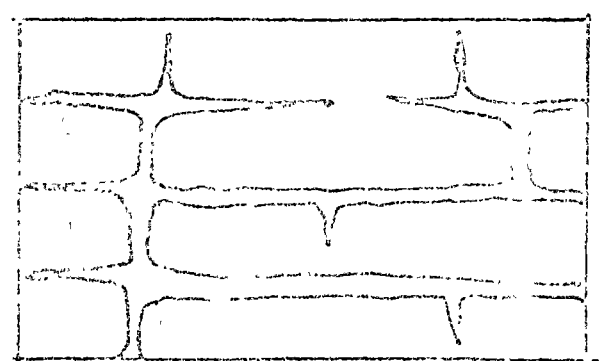
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HOMOGENEA FORMADO POR ELEMENTOS QUE A LA VEZ SON HOMOGENOS; POR TANTO, - POROSIDAD MUY REDUCIDA.



DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HETEROGENEA Y BAJA POROSIDAD.



ROCA POROSA POR FRAGMENTACION



ROCA POROSA POR SOLUCION

## RENDIMIENTO ESPECIFICO ( $S_y$ )

Cuando se drena por gravedad un cierto volumen de roca saturada, se observa que el volumen de agua que puede extraerse es muy inferior al volumen total de agua almacenada; una parte del agua es retenida en los intersticios, --- principalmente por fuerzas de atracción molecular, adhesión y cohesión; la atracción entre la pared de los poros y las moléculas adyacentes de agua es llamada adhesión, y la --- atracción entre moléculas adyacentes de agua es llamada -- cohesión.

La cantidad de agua retenida es directamente proporcional a la superficie de las partículas e inversamente proporcional al tamaño de los poros. La cantidad de agua retenida en poros depende también del tiempo drenado, de la temperatura y composición mineral del agua subterránea y de varias relaciones físicas de la roca.

El rendimiento específico de una roca es una medida de la capacidad de una roca de proporcionar agua y se -- define como el volumen de agua que puede liberar o almacenar por unidad de área horizontal cuando el nivel freático se mueve una unidad; el volumen de agua se expresa como un porcentaje del volumen total de roca donde antes se encontraba o ahora se encuentra el volumen liberado o almacenado respectivamente.

La retención específica ( $r$ ) de una roca es una medida de su capacidad para retener el agua, y se expresa como el volumen de agua retenido en contra de la gravedad por unidad de volumen de roca. La porosidad de una roca saturada -- es igual a la suma del rendimiento específico y la retención específica:

$$n = S_y + r$$

En la mayoría de las rocas, el agua no es liberada en forma instantánea, sino que existe un ligero retraso entre del descenso del nivel freático y el drenado total de -- los poros. El volumen de agua liberado, por unidad de volumen de roca, se incrementa gradualmente tendiendo al rendimiento específico.

## COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero, se define como el volumen de agua que éste puede liberar o agru

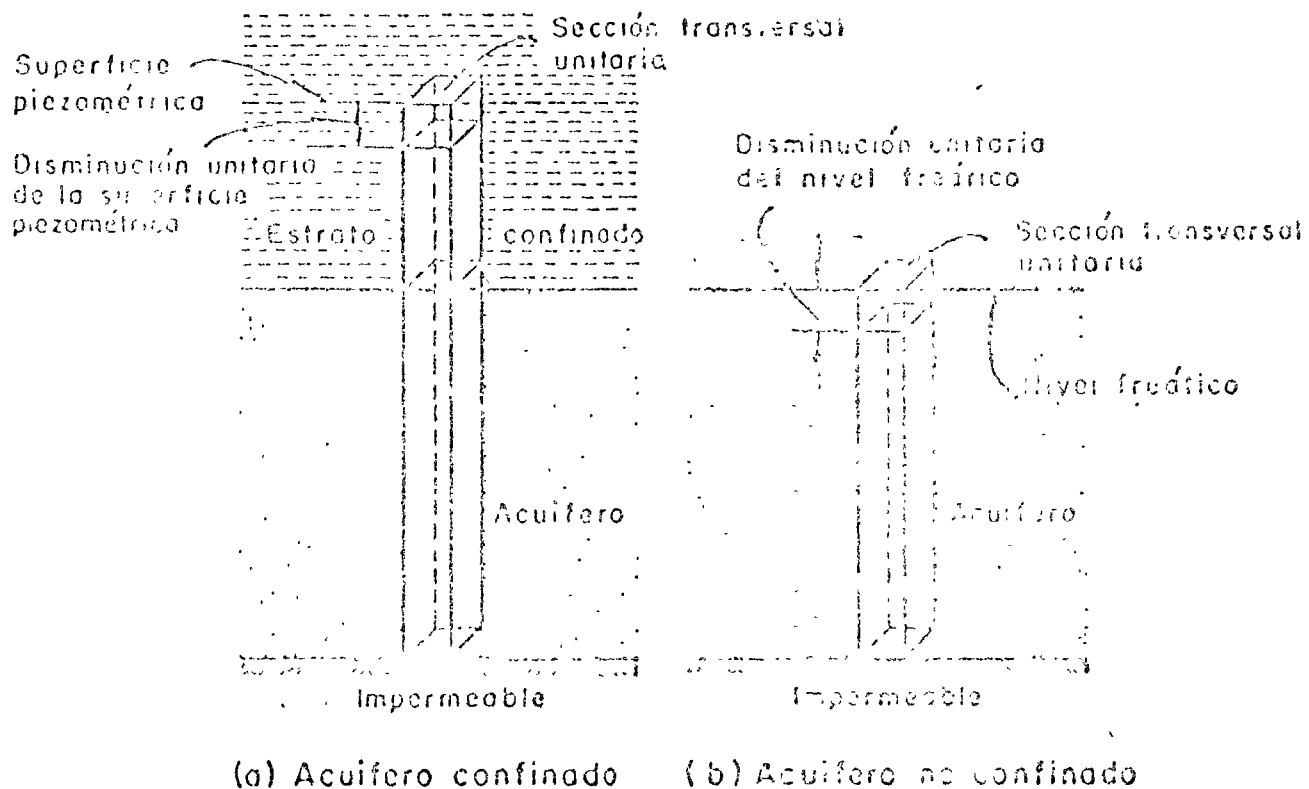


Fig. 5 Definición del coeficiente de almacenamiento

gar a su almacenamiento, por unidad de área horizontal y por unidad de variación del nivel piezométrico. (Fig.5)

Las fuerzas debido al peso de las formaciones -- arriba del acuífero y otras cargas, como la debido a la presión atmosférica, son soportadas por el agua contenida en los poros y por el esqueleto estructural del acuífero. Si el acuífero es comprensible y elástico y la carga total sobre la interfase permanece constante, una reducción en la presión del agua debido al descenso de la superficie piezométrica como consecuencia del bombeo de un pozo, origina un incremento en la carga soportada por el esqueleto del acuífero. Así el acuífero es compactado reduciéndose el espacio poroso. Al mismo tiempo el agua se expande al límite permitido por su elasticidad. En respuesta a la leve expansión del agua misma y a la pequeña disminución en porosidad debido a la leve compactación del esqueleto del acuífero, una cierta cantidad de agua será liberada -- del almacenamiento dentro del acuífero. Ese volumen liberado, referido a una unidad de volumen, representa el coeficiente de almacenamiento de un acuífero en condiciones -- confinadas o semiconfinadas.

Una buena prueba del comportamiento flexible de -- los acuíferos confinados la constituyen los hechos siguientes:

- 1) Cambios topográficos registrados en la superficie del suelo de las zonas fuertemente explotadas.
- 2) Las fluctuaciones del nivel de agua causadas -- por efectos de cargas ejercidas sobre la superficie del suelo.

Debido a que la compresibilidad del agua y el acuífero, son muy reducidas en la mayoría de los casos, el volumen de agua liberado a causa de los procesos antes mencionados, es muy pequeño; por consiguiente el coeficiente de almacenamiento de un acuífero confinado o semiconfinado tiene valores muy pequeños; en el rango de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ .

En cambio, en un acuífero libre, al volumen de -- agua liberado por compactación del acuífero y expansión -- del agua, se agrega el volumen liberado por el drenado del material (rendimiento específico). Como el primer volumen es muy pequeño en comparación con el segundo, se puede con-

sidear que el coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre es igual a su rendimiento específico.

Los rangos del coeficiente de almacenamiento en acuíferos libres varía de 0.02 a 0.30

#### PERMEABILIDAD (K) Y TRANSMISIBILIDAD (T)

La capacidad de una roca de permitir el paso del agua a través de ella se llama permeabilidad. Cuantitativamente su valor está dado por el coeficiente de permeabilidad el cual se define como el caudal que circula a través de un área unitaria, transversal al flujo bajo un gradiente unitario, estando el agua a una temperatura fija determinada. (fig:6)

La permeabilidad varía con la forma, acomodo y distribución granulométrica de las partículas constituyentes, y del grado de compactación o cementación de las mismas.

De acuerdo con su definición, las dimensiones de la permeabilidad son:

$$\text{Caudal} \times \text{Gradiente} \times \frac{1}{\text{superficie}} = \frac{L^3}{T} \times \frac{L}{L} \times \frac{L}{L^2} = \frac{L}{T}$$

Es común utilizar en el sistema métrico decimal como unidades de permeabilidad m/seg. o m/día.

El coeficiente de permeabilidad puede determinarse tanto, mediante métodos de laboratorio como a través de medidas realizadas en el campo. En el primer caso la permeabilidad puede obtenerse por medio de permeámetros en los que las muestras tomadas en diferentes puntos de un acuífero se exponen al movimiento determinado por una columna hidrostática constante o variable. Estas muestras están generalmente alteradas y, además, aunque en el proceso de su obtención y manipulación se mantengan sin alterar, en general no suelen ser representativas del valor medio de permeabilidad del acuífero. Para el hidrogeólogo es más significativa la determinación de la permeabilidad mediante la realización de pruebas de bombeo. (fig:7)

El concepto de coeficiente de transmisibilidad o simplemente transmisibilidad, que fué introducido por Theis en 1935 se define como el caudal que se filtra a través de

# ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LAS DEFINICIONES DE PERMEABILIDAD Y TRANSMISIBILIDAD

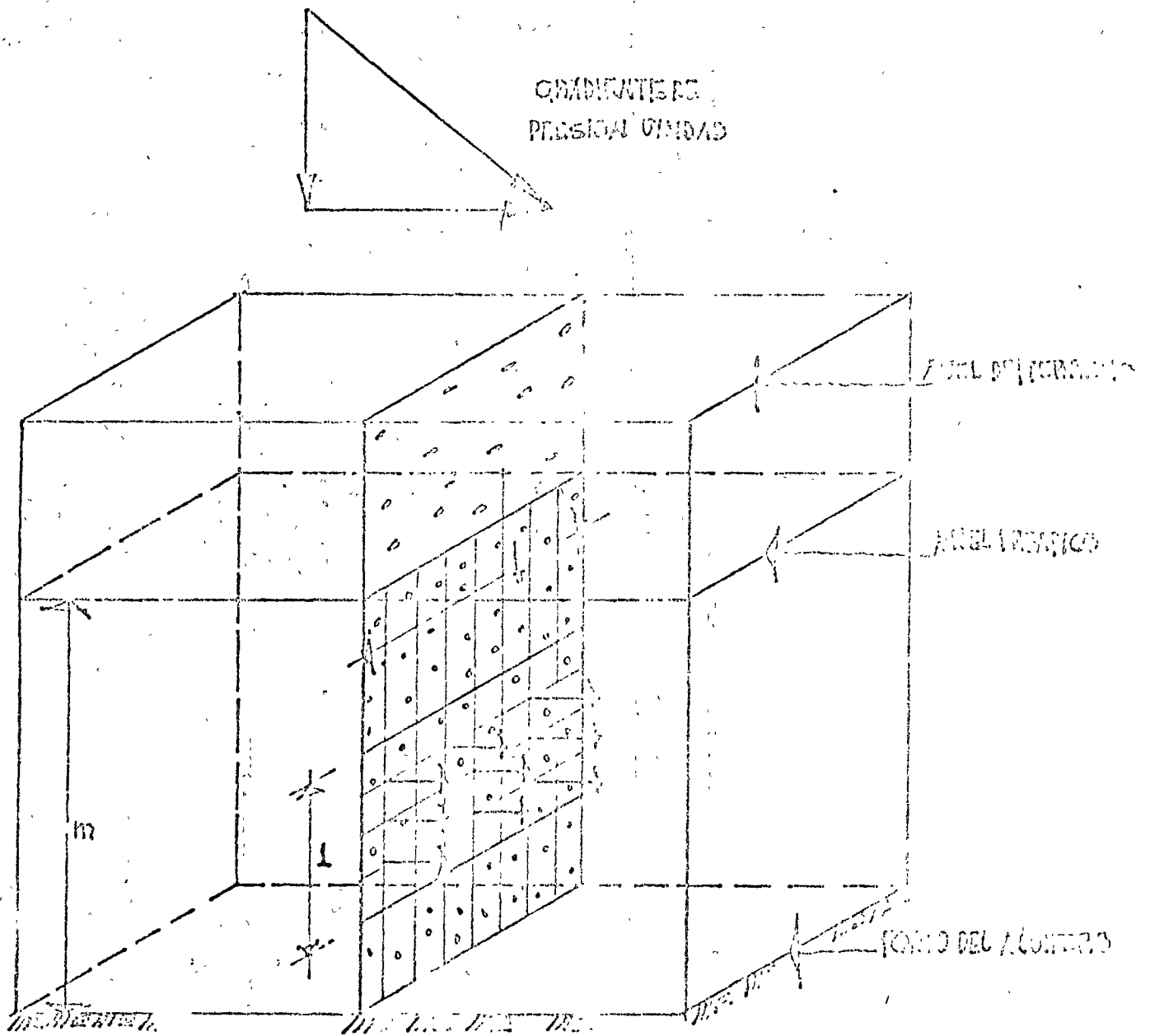


Fig. No. 6

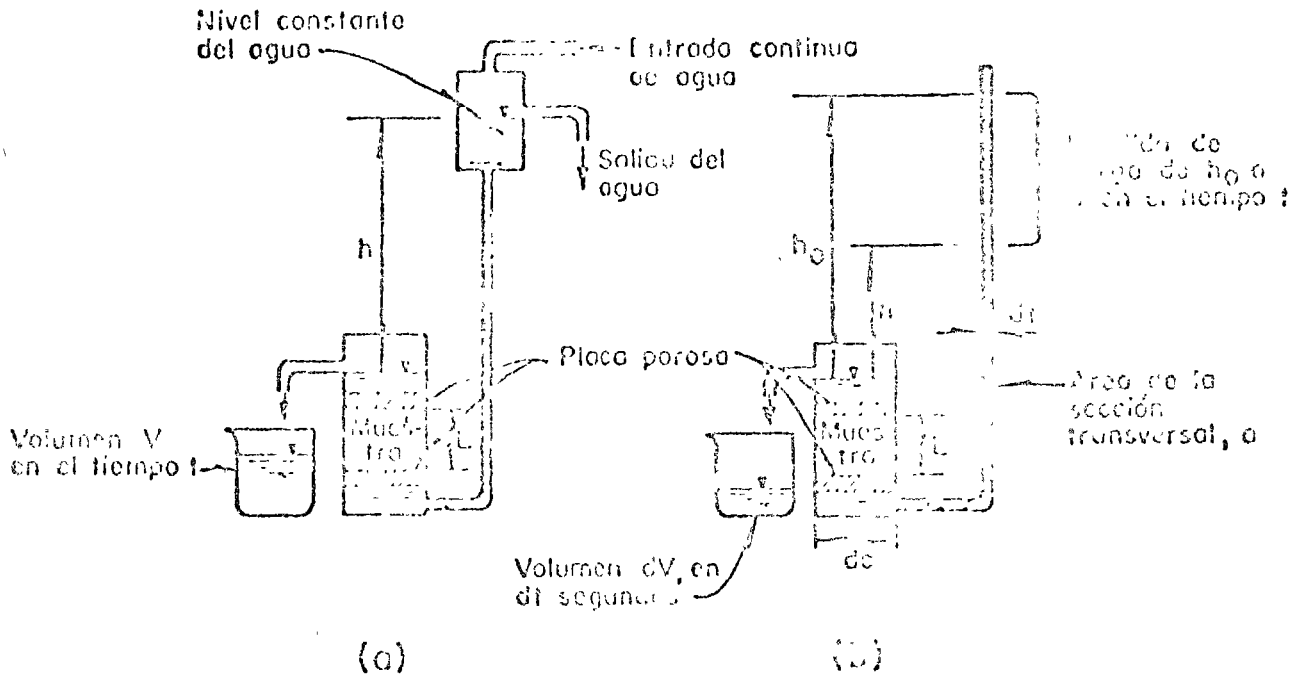


Fig 7 Permeámetro (a) Carga constante  
(b) Carga variable



una faja vertical de este estrato, de ancho unitario y de altura igual a la del estrato permeable saturado, bajo un gradiente hidráulico unidad, a una temperatura fija determinada. De acuerdo a lo anterior el coeficiente de transmisibilidad en el producto del coeficiente de permeabilidad y el espesor saturado del acuífero. (Fig.6)

Generalmente las unidades del coeficiente de -- transmisibilidad están dadas en  $M^2/seg$  ó  $M^2/día$ .

En la siguiente tabla se indican rangos representativos de porosidad, rendimiento específico y permeabilidad para las rocas más comunes.

T A B L A      No. 1

<u>R O C A</u>	<u>N (%)</u>	<u>S<sub>v</sub> (%)</u>	<u>K (M/seg. )</u>
Arcilla	45 a 55	1 a 10	$10^{-10}$ a $2 \times 10^{-7}$
Arena	35 a 40	10 a 30	$10^{-5}$ a $3 \times 10^{-4}$
Grava	30 a 40	15 a 30	$10^{-4}$ a $1.5 \times 10^{-3}$
Grava y Arena	20 a 35	15 a 25	$2 \times 10^{-5}$ a $5 \times 10^{-4}$
Arenisca	10 a 20	5 a 15	$10^{-8}$ a $5 \times 10^{-6}$
Caliza	1 a 10	0.5 a 5	Muy variable

Del análisis de los valores consignados en la tabla anterior se desprende que una elevada porosidad no -- implica una elevada permeabilidad.

Se concluye también que, para que una roca sea -- favorable como acuífero, se requiere además de un volumen considerable de agua almacenada que permita su fácil circulación hacia las obras de descarga.

#### 2.5.- RECARGA Y DESCARGA DE AGUA SUBTERRANEA

Los acuíferos tienen mecanismos naturales de recarga y descarga que pueden ser modificados mediante recarga y/o descarga artificiales.

La recarga natural del acuífero ocurre por la -- infiltración en formaciones permeables de agua de lluvia. No toda el agua que se infiltra constituye la recarga del acuífero, sino que una parte es retenida por las formaciones que se encuentran arriba del nivel freático.

Las condiciones que determinan la velocidad y caudal de la recarga de aguas subterráneas debido a la precipitación, depende básicamente de la cuantía y distribución tanto en el espacio como en el tiempo de la misma precipitación, y de la facilidad de entrada del agua al subsuelo que está relacionada con las características de la formación, tipo de suelo, topografía, etc.

Las corrientes y almacenamientos superficiales también constituyen una fuente de recarga a los acuíferos, siempre y cuando el nivel del agua en ellos se encuentre arriba del nivel freático del acuífero, y exista entre el acuífero y la fuente de recarga un medio transmisor.

En áreas de cultivo puede existir una recarga a los acuíferos con los excedentes del agua de riego.

El acuífero puede también ser recargado artificialmente a través de obras construídas con ese fin como fosas de recarga, pozos, zanjas. (Figs. 8 y 9)

La descarga natural del acuífero puede ocurrir a través de manantiales, a lo largo de un cauce, por flujo hacia el mar o por evapotranspiración en zonas de niveles someros. La descarga artificial tiene lugar a través de captaciones de agua subterránea como pozos, norias y galerías. (Fig. 10)

El agua se mueve en el acuífero de las zonas de recarga hacia las de descarga siguiendo las trayectorias de menor resistencia y a una velocidad que depende de la permeabilidad del estrato y del gradiente hidráulico.

Los niveles freático y piezométrico oscilan continuamente respondiendo a las acciones de recarga y descarga del acuífero.

En conocimiento de los mecanismos de recarga y descarga de un acuífero, es indispensable para cuantificar su potencialidad y planear su extracción racional, y requiere de la observación concinua del comportamiento de los niveles de agua en pozos distribuídos en el área considerada.

DESCARGA DE LOS ACUIFEROS

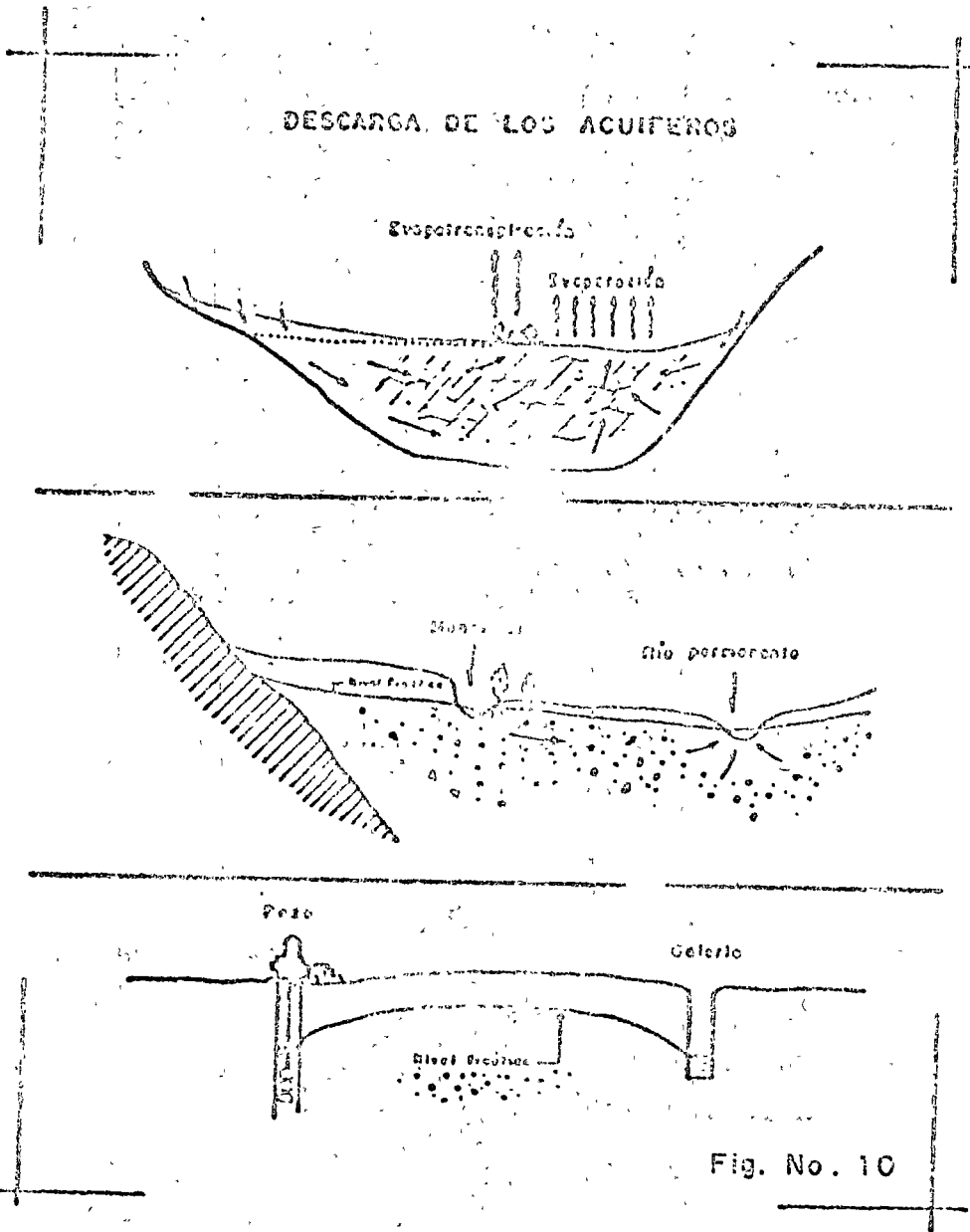
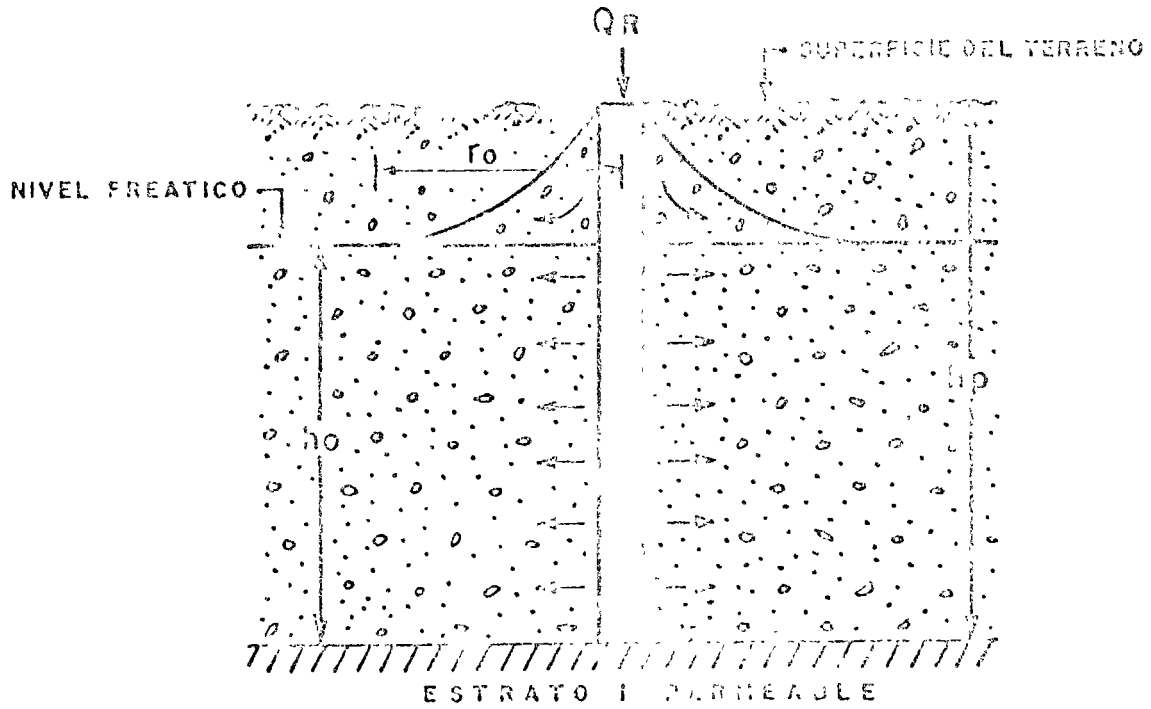
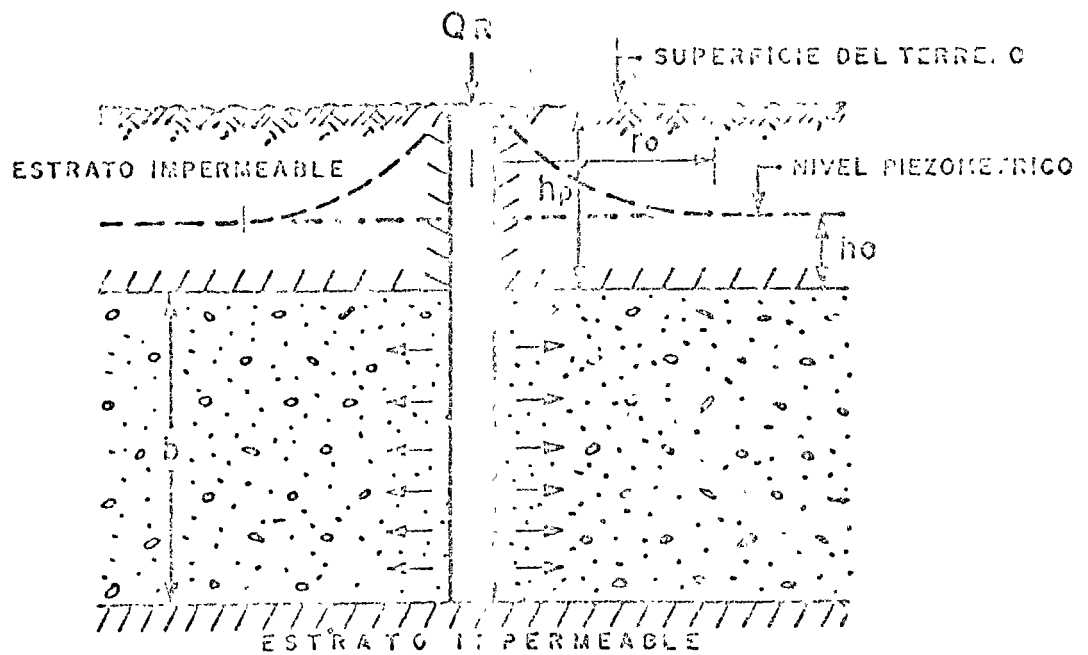


Fig. No. 10

# RECARGA ARTIFICIAL A TRAVES DE POZOS



a) CONDICIONES LIBRES



b) CONDICIONES CONFINADAS

# RECARGA DE LOS ACUIFEROS

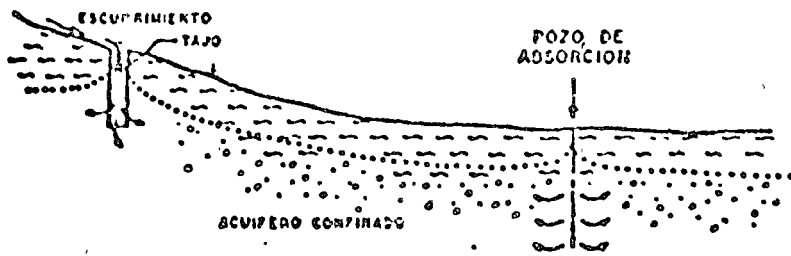
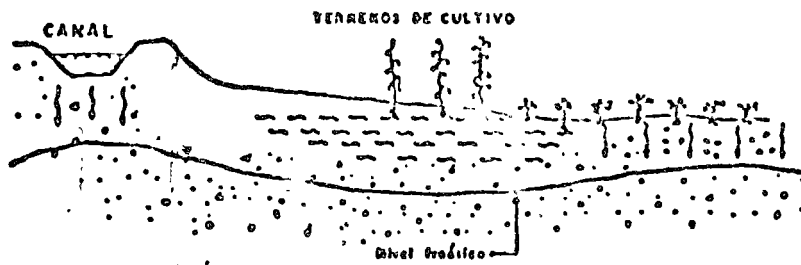
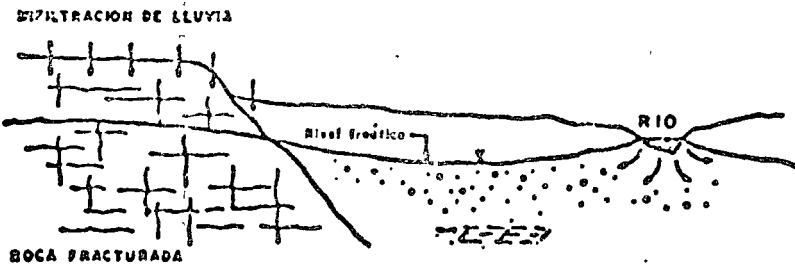


Fig. No. 8

REFERENCIAS

— GROUNDWATER RESOURCE EVALUATION

WALTON, ED.MC.GRAW-HILL

— CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

ALBERTO BENITEZ, ED.DOSSAT, S.A.

— FLUJO EN MEDIOS POROSOS

RUBEN CHAVEZ GUILLEN, BOLETIN No.1

DIVULGACION TECNICA, S.R.H.

— HIDROGEOLOGIA

DAVIS AND WIEST

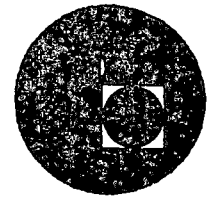
EDITORIAL ARIES

---

---



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



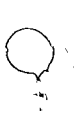
HIDROLOGIA SUBTERRANEA



ING. ALFONSO CAMARENA LARRIVA

JULIO DE 1976.

Handwritten text at the top of the page, possibly a title or header, including the word "Lecture".





# LA PROSPECCION GEOFISICA EN EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRANEA

POR: ING. ALFONSO CAMARENA LARRIVA.

## I.- INTRODUCCION.

La prospección Geofísica consiste en la realización de mediciones desde la superficie del suelo, encaminadas a suministrar información acerca de las propiedades físicas - de los materiales del sub-suelo. Esta información interpretada de forma adecuada puede utilizarse para localizar estructuras geológicas favorables donde se encuentre - - agua, hidrocarburos o minerales útiles.

Virtualmente en toda la exploración hecha para agua y petróleo, y en gran parte de las investigaciones geofísicas para otros minerales, el objetivo inmediato es el descubrir estructuras geológicas favorables, no el depósito o yacimiento.

Todas las técnicas Geofísicas que se emplean en la actualidad implican la medición desde la superficie de alguna propiedad física de las rocas del subsuelo. Las variaciones sistemáticas de estas propiedades a menudo proporcionan evidencia de estructuras o acumulaciones de minerales que tienen valor económico.

Dichas variaciones de propiedades físicas se designan con el nombre de "ANOMALIAS" son ellas más que el valor absoluto lo que interesa primordialmente al Geofísico. Mucha de la interpretación Geofísica se efectúa con el objeto - de determinar la geología subterránea mediante el análisis de las "ANOMALIAS".

## II.- CLASIFICACION DE LOS METODOS GEOFISICOS.

Existe una clasificación de los métodos geofísicos según que las propiedades físicas se manifiesten mediante la -- existencia de un campo de fuerzas natural como el campo - gravitatorio terrestre o el campo magnético, o bien, me-- diante la creación de un campo artificial como una pertur



ción elástica o un campo eléctrico generado en la superficie.

- |   |   |
|---|---|
| 1.- Los que utilizan campos de fuerzas naturales. | magnetométrico<br>radioactivo<br>termométrico<br>gravimétrico |
| 2.- Los que utilizan excitación artificial.       | eléctrico<br>sísmico.   |

### III.- MÉTODOS GEOFÍSICOS UTILIZADOS EN LA PROSPECCION PARA AGUA SUBTERRANEA.

Para el aprovechamiento racional del agua subterránea es necesario efectuar estudios que nos permitan conocer las características y comportamiento de las formaciones que se encuentran en el subsuelo.

Estos estudios, a medida que ha avanzado el tiempo, se han ido perfeccionando y enriqueciendo con el auxilio de otras ciencias, entre estas se encuentra la GEOFISICA. Los objetivos de esta ciencia encaminada al estudio y explotación del agua subterránea son:

- a).- Construir un mapa estructural del subsuelo.
- b).- Determinar los sitios y profundidades más favorables para la perforación de pozos.
- c).- En zonas costeras, delimitar la interfase salina.
- d).- Ayuda a determinar en forma cualitativa la calidad -- del agua.

Antes de efectuar un determinado estudio se hace una selección de los métodos geofísicos, esto es, se relacionan las características y propiedades de cada uno, con el objetivo a alcanzar y se deduce cuál o cuáles son los más convenientes para aplicar.

Aparte de las consideraciones prácticas y teóricas, las cuales son factores importantes para la elección del método, existe otro también decisivo, este es el económico. -

Tomando en cuenta lo anterior y con base en experiencias, se puede decir que los métodos considerados en primer término para la prospección del agua subterránea son:

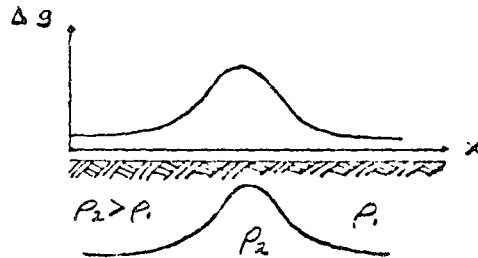
- Método Eléctrico Resistivo.
- Método Sísmico de Refracción.

Por supuesto, esto no excluye la posibilidad de utilizar otros métodos.

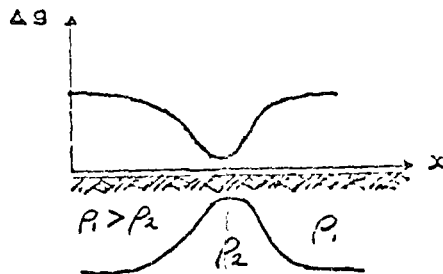
A continuación se hará una breve descripción de los métodos que suelen tener poca aplicación al estudio del agua subterránea, en cambio, los más aplicados serán estudiados con mayor detalle.

#### IV.- METODO GRAVIMETRICO.

El principio del método consiste en medir el valor del potencial de gravedad en diferentes lugares y sus variaciones en los alrededores inmediatos a éstos. Los diferentes tipos de rocas tienen densidades diferentes y las rocas más densas ejercen mayor atracción gravitacional, si las rocas más densas están arqueadas hacia arriba, formando una elevación estructural, tal como un anticlinal (Fig. IV.1).



el campo gravitatorio terrestre será mayor sobre el eje de la estructura que a lo largo de sus flancos. Por otra parte, un domo salino que es menos denso que las rocas en que está intrusionado, puede ser descubierto gracias a los bajos valores de la gravedad que normalmente son registrados sobre el mismo (Fig. IV.2).



Las anomalías de la gravedad buscadas en la exploración petrolífera pueden representar tan sólo una millonésima, y hasta una diezmillonésima, del campo total terrestre. Por esta razón, los instrumentos empleados han de ser extremadamente sensibles, y los gravímetros modernos permiten descubrir variaciones de la gravedad hasta de una cienmillonésima del campo terrestre.

#### V.- METODO MAGNETOMETRICO.

La prospección magnética determina las variaciones del campo magnético terrestre atribuibles a cambios de estructura, o de la susceptibilidad magnética de algunas rocas próximas a la superficie.

Las rocas sedimentarias presentan, en general, una susceptibilidad muy pequeña en comparación con las ígneas o metamórficas, y la mayoría de las exploraciones magnéticas están encaminadas a levantar el mapa de la estructura sobre o dentro del basamento, o a descubrir directamente minerales magnéticos.

Sucede con frecuencia que resulta difícil distinguir las anomalías magnéticas debidas a la topografía del basamento con las que son consecuencia de cambios laterales en la composición de la roca del basamento, y esta ambigüedad limita la eficacia del método.

#### VI.- METODO RADIOACTIVO.

Se entiende por radioactividad la desintegración de un núcleo atómico con emisión de energía y de partículas materiales, proceso que tiene lugar espontáneamente en algunas sustancias radioactivas naturales. Se observan tres tipos de radiación: rayos alfa, beta y gamma y la prospección geofísica de minerales radioactivos está basada en la detección de estas radiaciones por medios físicos.

La búsqueda geofísica de elementos radioactivos en la corteza es primordialmente una búsqueda de lugares con radiación  $\gamma$  anormal. Sin embargo, no todos los elementos radioactivos emiten rayos  $\gamma$  y sus yacimientos no pueden ser localizados a menos que un elemento "hijo" presente en el yacimiento emita dichos rayos. Así el uranio se detecta indirectamente por la radiación  $\gamma$  emitida por una o más de sus productos, en especial el radio.

La localización de elementos radioactivos no es la única aplicación de los métodos radioactivos. Puesto que todas las rocas, tanto ígneas como sedimentarias, contienen trazas de elementos radioactivos, estos métodos pueden utilizarse también para Cartografía Geológica, con tal que las diferentes rocas, estratos o facies tengan radioactividades diferentes.

En la exploración se utilizan aparatos tales como el contador Geiger Muller, Medidores de Centelleo, espectrógrafo de masas, etc.

#### VII.- METODO TERMOMETRICO.

La termometría consiste en descubrir, por medio de medidas de temperatura a poca profundidad, formaciones geológicas de características especiales a zonas de anomalías de flujo interno.

Se utiliza la noción de gradiente vertical y de grado geotérmico.

El gradiente vertical en el interior de un terreno es el coeficiente de la diferencia de temperaturas por la diferencia de profundidad.

$$\text{grad} = \frac{\theta_B - \theta_A}{h_B - h_A}$$

El grado geotérmico es la cantidad de metros (o cms.) que se debe aumentar la profundidad para que la temperatura aumente 1 grado.

La temperatura del suelo es función del calentamiento solar, de las características térmicas de las formaciones geológicas y del flujo proveniente del interior de la tierra que se debe a la radioactividad interna.

Desde el punto de vista térmico, cada substancia se caracteriza por dos parámetros: calor específico y conductividad térmica, los cuales permiten definir acuíferos de poca profundidad.

El calor específico es la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de la substancia para que su tem-

peratura aumente 1°C. El valor específico de la mayoría de las formaciones geológicas secas es de 0.2-0.3, mientras que el del agua es 1. Por este motivo, los acuíferos situados a poca profundidad se calientan y enfrían más lentamente con el paso de las estaciones que las formaciones impermeables.

La conductividad térmica expresa la aptitud para propagar el calor recibido. La conductividad de las rocas muy porosas aumenta considerablemente cuando están saturadas de agua, dado que la conductividad térmica del agua es de 0.0014 cal/cm.seg °C, mientras que la del aire es solo 0.00006. La conductividad térmica varía muy poco de unas a otras, sólo las arcillas se diferencian de las restantes rocas por su menor conductividad.

Antes de interpretar las medidas termométricas obtenidas en el campo, es necesario realizar las correcciones correspondientes, según la profundidad donde se hizo la lectura. En la práctica, se utilizan por lo menos 2 series de medidas en épocas diferentes del año con el fin de superponer los diagramas obtenidos y observar las diferencias de temperatura.

#### VIII.- MÉTODOS SISMICOS.

La propiedad física fundamental en que se basa la exploración por los métodos sísmicos, es la velocidad de transmisión de las ondas elásticas en diferentes formaciones geológicas.

La velocidad de transmisión de las ondas elásticas depende de las propiedades físicas del medio transmisor.

Las fórmulas matemáticas que expresan la velocidad de transmisión en términos de las constantes elásticas del medio son:

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}}$$

Donde  $\lambda, \mu$  son los coeficientes de Lamé, siendo  $\mu$  el coeficiente de rigidez.

$E$  = Modulo de Young.

$\sigma$  = Constante de Poisson.

$V_L$  = Velocidad de las ondas longitudinales.

$V_T$  = Velocidad de las ondas transversales.

$\rho$  = Densidad del material.

La velocidad de las ondas transversales es aproximadamente el 57% de la correspondiente velocidad longitudinal.

En sismología se conocen varios tipos de ondas, pero en exploración hasta ahora solamente se aprovecha la onda longitudinal, la cual es la onda de compresión en la dirección de propagación.

La velocidad de transmisión de las ondas elásticas en términos geológicos depende en mayor grado de la compacidad y del estado de consolidación de la formación. Así las arenas, lutitas y margas transmiten las ondas con velocidades intermedias, mientras que las calizas, sal gema, esquistos, gneiss, rocas ígneas; con velocidades mucho más altas. En rellenos no consolidados la velocidad de propagación crece con el grado de saturación y por tanto es mayor bajo el nivel freático que arriba de él.

La tabla VIII.1, muestra los diferentes rangos de velocidad para diferentes formaciones.

<u>F o r m a c i ó n</u>	<u>Velocidad Km/s</u>	
Aire	0.33	
Agua dulce	1.45	
Limos	0.2	0.6
Capa superficial no consolidada y seca	0.2	0.6
Aluviones secos	0.6	1.2
Aluviones saturados	1.6	2.4
Arcillas	0.9	1.8
Tobas	1.8	2.5
Margas, creta	2	3
Lavas	2.5	4
Calizas y Dolomías	3	5



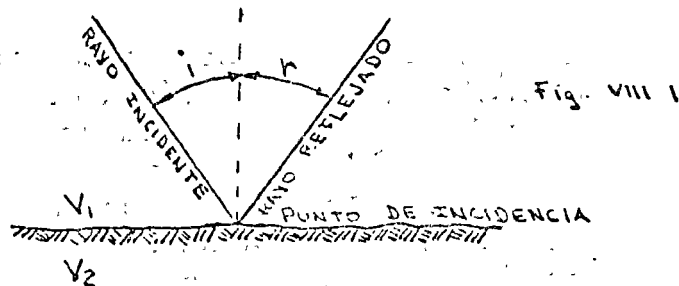
<u>Formación</u>	<u>Velocidad Km/s</u>	
Esquistos, micoesquistos	3	4.5
Gneiss, Cuarcitas	3	5.5
Granitos	4	6

VIII.1).- LEYES DE LA OPTICA GEOMETRICA EN SISMOLOGIA.

Para fines prácticos, las leyes de propagación de las ondas elásticas son idénticas a las leyes de la optica geométrica, siendo raras las ocasiones en que es necesario recurrir a la teoría de propagación de las ondas elásticas.

Las leyes de la optica geométrica que rigen la propagación de las ondas elásticas son:

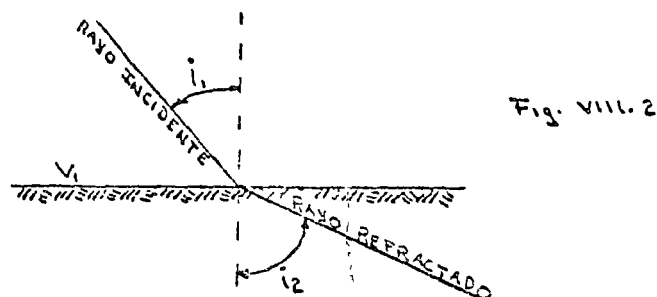
Ley de reflexión.- El ángulo de reflexión está en el plano de incidencia (el cual queda definido por el rayo incidente y la normal N a la superficie en el punto de incidencia), y es igual al ángulo de incidencia Fig. VIII.1.



Ley de Refracción.- El ángulo de refracción está en el plano de incidencia y es:

$$\text{sen } i_1 / \text{sen } i_2 = V_1 / V_2$$

Donde  $V_1$  es la velocidad de propagación de la onda elástica en el primer medio, y  $V_2$  es la velocidad en el segundo medio Fig. VIII.2.



Principio de Huyghens.- Las leyes mencionadas se pueden deducir del principio de Huyghens que dice: "Todo punto de una onda puede considerarse como centro de excitación de nuevas ondas. La superficie envolvente común de estas ondas elementales representa la onda real o principal.

Principio de Fermat.- Las leyes de reflexión y refracción pueden deducirse también del principio de Fermat que dice: "Todo rayo luminoso se propaga de manera que el tiempo empleado en recorrer el camino sea mínimo".

#### VIII.2).- PRODUCCION, DETECCION Y REGISTRO DE LAS ONDAS SISMICAS.

La forma más comunmente empleada para la producción de ondas sísmicas es la explosión de cargas de dinamita. Tiene la ventaja de que siempre puede alcanzarse la energía requerida si se emplea la cantidad necesaria de explosivo. Sin embargo, para profundidades de estudio pequeñas, como las requeridas en algunas aplicaciones de Ingeniería Civil, la producción de las ondas sísmicas por medio de martillo resulta muy adecuada.

Las ondas sísmicas son detectadas por medio de geófonos entre los cuales los tipos más usados son los electromagnéticos. Una bobina unida a un cuadro está colocada entre los polos de un imán, que a su vez, está suspendido por muelles de lámina. El cuadro está unido firmemente con una caja hermética provista de un clavo o lámina para introducir el geófono en el suelo. La bobina se mueve con el terreno, mientras que el imán permanece virtualmente estacionario a causa de su gran inercia, y el movimiento relativo de los dos produce una tensión eléctrica oscilante. La tensión producida por el geófono es amplificada y filtrada de manera que sólo pasen las frecuencias deseadas, las cuales son transmitidas a un registrador, donde hace oscilar un diminuto galvanómetro. Este tiene un espejo que envía un rayo luminoso sobre una banda fotográfica enrollada sobre un tambor giratorio, con lo que se completa el registro de las ondas sísmicas.

Los registros sísmicos llevan también líneas de tiempo, de modo que las "llegadas" debidas a reflexiones y refracciones puedan fijarse con precisión (dentro de unos pocos milisegundos).

IX.- METODO DE REFLEXION SISMICA.

El método de reflexión sísmica es el que aporta un cuadro más directo y detallado de la estructura geológica del sub-suelo. Con los datos que proporcionan es posible hallar las profundidades a que se encuentran las superficies de contacto enterradas, con una exactitud que sólo es mejorada por las medidas efectuadas en pozos.

Las profundidades se determinan observando los tiempos de recorrido de ondas elásticas originadas cerca de la superficie y reflejadas hasta ésta por las formaciones subterráneas.

IX.1).- GEOMETRIA DE LAS TRAYECTORIAS DE REFLEXION EN SUPERFICIE DE SEPARACION HORIZONTAL.

Cuando una onda es producida por una explosión de dinamita, justo por debajo de la superficie del suelo, cada superficie de separación que represente un cambio en las propiedades elásticas reflejan hacia la superficie parte de la energía, y un detector situado en ésta responderá a la llegada de cada onda reflejada, utilizándose el tiempo empleado en el recorrido completo, desde el punto de explosión al detector, para calcular la profundidad a que se encuentra el horizonte reflectante. Para hacer este cálculo es necesario conocer la velocidad de las ondas sísmicas en todos los puntos del perfil. De haber un cambio continuo de la velocidad con la profundidad, las trayectorias de las diversas ondas captadas por una sola estación detectora serán curvas, como se ve en la Fig. IX.1.1.

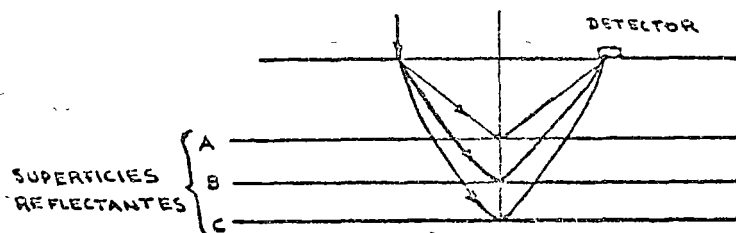


Fig. IX.1.1

Si la velocidad tiene en todo el perfil el valor constante --  $V$ , la onda reflejada por una capa horizontal situada a la profundidad  $Z$  con respecto al detector, y a una distancia  $X$  del punto de explosión, se desplazara siguiendo las dos líneas rectas representadas en la Fig. VIII.1.2

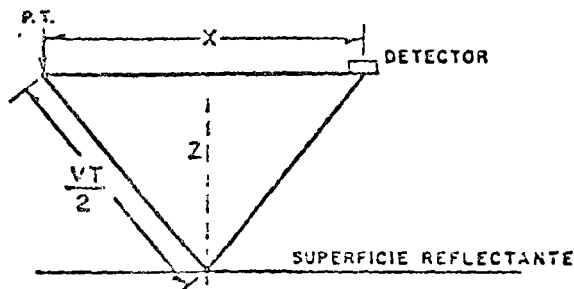


Fig. VIII.1.2

La longitud  $L$  de la trayectoria de onda, desde el punto de explosión hasta el detector, pasando por la superficie del reflectante es:

$$L = 2 \sqrt{Z^2 + \left(\frac{X}{2}\right)^2} = \bar{V} T \text{-----} (1)$$

en donde  $T$  es el tiempo total recorrido. Despejando  $T$ , se obtiene:

$$T = \frac{2}{\bar{V}} \sqrt{Z^2 + \left(\frac{X}{2}\right)^2} \text{-----} (2)$$

La profundidad a que se encuentra el horizonte reflectante se obtiene, a base del tiempo, distancia horizontal y velocidad media, por la ecuación.

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{(\bar{V} T)^2 - X^2} \text{-----} (3).$$

La velocidad media se puede calcular por:

- A) Determinación de Pozos de Sondeo
- B) Por medio del método sísmico de refracción.

IX.2).- REFLEXION EN SUPERFICIES DE SEPARACION INCLINADA.

La formula (2) no es válida para capas inclinadas. Para obtener la expresión del tiempo de reflejo cuando la capa no es horizontal, nos referimos a la fig. VIII.2.1.

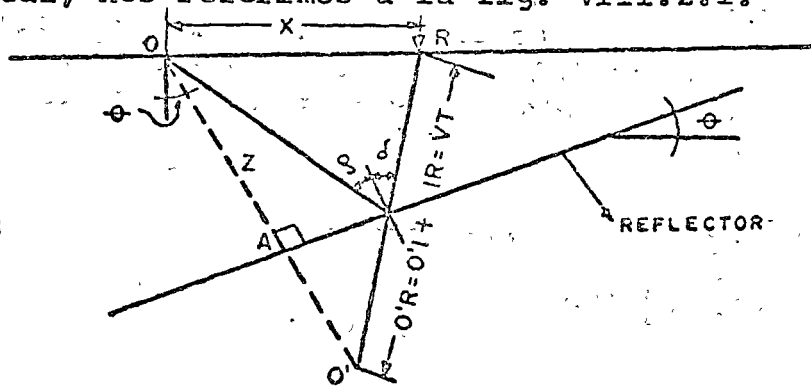


Fig. VIII.2.1

Variables  
t, x

Constantes  
z, phi, v

$$\overline{O'R^2} = \overline{OO'^2} + \overline{OR^2} - 2 \overline{OO'} \overline{OR} \cos \theta$$

$$V^2 T^2 = 4Z^2 + X^2 - 4ZX \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)$$

$$V^2 T^2 = 4Z^2 + X^2 - 4ZX \text{ SEN } \theta$$

$$T = \frac{1}{V} \sqrt{4Z^2 + X^2 - 4ZX \text{ SEN } \theta} \quad \text{Tiro Subido}$$

De forma análoga se calcula para tiro de bajada y de obtiene.

$$T = \frac{1}{V} \sqrt{4Z^2 + X^2 + 4ZX \text{ SEN } \theta}$$

X.- METODO SISMICO DE REFRACCION

En este método los instrumentos detectores se disponen a cierta distancia del punto de explosión, que es larga en comparación con la profundidad a que se encuentre el horizonte que haya de ser marcado en el mapa. Las ondas explosivas recorren grandes distancias horizontales a través del suelo, y el tiempo requerido para su desplazamiento informa acerca de la velocidad y profundidad de ciertas formaciones del subsuelo.

El método de refracción conserva ciertas ventajas que el de reflexión no puede reivindicar; en una zona donde se disponga de datos relativos a la geología del subsuelo, la exploración por reflexión, que solo da a conocer la geometría de las formaciones subterráneas, no facilita datos acerca de la composición de las rocas subyacentes. La investigación por refracción, por otra parte, al suministrar datos acerca de las velocidades sísmicas en las diversas formaciones, así como de su geometría, hace posible intentar la identificación de los materiales rocosos que hayan de ser cartografiados.

### IX.1. LEY DE REFRACCION

El ángulo de refracción está en el plano de incidencia y es:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = V_1 / V_2$$

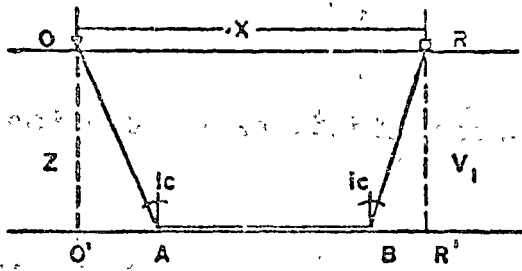
donde  $V_1$  es la velocidad de propagación de la onda elástica en el primer medio, y  $V_2$  es la velocidad en el segundo medio.

Esta ley se conoce con el nombre de ley de Snellius. En el caso general, el rayo iniciado en un punto de origen, al llegar a la superficie de contacto que separa los dos medios, producirá tanto un rayo reflejado como un rayo refractado en el punto de incidencia. El rayo reflejado vuelve al primer medio, formando el ángulo  $r = i$  con la normal. El rayo refractado penetra al segundo medio formando un ángulo  $i_2$  con la normal. Este ángulo depende del ángulo de incidencia  $i_1$ , y de la relación de velocidades de ambos medios según la ley de Snellius. Si el ángulo  $i_1$  es mayor que un cierto ángulo crítico es decir, tal que el ángulo  $i_2$  resulta mayor de  $90^\circ$ , entonces no se produce la refracción y toda la energía es reflejada. Si el ángulo de incidencia es tal que el ángulo refractado es igual a  $90^\circ$ , el rayo refractado viaja por la superficie del segundo medio. El ángulo de incidencia que produce el ángulo de refracción, igual a  $90^\circ$ , se llama ángulo crítico de incidencia y tiene mucha importancia en las interpretaciones del método de refracción.

### IX.2. RELACIONES TIEMPO DISTANCIA PARA CAPAS HORIZONTALES

Considerese un perfil sísmico el cual se realiza una explosión y a unas distancias crecientes se ubican los detectores.

El tiempo de la onda refractada sería:



Condición  $V_2 > V_1$

$$\text{Sen } ic = \frac{V_1}{V_2}$$

$$t_{OABR} = \frac{OA}{V_1} + \frac{AB}{V_2} + \frac{BR}{V_1}$$

$$OA = BR = Z \text{ sec } ic$$

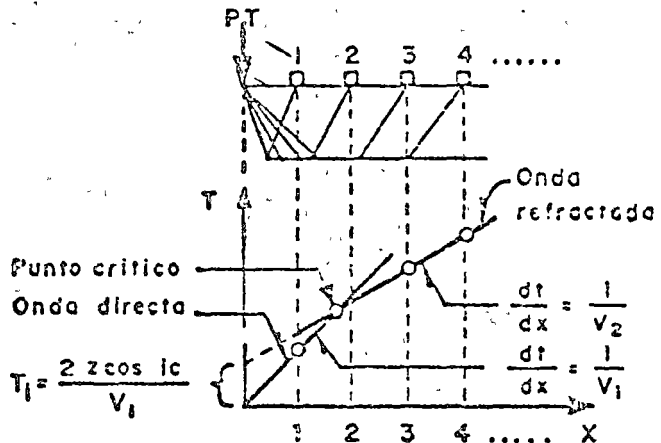
$$AB = OR - OA - BR = x - Z \text{ tan } ic - Z \text{ tan } ic = x - 2Z \text{ tan } ic$$

$$t = \frac{Z \text{ sec } ic}{V_1} + \frac{x - 2Z \text{ tan } ic}{V_2} + \frac{Z \text{ sec } ic}{V_1}$$

$$t = \frac{x}{V_2} + 2Z \left( \frac{1}{V_1} \text{ Sec } ic - \frac{1}{V_2} \text{ tan } ic \right)$$

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z}{V_1 \cos ic} (1 - \text{sen}^2 ic) \quad \therefore \quad t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z \cos ic}{V_1}$$

En coordenadas rectangulares, se gráficán en las abscisas, los espaciamentos de los detectores y en las ordenadas los tiempos. Esta gráfica se denomina de tiempo-distancia ó solo T-X (fig. X.2.1)



$$T_{\text{onda directa}} = \frac{x}{V_1}$$

$$T_{\text{onda refractada}} = \frac{x}{V_2} + \frac{2z \cos ic}{V_1}$$

A partir de la gráfica podemos determinar las velocidades y la profundidad del horizonte refractor.

Las velocidades las determinamos con el recíproco de la pendiente.

La profundidad  $Z$ , se puede deducir a partir del tiempo de intercepción

$$\text{Tenemos: } T_i = \frac{2Z \cos ic}{V_1} \quad \therefore \quad Z = \frac{V_1 T_i}{2 \cos ic}$$

$$\text{Como } \text{sen } ic = \frac{V_1}{V_2} \quad \Rightarrow \quad \cos ic = \sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}} \quad \therefore$$

$$Z = \frac{V_1 T_i}{2}$$

otra forma de determinar la profundidad, es en función de la distancia crítica.

Distancia Crítica.- A una distancia  $X_c$  (vease Fig. 1X2.1 los dos segmentos se cortan; a distancias menores que ésta, la onda directa que se propaga siguiendo la parte superior de la capa de velocidad  $V_1$  es la primera en llegar al detector. A distancias mayores, la onda refractada en la superficie de separación llega antes que la onda directa. Por esta razón,  $X_c$  es denominada distancia crítica.

El tiempo empleado por la onda directa, es el mismo que el de la onda refractada en el punto crítico i.e., a la distancia crítica.

$$\frac{X_c}{V_1} = \frac{X_c}{V_2} + \frac{2Z \cos i_c}{V_1} \quad ; \quad X_c \left( \frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right) = \frac{2Z}{V_1} \sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}}$$

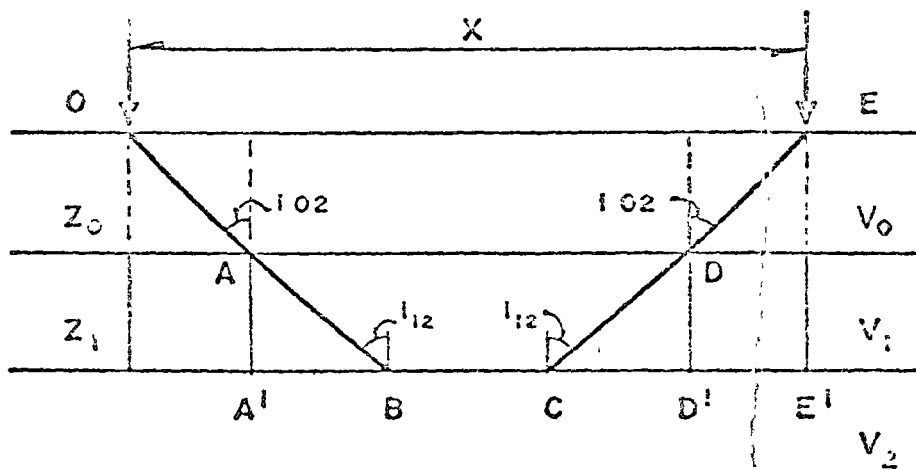
Despejando  $Z$ :

$$Z = \frac{X_c}{2} \frac{1 - \frac{V_1}{V_2}}{\sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}}} \quad \text{Multiplicando por } V_2$$

$$Z = \frac{X_c}{2} \frac{V_2 - V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad \therefore \quad Z = \frac{X_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

### CASO DE 3 CAPAS

Para calcular el tiempo de la onda refractada en el caso de 3 capas, se procede de manera similar, al problema de 2.



condición  $V_2 > V_1 > V_0$



$$\frac{\text{Sen } i_{02}}{V_0} = \frac{\text{Sen } i_{12}}{V_1} = \frac{1}{V_2} \left\{ \begin{array}{l} \text{Sen } i_{02} = \frac{V_0}{V_2} \\ \text{Sen } i_{12} = \frac{V_1}{V_2} \end{array} \right.$$

$$t = \frac{\overline{OA}}{V_0} + \frac{\overline{AB}}{V_1} + \frac{\overline{BC}}{V_2} + \frac{\overline{CD}}{V_1} + \frac{\overline{DE}}{V_0} \quad \text{y sabiendo que:}$$

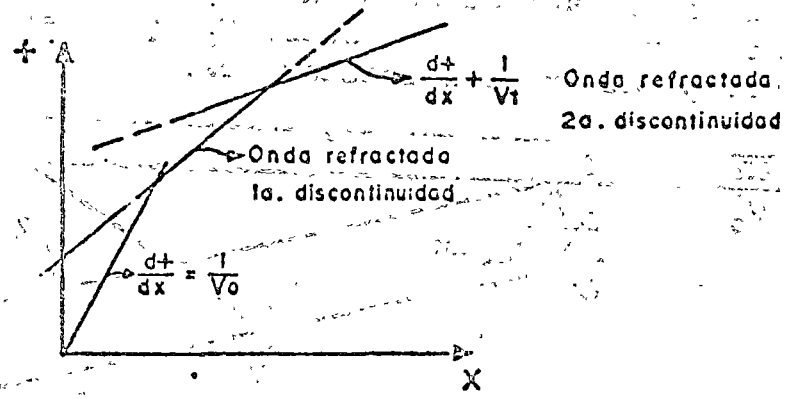
$$\overline{OA} = \overline{DE} = Z_0 \text{ Sec } i_{02}$$

$$\overline{AB} = \overline{CD} = Z_1 \text{ Sec } i_{12}$$

$$\overline{BC} = X - 2Z_0 \tan i_{02} - 2Z_1 \tan i_{12}; \quad \text{Se puede llegar a:}$$

$$t = \frac{X}{V_2} + \frac{2Z_0 \text{ Cos } i_{02}}{V_0} + \frac{2Z_1 \text{ Cos } i_{12}}{V_1}$$

La gráfica tiempo-distancia sería:



- (1)  $t$  onda directa =  $\frac{X}{V_0}$
- (2)  $t$  1a. discontinuidad =  $\frac{X}{V_1} + \frac{2Z_0 \text{ Cos } i_{02}}{V_0}$
- (3)  $t$  2a. discontinuidad =  $\frac{X}{V_2} + \frac{2Z_0 \text{ Cos } i_{02}}{V_0} + \frac{2Z_1 \text{ Cos } i_{12}}{V_1}$

X.3-.) CASO DE CAPAS INCLINADAS.

Cuando las capas no son horizontales ni paralelas a la superficie, sino que buzan de una manera cualquiera, las fórmulas anteriores ya no son aplicables. La gráfica T-X, ya no permanece igual de un lugar a otro, porque el tiempo de propagación no depende tan sólo de la distancia de tiro -- sino también de la localización del punto de tiro y del detector respecto de un sistema de coordenadas fija sobre la superficie.

Si el perfil se tira pendiente-abajo (es decir, en el sentido del echado) por ejemplo, la línea de velocidad de la segunda capa ya no representa la velocidad verdadera de esta capa, sino una velocidad aparente más baja que la verdadera, porque a medida en el receptor se aleja del punto de tiro el espesor de la capa superyacente crece y el tiempo del rayo emergente aumenta. De la misma manera, si se tira pendiente arriba (en el sentido contrario del echado), la velocidad aparente aparece más alta que la velocidad verdadera.

Para la determinación de la profundidad de la segunda capa y el ángulo de su pendiente, se requiere el conocimiento de las dos velocidades aparentes. Por consiguiente es necesario tirar el perfil en ambos sentidos.

A.3.1.- FORMULA PARA LA DETERMINACION DEL ECHADO Y DE LA VELOCIDAD DE UNA CAPA INCLINADA.

En el caso de un solo cantaco de pendiente uniforme que separa dos capas de velocidades constantes,  $V_0$  y  $V_1$  siendo  $V_1 > V_0$ , el tiempo del rayo refractado es:

$$t = \frac{\overline{OA}}{V_0} + \frac{\overline{AB}}{V_1} + \frac{\overline{BR}}{V_0}$$

Sabiendo que :

$$\overline{OA} = Z_0 \operatorname{Sec} \theta$$

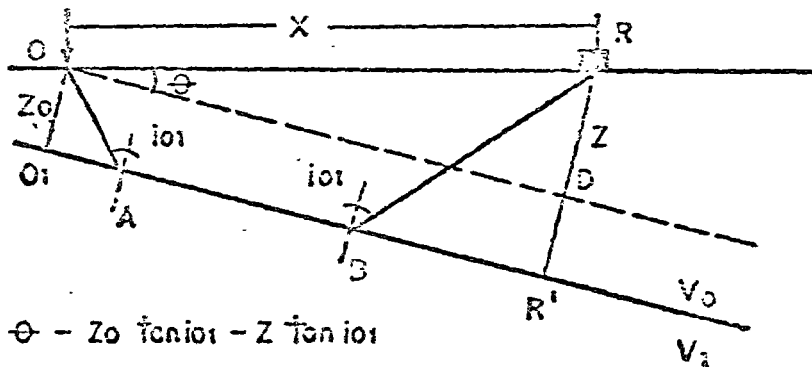
$$\overline{O'R'} = X \cdot \operatorname{Cos} \theta$$

$$\overline{AB} = \overline{O'R'} - \overline{O'A'} - \overline{BR'} = X \operatorname{Cos} \theta - Z_0 \tan \theta - Z \tan \theta$$

$$\overline{BR} = Z \operatorname{Sec} \theta$$

$$\overline{O'A'} = Z_0 \tan \theta$$

$$\overline{BR'} = Z \tan \theta$$



Se puede llegar a la ec. del tiempo que es:

$$t_b = \frac{2Z_0 \operatorname{Cos} \theta_1}{V_0} + \frac{X}{V_1} \frac{\operatorname{sen} (\theta_1 + \theta)}{\operatorname{Sen} \theta_1} \quad (1)$$

Si la dirección del tiro es en el sentido contrario del echado se tiene:

$$t_b = \frac{2Z \operatorname{Cos} \theta_1}{V_0} + \frac{X}{V_1} \frac{\operatorname{sen} (\theta_1 - \theta)}{\operatorname{Sen} \theta_1} \quad (2)$$

Diferenciando las ecuaciones (1 & 2) y sacando el recíproco obtenemos dos velocidades aparentes:

$U_s$  representando la velocidad aparente al tirar pendientes -- arriba (contra el echado) y  $U_b$  la velocidad aparente al tirar pendiente abajo (en el sentido del echado).

$$U_s = \frac{V_1 \text{ Sen } i_{o_1}}{\text{Sen}(i_{o_1} - \theta)} = \frac{V_o}{\text{Sen}(i_{o_1} - \theta)} \quad (3)$$

$$U_b = \frac{V_1 \text{ Sen } i_{o_1}}{\text{Sen}(i_{o_1} + \theta)} = \frac{V_o}{\text{Sen}(i_{o_1} + \theta)} \quad (4)$$

De las esc. 3 y 4 se puede calcular la pendiente y la velocidad.

$$\alpha = \frac{1}{2} (\text{Sen}^{-1} \frac{V_o}{U_b} - \text{Sen}^{-1} \frac{V_o}{U_s}) \quad (5) \quad i_{o_1} = \frac{1}{2} (\text{Sen}^{-1} \frac{V_o}{U_b} + \text{Sen}^{-1} \frac{V_o}{U_s}) \quad (6)$$

La velocidad verdadera de la segunda capa no es promedio aritmético de las dos velocidades aparentes, sino:

$$V_1 = 2 \text{ Cos } \alpha \cdot \frac{U_s U_b}{U_s + U_b} = \frac{V_o}{\text{Sen } i_{o_1}} \quad (7)$$

X.4). -COMENTARIOS :

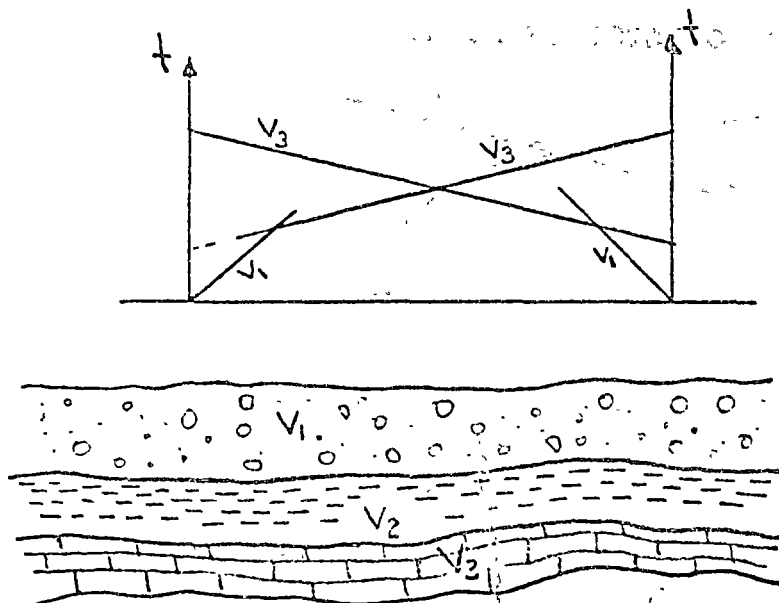
Se vió que la condición para que exista una refracción es:

$$V_1/V_2 < 1 \quad \text{ó} \quad V_2 > V_1$$

Considérese el caso de tres capas donde:

$$V_2 < V_1 < V_3$$

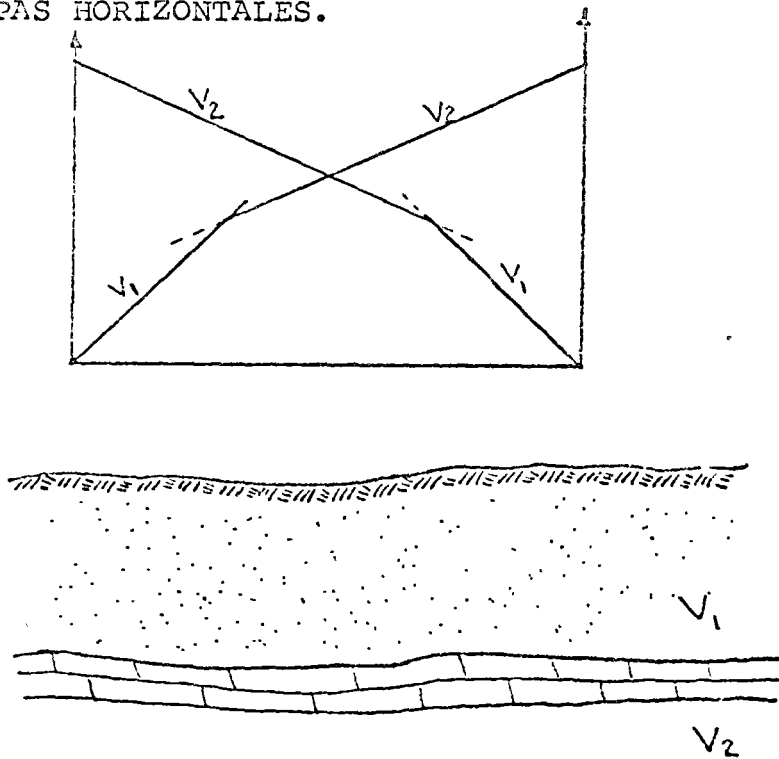
Como el caso de una intercalación de arcilla entre gravas y calizas. El análisis de la gráfica T-X (Fig. V.5.1), muestra -- que la velocidad ( $V_2$ ) de la segunda capa no aparece y que el comportamiento de la gráfica es como si únicamente existieran dos capas.



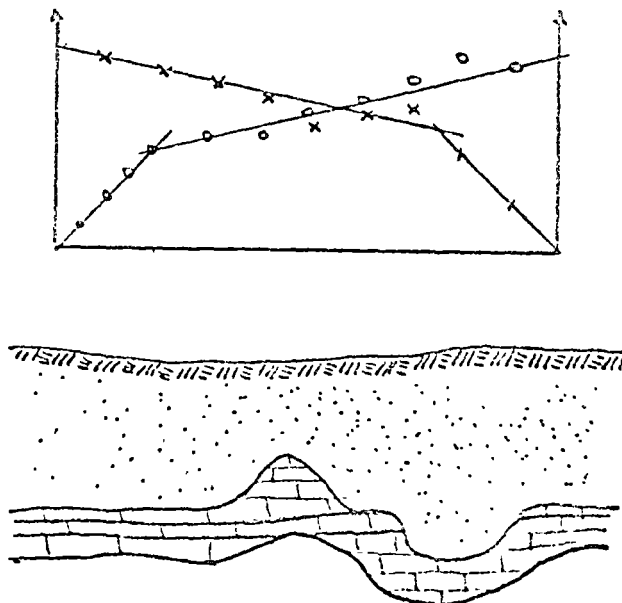
Este caso nos señala la limitante del método. Sin embargo, en condiciones donde la velocidad de propagación de los diferentes estratos aumenta con la profundidad, el método sísmico de refracción nos definirá los contactos con mayor exactitud que el método eléctrico resistivo.

A continuación se ilustra el comportamiento de algunas gráficas tiempo-distancia, para diferentes condiciones del subsuelo, en perfiles tirados en ambos sentidos.

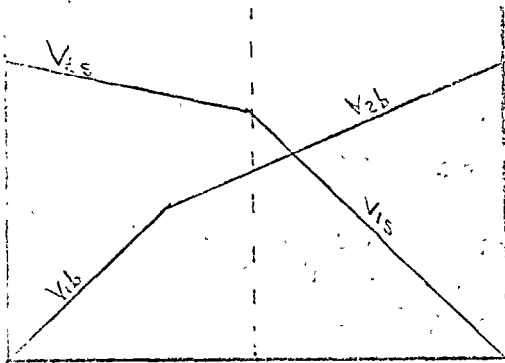
- CAPAS HORIZONTALES.



- PUNTOS BAJOS O ALTOS DE ROCA.

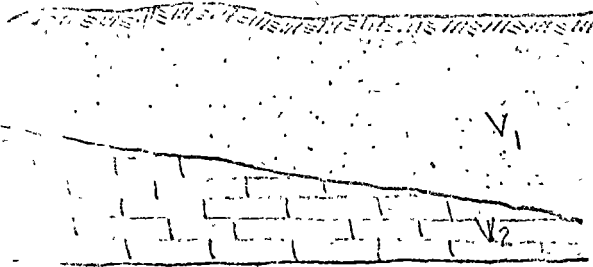


- CAPAS INCLINADAS.

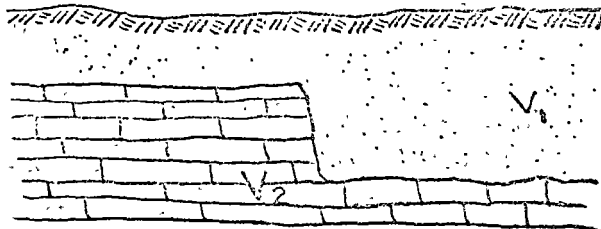
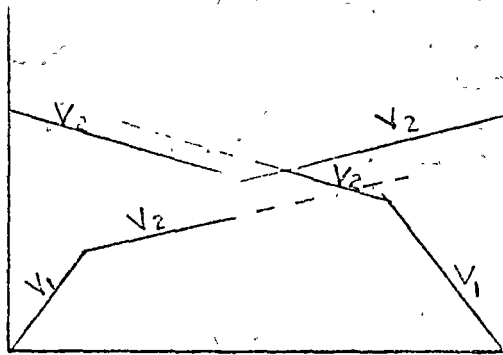


$V_b$  = Velocidad, pendiente abajo.

$V_s$  = Velocidad pendiente arriba.



- CAPA ESCALONADA.



Este método se basa en la propiedad que tienen las rocas de conducir una corriente eléctrica.

La conductividad de una roca depende cuatro factores:

- Porosidad
- Constitución mineralógica
- Grado de Saturación
- La conductividad del agua que contiene.

La resistividad ( $\rho$ ) es la inversa de la conductividad ( $c$ ):  $\rho = \frac{1}{c}$ , por lo que los factores que intervienen en la conductividad, están ligados también a la resistividad.

### XI.1).- ELECTRODOS

Se define como electrodos, a las "barras metálicas" con las cuales se hace contacto con el terreno.

Los electrodos de corriente, A y B, Fig. X.1.1 (mediante los cuales introducimos la corriente al terreno) pueden consistir en barras de acero inoxidable, de unos 70 cm, de largo., con algun medio (como cclip de batería) para conectar el extremo desnudo del cable que va a la fuente de energía.

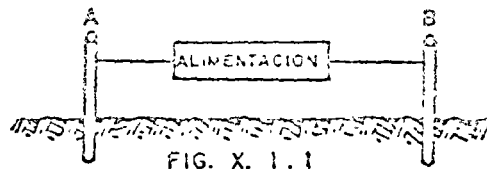


FIG. X. 1. 1

Los electrodos de potencial, M y N, (barras mediante las cuales se registran la diferencia de Potencial) a veces llamados "Sondas" pueden estar constituidas también por varillas de acero inoxidable o cobre (Fig. X.1.2)

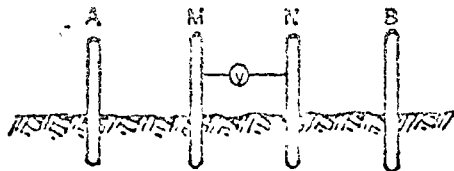


FIG. X. 1. 2

### XI.2).- POTENCIAL ELECTRICO.

Para la comprensión adecuada de los métodos de resistividad es necesario tener una idea acerca del potencial producido sobre un terreno homogéneo por un sistema dado de electrodos. El electrodo más sencillo es el constituido por un solo punto, lo que puede aproximarse en la práctica por una barra metálica de diametro pequeño.

A continuación se demuestra que si I es la corriente que pasa a través de un electrodo puntual colocado sobre la superficie de un terreno "semi-infinito" de resistividad  $\rho$ , el potencial eléctrico en un punto P que dista r del electrodo es

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

Se supone un medio isótropo, homogéneo y un electrodo "A" conduciendo la corriente en este medio fig. X.2.1.

En un punto "P", se tiene un elemento del medio,  $ds$ , a una distancia  $r$  y  $dr$  del punto "A".

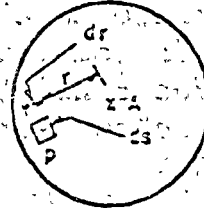


FIG. X.2.1

con  $r$  &  $(r+dr)$  se trazan dos esferas y suponemos  $\rho$  la resistividad del elemento del medio  $ds$ .

Si la resistencia eléctrica de la capa es  $dR$ , según la ley de Ohm la diferencia de potencia a través de la capa será - - -

$$IdR = dv \dots (1)$$

Sabemos que:  $R = \rho \frac{L}{S}$

$S, L$  = superficie y longitud del conductor

$$dR = \rho \frac{dr}{ds}$$

para la esfera del radio  $r$ , la superficie es:

$$4\pi r^2, \dots$$

$$dR = \rho \frac{dr}{4\pi r^2}$$

por lo ec. 1 tenemos:

$$dv = - \frac{I\rho}{4\pi} \frac{dr}{r^2} \quad \int_v^{\infty} dv = - \int_r^{\infty} \frac{I\rho}{4\pi} \frac{dr}{r^2} = - \frac{I\rho}{4\pi} \left[ -\frac{1}{r} \right]_r^{\infty} = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{r}$$

Si se supone que el potencial en el infinito es cero y como es solamente la semiesfera la que nos interesa, el potencial en el punto A es:

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

A partir de la ecuación anterior se obtiene la Expresión General Para la obtención de la resistividad la cual es;

$$\rho = 2\pi K \frac{\Delta V}{I}$$

A  $K$  se le llama factor geométrico y depende de la posición de los electrodos. Para determinarlo tenemos:

$$K = \frac{1}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)}$$

XI.3) CONFIGURACIONES ELECTRODICAS EN LOS METODOS DE RESISTIVIDAD

En la prospección eléctrica se ha propuesto y empleado gran número de configuraciones electródicas diferentes. Se supone que todos los electrodos pueden considerarse como puntuales, tales como los que consisten en clavos o barras metálicas, o en polígonos pequeños hechos de hilo de cobre desnudo y adheridos al terreno.

Desde el punto de vista del trabajo de campo habitual, sólo son importantes los dispositivos rectilíneos como los que se describen adelante, pero también podrían emplearse configuraciones cuadradas o rectangulares, con los electrodos en los cuatro vértices. No obstante, el trabajo de campo con tales configuraciones sería engorroso.

Las características especiales de las diferentes configuraciones se exponen brevemente a continuación:

XI.3.1) Dispositivo Wenner.- En este dispositivo, los cuatro electrodos se colocan equidistantes de manera que se obtenga  $a_1 = a_2 = a_3 = a$  (Fig. X.3.1). La resistividad se obtiene por:

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

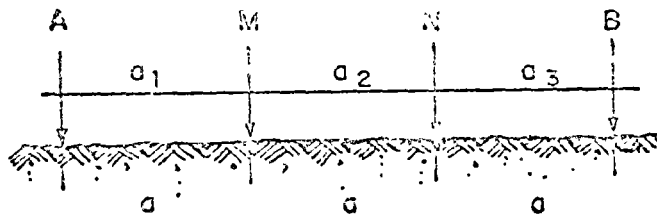


FIG. X.3.1

XI.3.2) Dispositivo Schlumberger.- En este caso las distancias  $a_1$  y  $a_3$  son iguales y muy grandes en comparación de  $a_2$  (Fig. X.3.2). La resistividad viene dada por:

$$\rho = 2 \pi \left( \frac{rc^2 - a^2}{4a} \right) \frac{\Delta V}{I}$$

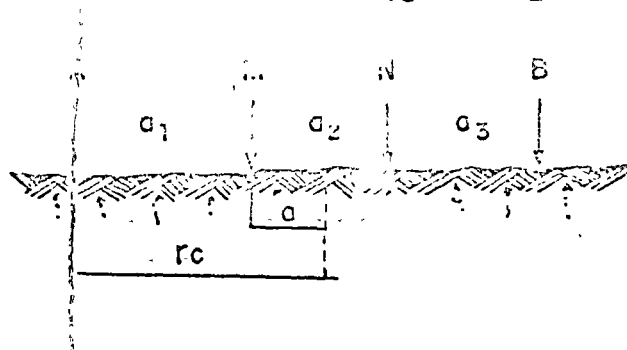


FIG. X.3.2



XI.3.3) Dispositivo Lee.- En una variante de la disposición de Wenner, en la cual se dispone en el centro del despliegue un electrodo adicional de Potencial "p" (Fig. X.3.3.). Las distancias de potencial son medidas primero entre los electrodos M P, y después entre N y P. En este caso, la resistividad en el espacio MP o NP viene dada por la expresión.

$$\rho = 4 \pi a \frac{\Delta V}{I}$$

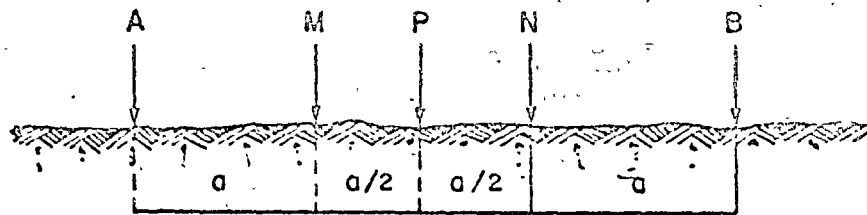


FIG. X.3.3

En realidad existen muchas posibilidades de colocación del tetrapolo, pero las más utilizadas son las mencionadas.

#### XI.4) CORRIENTE DE ALIMENTACION:

Para poder medir en el suelo una diferencia de potencial, hace falta inyectar una corriente que la produzca. Existen distintos tipos de corriente, pero los más usados son:

XI.4.1) Corriente continua.- Sigue la Ley de Ohm, tiene polaridad (positiva y negativa). Se requiere un conexionado cuidadoso del aparato medidor. La intensidad se emite por medio de pilas secas, acumuladores o rectificadores, cuando mayor es la calidad de un aparato tanto más sensible es a la mala calidad de la corriente medida.

XI.4.2) Corriente Alterna.- No sigue la Ley de Ohm. La finalidad de usar este tipo de corriente es poder compensar automáticamente la polarización y las tensiones naturales. Tiene la particularidad de penetrar poco en profundidad a causa del efecto pelicular (skin effect).

XI.5.) APARATOS EMPLEADOS.

En prospección eléctrica, existen dos grupos de aparatos: - los de corriente continua y los de corriente alterna.

XI.5.1) APARATOS PARA CORRIENTE CONTINUA

Son generalmente del tipo potenciométrico o puente. El esquema de principio esta representado en la fig. X.5.1

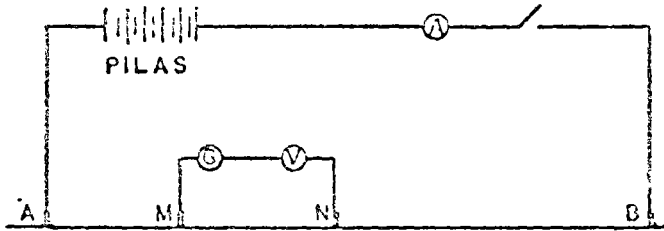


FIG. X.5.1

El circuito de intensidad comprende dos electrodos A y B., una serie de pilas secas (o un rectificador), un miliamperímetro y un interruptor de paso de corriente.

El circuito de tensión es en realidad doble. El primero, colocado en serie unicamente con el galvanómetro. Fig. X.5.2

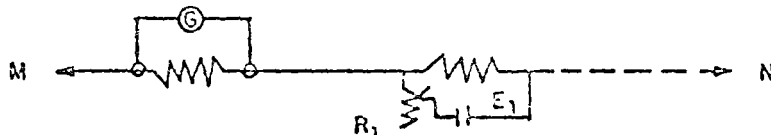


FIG. X.5.2

está destinado a eliminar la influencia de la polarización del terreno a fin de dejar la zona de media electricamente neutra. El segundo (Fig. X.5.3)

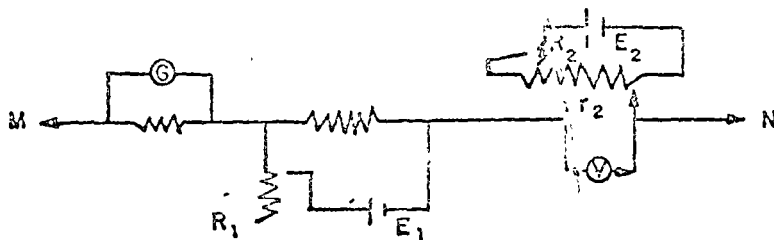


FIG. X.5.3

sirve para equilibrar la diferencia de potencial existente entre M y N por medio del circuito  $R_2 - G$  una vez establecida la corriente en el suelo entre los electrodos A y B. Como la polarización es variable, es indispensable volver a repetir varias veces la corrección de polarización a fin de tener la seguridad de medir realmente la diferencia de potencial existente entre M y B.

#### XI.5.2) APARATOS PARA CORRIENTE ALTERNA.

Como en el caso anterior, existen dos circuitos. En el circuito de envío de corriente (A3) se encuentran un miliamperímetro A, una self-inducción I variable, un transformador T que produce al potenciómetro una tensión de referencia.

En el circuito medidor de diferencia de potencial se encuentran un milivoltmetro V, una resistencia calibrada S y un galvanómetro como corrector de cero.

Obsérvese que como la polarización tiene una corrección automática, el circuito de la fig. X.5.3 no existe en este tipo de aparato fig. X.5.4.

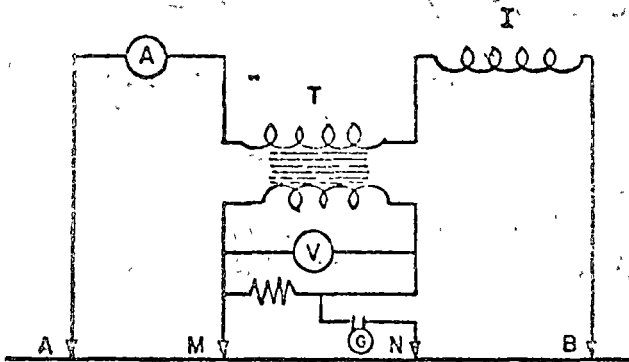


FIG. X.5.4

#### XI.6) UNIDADES.-

Generalmente las unidades empleadas en eléctrica se resumen de la manera siguiente:

- La diferencia de Potencial en milivoltios
- La intensidad en mili-amperes
- La longitud en metros
- La resistividad en ohmios-metro

## XL 7) PROGRAMA DE ESTUDIO

La profundidad del estudio se programará tomando en consideración el objetivo. La densidad de las medidas será en función de la geología.

Si la geología regional es sencilla (que no se observan muchos cambios litológicos) los sondeos pueden estar bastante espaciados uno del otro. Tomando en consideración, sin embargo que entre menos sondeos haya, tendremos menor control geofísico.

En regiones donde la geología es bastante complicada, si se está utilizando arreglo Wenner, se recomienda que la separación máxima entre 2 puntos consecutivos sea igual a la prof., teórica de exploración.

No es generalmente aconsejable trabajar un sondeo eléctrico -- aislado y extrapolar sus resultados a otra zona aunque parezca semejante.

## XL 8) INTERPRETACION DE DATOS.

En el método de las resistividades, se mide la intensidad así como la diferencia de potencial y se calcula la resistividad.

La resistividad se calcula de manera que se obtenga el valor -- de forma tal que si el medio fuese homogéneo e isótropo, resultaría la medida obtenida en M.N. es por esta razón que se denomina generalmente Resistividad Aparente. En otras palabras, -- la resistividad que nosotros obtenemos no es la de un medio -- homogéneo e isótropo, sino una resistividad representativa del conjunto.

Se puede considerar que la interpretación se divide en tres -- partes.

- A) Interpretación cualitativa---
- B) Interpretación cuantitativa--
- C) Integración de Datos-----

El análisis cualitativo se lleva a cabo por medio de las resistividades e isoresistividades para esto, primero se determina las resistividades aparentes correspondientes a las medidas -- efectuadas, después se construyen gráficas de  $\rho_a$  en función de la separación creciente de electrodos. Representando conjuntamente los resultados a lo largo de la traza del perfil se tiene una cierta imagen de su estructura eléctrica sin perder de vista cada configuración particular.

Con el trazo de las curvas de isorresistividades aparentes se visualiza mucho mejor la estructura, aunque pierda en parte - la perspectiva individual de cada sondeo eléctrico.

Una vez que este mecanismo esta resuelto, se analiza el mismo cuantitativamente por medio de los abacos u otra técnica y se definen los diferentes contactos.

La integración de datos consiste en recopilar toda la información que ayude a conocer las condiciones existentes sobre el área de estudio y sirva de base para la interpretación final. Siempre se procurara seguir:

Mapas Topográficos  
Mapas Geológicos  
Cortes litológicos de pozos  
Fotografías aéreas  
Análisis químicos de muestras de agua  
obtenida en pozos.

#### COMENTARIOS :

El método eléctrico resistivo tiene la gran ventaja de alcanzar profundidades teóricas de estudio hasta de 1500 m.

La mayoría de los reconocimientos de cuencas acuíferas se realiza por métodos eléctricos. Entre esos el resistivo es aplicado en más de un 80% de los casos. Las razones que conducen a este resultado son:

El bajo costo de los reconocimientos  
La influencia del agua sobre la conductividad del subsuelo.  
Una facilidad de interpretación aunque a veces solamente aparente.

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

ASTIER J. L.

GEOFISICA APLICADA A LA  
GEOHIDROLOGICA-PARANIN-  
FO-MADRID 1975.

DOBRIN, M. B.

INTRODUCCION A LA PROS-  
PECCION GEOFISICA-OMEGA,  
S. A., MEXICO 1960.

OLHOVICH, V. A.

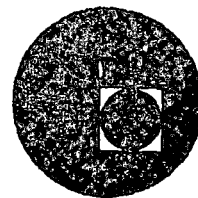
CURSO DE SISMOLOGIA --  
APLICADA-REVERTE-MEXICO  
1959.

PARASNIS, D. S.

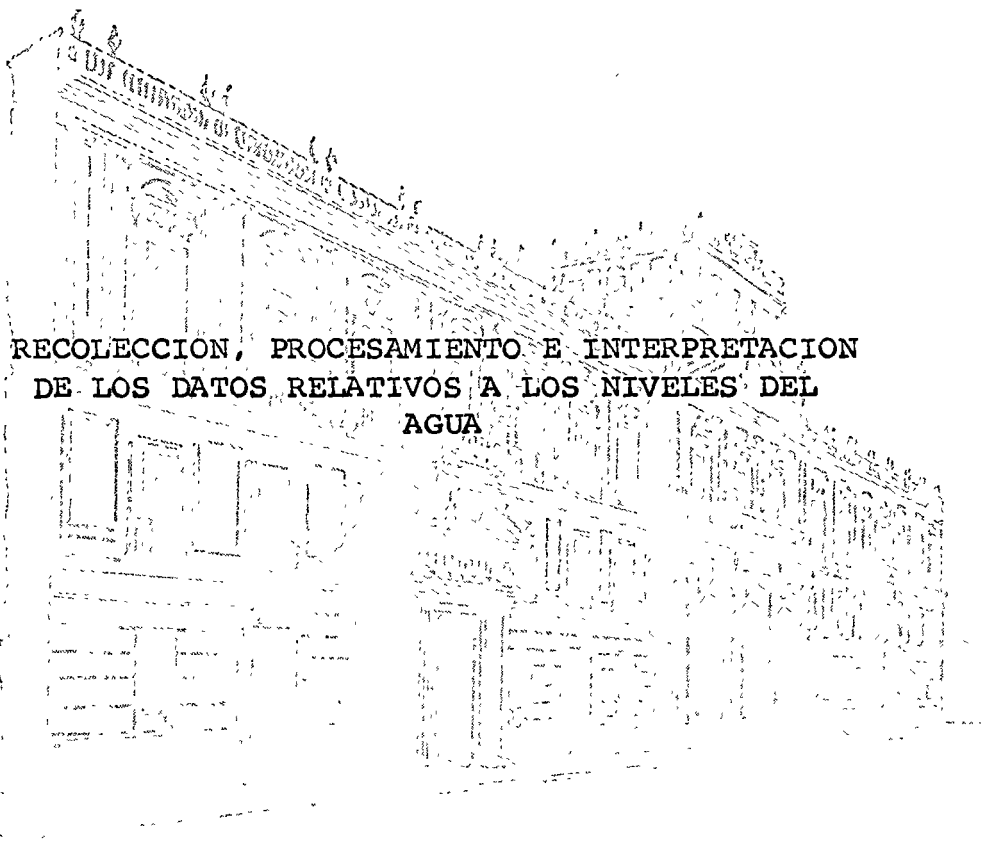
GEOFISICA MINERA-PARA--  
NINFO-MADRID 1971.



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



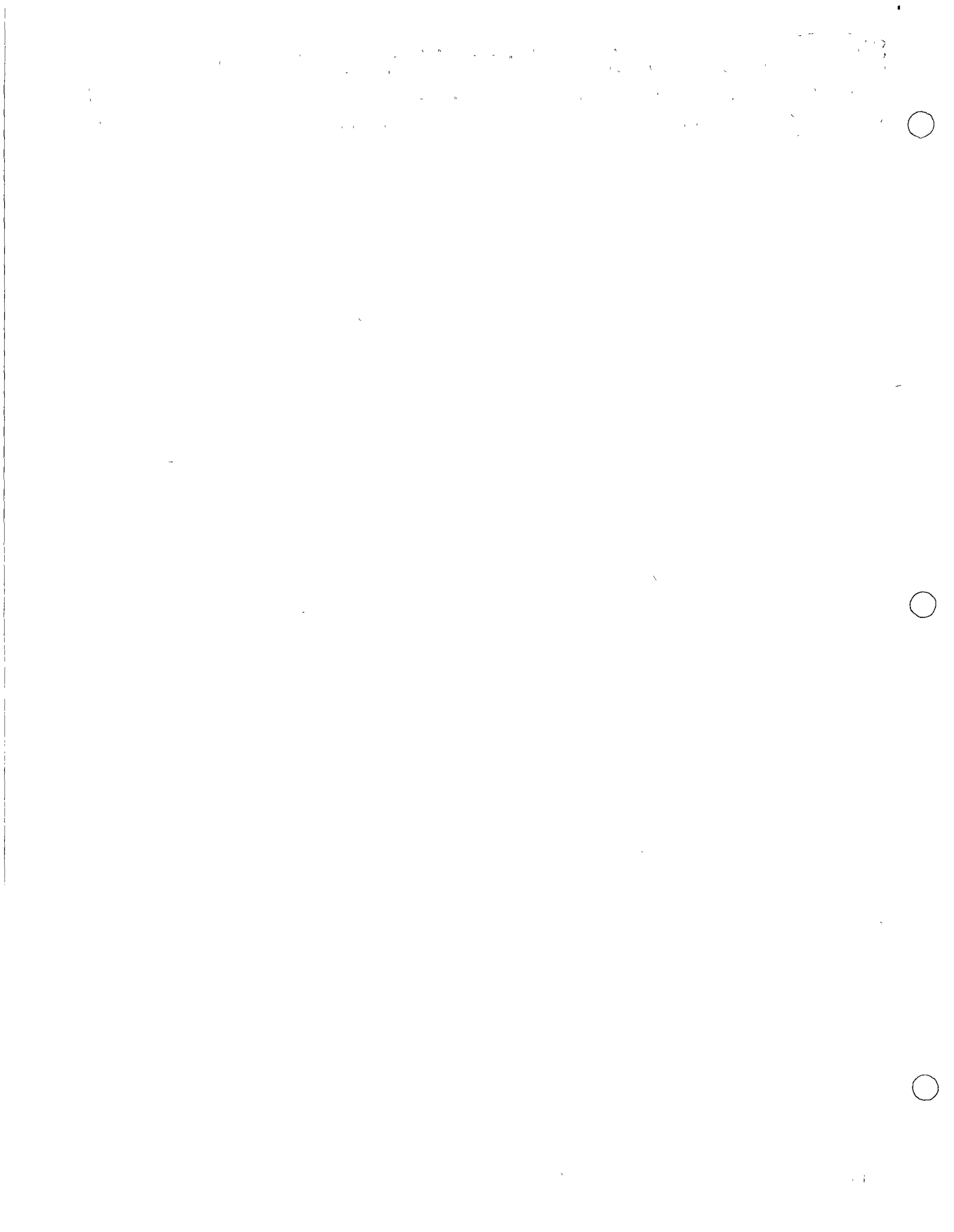
## HIDROLOGIA SUBTERRANEA



RECOLECCION, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION  
DE LOS DATOS RELATIVOS A LOS NIVELES DEL  
AGUA

ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN

JULIO DE 1976.





# RECOLECCION, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE LOS DATOS RELATIVOS A LOS NIVELES DEL AGUA.

## INTRODUCCION.

Información indispensable para conocer el funcionamiento hidrológico subterráneo de una zona o cuenca, - es la relativa a los niveles del agua que tienen los acuíferos bajo diferentes regímenes de funcionamiento; debiéndose entender también, que así como en el caso de almacenamientos visibles, como son las presas, es necesario conocer las variaciones en el almacenamiento, condición semejante se tiene en los acuíferos subterráneos, donde el volumen almacenado y su variación, son factores fundamentales para condicionar el aprovechamiento y lograr un manejo racionalizado de ese recurso.

Entre las características geohidrológicas importantes que se pueden destacar por su relación con la posición de los niveles de agua, se tiene que manifiestan zonas de recarga y de descarga, teniéndose también que el flujo subterráneo ocurre de las áreas con mayor elevación de nivel a las de más baja. Por otra parte, si se conoce su variación en el tiempo, pueden inferirse causas y efectos - que propician tales cambios, se tiene por ejemplo, que si la recarga es mayor a la descarga de un acuífero en un tiempo dado, los niveles se elevan, resultando el efecto contrario en condiciones opuestas.

Con los comentarios anteriores, se ha evidenciado la importancia que tiene para alcanzar el conocimiento geohidrológico de una cuenca, el contar con información relativa a los niveles de agua, la que por otra parte, tal como se verá más adelante, es conveniente obtenerla en forma sistemática.

Ahora bien, antes de entrar en materia, es conveniente establecer algunos criterios o definiciones de trabajo, de tal forma que no resulten confusos los términos nivel piezométrico, freático, estático o dinámico.

En primer lugar, debe aceptarse que el nivel piezométrico puede relacionarse con el nivel estático o - -

dinámico, pues únicamente se refiere a un nivel de posición, independiente de las condiciones de trabajo, aceptándose también que en un mismo punto pueden existir diferentes niveles piezométricos, correspondientes a los acuíferos que se hayan cruzado con una perforación.

Por nivel freático se entiende el nivel de agua que no se encuentra afectado por bombeos y que corresponde generalmente a los acuíferos libres, siendo posible también, en áreas donde hay un solo acuífero identificado como libre, denominar en forma indistinta nivel freático o estático.

El nivel estático es aquel nivel de agua que se detecta en una perforación no afectada por bombeos y corresponde al nivel que alcanza un acuífero, que puede estar confinado o semiconfinado, existiendo la diferencia con el freático de que abajo de éste todo el espesor se encuentra saturado, mientras que en el caso del estático no necesariamente corresponde a un nivel de saturación. Por otra parte, en áreas con pozos que atraviezan 2 o más acuíferos, el nivel detectado como estático, es un nivel de compensación de los diferentes niveles piezométricos.

Finalmente, un nivel dinámico es aquél que se mide, encontrándose en operación el pozo de observación o bien alguno o algunos cercanos, es decir, es un nivel de agua afectado por bombeo.

#### TOMA DE DATOS PIEZOMETRICOS.

Como punto de partida de este tema, se intentará contestar en forma breve, tres preguntas fundamentales, cuya respuesta es necesaria para programar un sistema de observaciones piezométricas, tales son: cómo, cuándo y donde, deben realizarse las mediciones correspondientes.

Respecto al cómo?, es posiblemente la pregunta más fácil de contestar, pues generalmente se realiza con sondas llamadas eléctricas por su principio de funcionamiento, ya que consisten fundamentalmente de un cable de dos hilos, unidos por un extremo a una pila seca, encontrándose por el otro con los hilos ligeramente separados, los que al contacto con el agua permiten el paso de corriente, que se

registra con un miliamperímetro.

Ese cable entonces, se introduce por un hueco que puede haber en la base de la bomba o un orificio hecho a propósito, y se desliza entre la tubería de ademe y la columna de succión, la longitud de cable que logra introducirse hasta que se observe el contacto, puede medirse y determina la posición del nivel de agua, con respecto a un punto de referencia, el que se debe elegir previamente y mantenerse para observaciones subsecuentes.

Otra forma común de medición, aún cuando un poco más imprecisa consiste en la utilización de lo que se ha llamado sonda neumática, la que está integrada por dos tubos conectados, uno de los cuales es un tubo de inyección de aire y otro que se introduce dentro del ademe hasta más abajo del nivel estático o freático, el cual a su vez, está conectado a un manómetro que mide la presión del aire inyectado. La posición del nivel de agua en este caso, se puede detectar inyectando aire hasta expulsar la columna de agua que se encuentra dentro del tubo inmerso, condición que se logra en el momento en que la presión medida llega a ser constante y corresponde a una lectura en el manómetro, la cual a su vez se puede transformar en una columna de agua ( $1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ m de columna}$ ), resultando entonces que si se conoce la longitud del tubo instalado dentro del ademe, basta con restar la columna desalojada y se obtiene la posición original del nivel de agua. Lo impreciso de este método se debe fundamentalmente al sistema de medición, pues pequeñas variaciones de presión, representan longitudes considerables de columna de agua, teniéndose por otra parte, la posibilidad de obstrucción del sistema y consecuentemente de obtener datos erróneos.

En el párrafo anterior, se habló de imprecisión mayor con el uso de la sonda neumática, siendo importante mencionar que dadas las variaciones que pueden ocurrir en los niveles de agua, estos deberán medirse con un margen de seguridad hasta el centímetro, pues en ocasiones y fundamentalmente cuando se realizan observaciones de variación de nivel en condiciones dinámicas puede ser importante la medida fijada como límite recomendable de precisión.

Si se pretende definir el cuando se recomienda efectuar observaciones, existen dos tipos de respuestas, la

primera corresponde a pruebas en condiciones dinámicas, generalmente conocidas como pruebas de bombeo y cuya secuencia de observación será definida en un tema posterior.

Cuando las mediciones se efectúan con el interés de definir el comportamiento del acuífero a nivel regional, sometido a diferentes condiciones de recarga y descarga, es importante fijar un programa que permita cumplir con el objetivo perseguido, requiriéndose entender de antemano cuál es la pretensión del trabajo a realizar.

Práctica común en estos casos puede ser la toma inicial de niveles con una frecuencia mensual por un período mínimo de un año, de tal forma que durante ese tiempo se tengan datos correspondientes a las diferentes situaciones bajo las cuales se encuentra el acuífero en una zona, por ejemplo: período de lluvias, régimen variable de bombeo, escurrimientos superficiales, riego de superficies agrícolas, etc.

Al término de la primera etapa mencionada, la graficación de las variaciones de nivel es de gran ayuda para tener un criterio que modifique la frecuencia original, de tal forma de realizar observaciones que permitan conocer los efectos que propicien cambios notables, en la posición regional de los niveles estáticos o freáticos. Por ejemplo, en zonas de riego, inicio y terminación del bombeo de los pozos de uso agrícola, etc.

De las consideraciones anteriores, resulta que en el caso más frecuente de estudio de una región agrícola, abastecida con agua subterránea las observaciones pueden ser 2 o 3 por año, al inicio y terminación del período de riego que puede corresponder también con la terminación y principio de la época de lluvia, lográndose en esa forma, detectar los máximos cambios que se presentan en una zona, por los efectos más notables que los producen.

El concepto que se debe manejar para decidir donde es conveniente programar observaciones piezométricas, es el de contar con datos suficientes que permitan conocer los aspectos fundamentales de un acuífero, en este sentido se debe destacar la necesidad de tener una idea sobre las condiciones geohidrológicas regionales, para decidir los pozos a observar.

Como ejemplo puede señalarse la existencia en una zona de varios acuíferos, cuyo nivel piezométrico es diferente, debiéndose conocer tal situación, para efectuar un procesamiento adecuado, y decidir sobre los puntos de observación de la información. En otras ocasiones, de la medición de niveles de agua resultan diferencias notables en áreas muy próximas, que sugieren la necesidad de una investigación que permita encontrar la causa de tal diferencia y tomarla en cuenta en el procesamiento.

En párrafos anteriores se ha destacado en forma breve la importancia que tiene en el campo de la geohidrología, el contar con información piezométrica cuya obtención requiere ciertos cuidados, pues la medición de un nivel estático puede ser afectada por numerosos factores que llegan a invalidar las observaciones efectuadas, una recomendación especial es que el pozo observado no debe encontrarse afectado por bombeo reciente, o por la operación de algunos pozos cercanos.

#### ORGANIZACION Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION.

Con la recomendación complementaria anterior, resulta conveniente destacar la forma para organizar la información piezométrica obtenida en una zona. En primer lugar, contando ya con los puntos de observación seleccionados, es conveniente que los recorridos sistemáticos se realicen en el menor período de tiempo posible, de tal forma que la información que se obtenga corresponda a una misma condición de operación del sistema acuífero.

En segundo término, al hablar de un sistema de mediciones, este debe ser establecido procurando que año con año se cuente con datos correspondientes a condiciones semejantes, de tal forma, que sea posible establecer comparaciones de las mediciones obtenidas a través del tiempo.

Una manera de guardar la información sería, establecer un archivo de datos piezométricos, diferenciando en cada ocasión si la medida corresponde a condiciones dinámicas o estáticas en el pozo. Posteriormente, las medidas subsecuentes deben clasificarse y agruparse por punto de observación, indicando siempre la fecha correspondiente al dato registrado.

Cuando la cantidad de información así lo requiera y para facilitar su procesamiento, se puede manejar con el

auxilio de cintas o discos de computadora.

Recientemente, dada la importancia que tiene la información piezométrica, la Comisión de Estudios del Territorio Nacional, ha iniciado la elaboración de cartas geohidrológicas, donde se manejan y presentan datos relacionados con los niveles de agua de los acuíferos.

#### PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE LA INFORMACION.

Las formas más comunes que se utilizan para procesar y determinar características geohidrológicas de un acuífero, consisten en la elaboración de planos conteniendo curvas de igual elevación o evolución piezométrica, o bien, planos de profundidad al nivel del agua. También se construyen hidrógrafos regionales o de pozos y perfiles destacando los niveles piezométricos.

#### CONFIGURACIONES DE IGUAL ELEVACION PIEZOMETRICA.

Una configuración piezométrica representa la forma de la superficie piezométrica en un acuífero confinado o semiconfinado, y la forma de la superficie freática en un acuífero libre. Las configuraciones se preparan con base en los niveles estáticos referidos a un plano horizontal, generalmente el nivel medio del mar. El procesamiento consiste en trazar curvas de igual elevación piezométrica, interpolando entre valores conocidos.

La preparación de estas configuraciones tiene un problema principal: por su aparente sencillez se le considera a menudo como una simple interpolación mecánica que no requiere de ningún criterio. Esto lleva a cometer errores que pueden invalidar la configuración resultante: se apoya la configuración en todos los valores indiscriminadamente, sin previa depuración; no se toma en cuenta el efecto de aquellos factores que pueden influir en el flujo del agua subterránea y, por tanto, en la forma de la superficie piezométrica, etc.

En primer lugar, entonces, es necesaria una depuración de los datos, ya que pueden estar afectados en varias formas; por ejemplo: un nivel de agua detectado puede estar influenciado por el bombeo en el propio pozo o en pozos vecinos, y no ser representativo del estático; un falso contacto de la sonda o una medición equivocada de la longitud de cable introducido para lograr el contacto, puede llevar a un nivel -

estático totalmente falso.

En otras ocasiones, el error no está en la medición, sino en ligar en la configuración niveles estáticos correspondientes a pozos que están captando acuíferos diferentes. Para evitar esto, es conveniente contar con secciones geológicas que muestren las principales unidades geohidrológicas existentes en el subsuelo; asimismo, deben conocerse las características constructivas (profundidad, ubicación de cedazos, . . .) de los pozos de observación para definir el acuífero en que se encuentran. En caso de existir varios acuíferos, será necesario preparar una configuración piezométrica para cada uno de ellos.

Una vez corregidos o eliminados los datos poco confiables, se procede a la interpretación para definir las curvas de igual elevación de nivel estático, las cuales deben trazarse tomando en cuenta todos los factores hidrológicos y geológicos que puedan influir en la forma de la superficie piezométrica. Para esto es conveniente preparar las configuraciones en un plano base en el que se indique la topografía aproximada, afloramientos geológicos, ríos, lagunas, manantiales, zonas empantanadas, pozos, etc.

Las configuraciones así obtenidas proporcionan información respecto a las direcciones de flujo, localización de zonas de recarga y descarga, gradientes hidráulicos, comportamiento de las fronteras, efectos de la explotación, etc.

Por otra parte, las configuraciones piezométricas son básicas para la cuantificación de caudales de flujo subterráneo. Esta cuantificación se basa en el concepto de "red de flujo" y en la Ley de Darcy.

Debe entenderse que las curvas de igual elevación de nivel estático corresponden a líneas equipotenciales, por lo que el flujo subterráneo debe ocurrir sobre líneas normales a éstas, denominándose entonces a las líneas perpendiculares, líneas de flujo. A la malla formada por las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, se le llama red de flujo.

Una utilización básica de las configuraciones señaladas, está apoyada en la aplicación de la ley establecida en 1856 por Darcy: la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamen

te proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo. - Esta ley se expresa matemáticamente.

$$V = K \frac{h}{L} = Ki$$

en la que V es la velocidad media de flujo, h es la pérdida de carga en la distancia L, i es el gradiente hidráulico y K es el coeficiente de permeabilidad.

Con base en la expresión anterior, puede cuantificarse el caudal de flujo que circula a través de una sección (canal de flujo), limitada por dos líneas de flujo y dos curvas equipotenciales, en la forma siguiente:

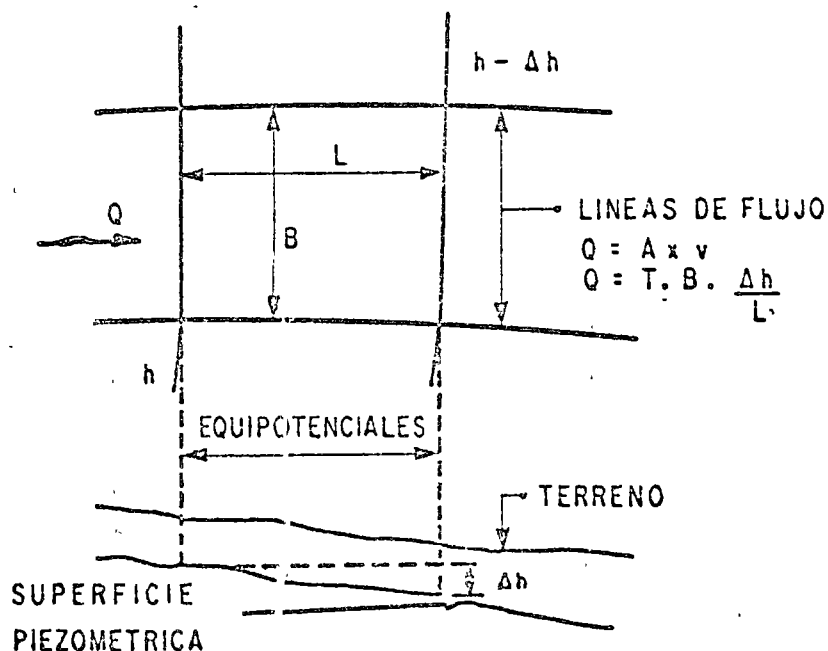
$$Q = Av = KA \frac{h}{L}$$

en la que A es el área de flujo. Utilizando el concepto de transmisibilidad, la expresión anterior queda

$$Q = T.B. \frac{h}{L}$$

en la que T es la transmisibilidad y B es el ancho medio de flujo.

Los valores de B y L son medidos directamente en la red de flujo, ver fig.





## Evolución Piezométrica.-

La información necesaria para conocer la evolución piezométrica es la que se obtiene de la observación sistemática de la posición de los niveles estáticos o freáticos, cuya comparación y de acuerdo con la diferencia obtenida en un período determinado de tiempo, constituye el elemento bá-sico para elaborar la configuración correspondiente.

La importancia de las curvas de igual evolución reside en que manifiestan los cambios registrados en el alma-cenamiento de un acuífero, en un período y bajo ciertas condi-ciones, pues definen áreas de abatimiento o ascensos de los -niveles estáticos, es decir, áreas donde han disminuido o au-mentado el volumen de agua subterránea almacenado.

Esa información, relacionada con otros efectos - conocidos, como puede ser el bombeo de pozos, indica las alte-raciones que se han propiciado por la explotación de los acuí-feros, en otras zonas puede conocerse lo ocurrido en épocas - o períodos prolongados de estiaje, en áreas donde el drenado - natural es más importante que el régimen de explotación con - perforaciones.

Un aspecto importante del conocimiento de la evolución o fluctuaciones de los niveles estáticos, es el relati-vo a la calibración de modelos de simulación de comportamien-to de un acuífero, los que se elaboran en niveles avanzados de estudio, con el fin de conocer y programar alternativas de explotación, definiendo previamente sus efectos.

## Profundidad a los Niveles Estáticos.-

La elaboración de planos conteniendo curvas de igual profundidad al nivel estático o freático, es semejante a la comentada en párrafos anteriores, condición que implica tener los conocimientos básicos regionales y efectuar una depuración previa de los datos medidos, de tal forma que se lo-gre una configuración confiable que considere todos los efec-tos que pueden influir en su forma.

Respecto a la utilidad de estas curvas se debe señalar que definen zonas donde los niveles se encuentran muy próximos a la superficie del terreno, identificándose por consiguiente, áreas de descargas por evapotranspiración o en ca-so de superficies de riego, zonas de drenaje problemático.

Por otra parte, el conocer la posición del nivel estático o freático, permite en ocasiones conocer la profundidad mínima que deben alcanzar las perforaciones y las áreas donde por condiciones económicas relacionadas con la profundidad de bombeo, no es recomendable perforar pozos para la satisfacción de ciertas necesidades.

#### Perfiles Piezométricos.-

Una práctica común en la interpretación de la información geohidrológica, es la elaboración de perfiles definiendo las formaciones geológicas del subsuelo y señalando la posición de los niveles de agua.

Este tipo de trabajos en ocasiones es muy ilustrativo, pues permite dar objetividad a la presentación de resultados y ayuda a estimar espesores y volúmenes almacenados de agua.

#### Hidrógrafos de Pozos.-

Hasta ahora se ha mencionado la necesidad y forma práctica de organizar la información piezométrica, así como la necesidad de depurar los datos antes de proceder a elaborar una configuración, no obstante, se ha omitido deliberadamente la forma de hacer esa depuración.

Una de las prácticas más comunes consiste en comparar observaciones en un mismo punto y en caso de resultar algún dato "anormal", a juicio del procesador, se elimina, requiriéndose experiencia para efectuar tal decisión en forma acertada. Entre las formas que facilitan tal actividad, conviene destacar la construcción de hidrógrafos de pozos, que consisten en un sistema de coordenadas, en el cual en abcisas se maneja tiempo y en ordenadas profundidad o elevación del nivel estático. Con tal gráfica un dato fuera de la tendencia normal, inmediatamente se identifica, recomendándose por consiguiente una revisión antes de eliminarlo.

Por otra parte, a las escalas de trabajo resulta mucho más objetivo, en una presentación, utilizar las gráficas señaladas, donde variaciones de pequeña magnitud son evidentes, condición que en las configuraciones no resulta igual, pues un pequeño desplazamiento de una curva en ocasiones no es apreciable.

Una ventaja más que hace recomendable la elaboración de los hidrógrafos, está en la facilidad que presentan para conocer en un mismo punto los cambios de nivel que ocurren con el tiempo, fluctuaciones cuyo análisis son importantes de conocer en la realización de un estudio geohidrológico, pues permiten identificar con conocimientos adicionales, los efectos predominantes que modifican las condiciones geohidrológicas regionales.

En el caso de la elaboración de modelos de simulación, la comparación de resultados en la etapa de calibración es mucho más fácil con los hidrógrafos de pozos y los correspondientes a puntos definidos en el modelo elaborado, teniéndose también que en esa forma, se conocen las desviaciones resultantes a modificar con las consideraciones hechas con el modelo.

Con todo lo expuesto, resulta evidente la conveniencia de elaborar las gráficas descritas, las que en zonas donde abunden puntos de observación, podrán realizarse para puntos seleccionados que permitan caracterizar toda el área en estudio.

#### Niveles Dinámicos.-

Un dato piezométrico del cual hasta ahora no se ha hecho mención, es el correspondiente a los niveles dinámicos, también conocidos como niveles de bombeo, cuya utilidad está restringida por la serie de efectos que pueden modificar su resultado y por la dificultad que se tendría si se quisiera tener características constantes en los diferentes tiempos de observación. Basta con pensar que en un mismo pozo puede cambiar con pequeñas variaciones del caudal de extracción y con el tiempo mismo que lleva operando.

No obstante, es común manejar estos datos acompañados del reporte del tiempo que llevaba en operación el pozo o pozos próximos y de los caudales de operación, siendo factible con esos elementos, calcular el caudal específico, parámetro relacionado con la transmisibilidad de las formaciones, tema de pláticas posteriores

EFFECTOS QUE PROPICIAN CAMBIOS EN LA POSICION DE LOS NIVELES ESTATICOS DE LOS ACUIFEROS.

Como último punto y a manera de resumen se des-

cribirán en forma breve algunas causas y efectos que propician cambios en la posición de los niveles de agua.

Las variaciones que manifiestan los niveles de agua en los acuíferos pueden ocurrir en períodos prolongados o bien en períodos cortos, debiéndose tener en ambos casos, observaciones que permitan definir su forma y duración, las que se consiguen midiendo sistemáticamente la posición del nivel correspondiente, en pozos que se elijen de observación, tomando siempre en cada uno el mismo punto de referencia.

Entre las causas que propician variaciones considerables debe destacarse la lluvia, la que en esencia puede considerarse como única fuente de recarga y por tanto, es una fuente intermitente que varía día con día y año con año. La descarga, por otra parte, que se manifiesta con disminución en las elevaciones del nivel, puede ser natural o artificial, cuya magnitud depende en el primer caso, de la elevación original de los niveles, los que determinan el gradiente hidráulico de escurrimiento, mientras que en el segundo caso, la causa más común es el bombeo por medio de pozos, de cuya magnitud depende la velocidad de abatimiento de los niveles estáticos.

En el caso de una descarga natural los factores que intervienen en el abatimiento de los niveles son:

- a).- La capacidad de transmisión del agua, que a su vez depende de la permeabilidad de los materiales que constituyen el acuífero y del espesor de éste (K y b).
- b).- Del gradiente hidráulico bajo el cual ocurre el flujo de descarga.
- c).- Del coeficiente de almacenamiento del acuífero (S), término directamente relacionado con la porosidad y rendimiento específico de los materiales.

Con los elementos anteriores Jacob (1) encontró que el logaritmo de (h) la elevación del nivel, disminuye en forma directamente proporcional con el tiempo.

---

(1) Jacob.- Correlation of ground water leveles and precipitation on Long Island, N. Y., (1944, pp 566-567).

Por otra parte, al hablar de que la lluvia es fuente de recarga al acuífero, no debe pensarse que su efecto en todos los casos es inmediato, pues además de que la distribución e intensidad de la precipitación tienen un efecto notable, debe considerarse también que parte llega a escurrir y otra se evapora, restando la que puede alcanzar a alimentar a los mantos subterráneos, a los que puede llegar después de períodos cortos o muy prolongados, dependiendo de que el nivel de agua se encuentre somero o profundo y de la permeabilidad vertical de los materiales que sobreyacen a las formaciones acuíferas.

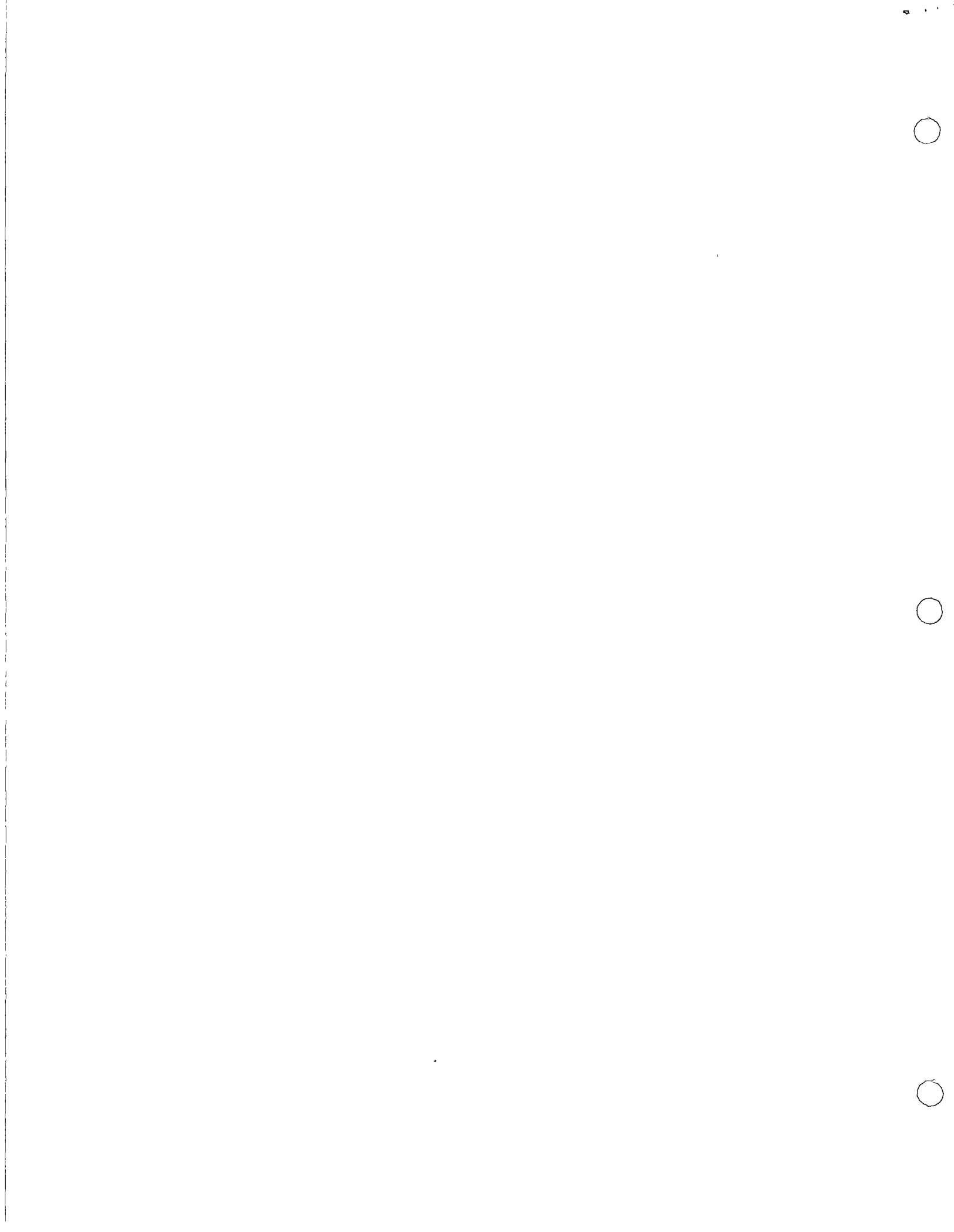
Una causa común que propicia abatimientos por períodos prolongados de los niveles, e inclusive abatimientos residuales no recuperables por recarga natural a los acuíferos, es el bombeo con pozos, cuyos efectos se detectan con información sistemática que en todos los casos se recomienda obtener, por ser de gran valor para el estudio de los acuíferos.

Fluctuaciones por períodos cortos de los niveles de agua pueden ocurrir por diferentes causas, requiriéndose para lograr su detección una frecuencia apropiada de observaciones, e inclusive un registro continuo en algunos casos.

La causa más común que propicia cambios instantáneos en la posición del nivel de agua, es el bombeo o suspensión de operación de pozos, cuyo registro de efectos es un elemento importante que se utiliza para la complementación de estudios geohidrológicos, tal como se verá en capítulos subsecuentes.

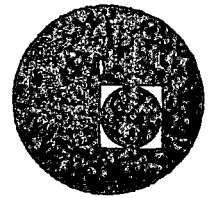
Otras causas que en México no es común registrar, pero que investigaciones en otros países han permitido conocer efectos, son los temblores de tierra, cuya onda de movimiento que provoca en acuíferos confinados expansiones y compresiones puede ser observada, habiéndose observado en registros continuos que las variaciones por este motivo, se caracterizan porque los abatimientos y recuperaciones provocados con respecto a un nivel original son de la misma magnitud.

En otras ocasiones se han llegado a detectar cambios propiciados por variaciones en la presión barométrica y por el movimiento de mareas en acuíferos costeros.






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



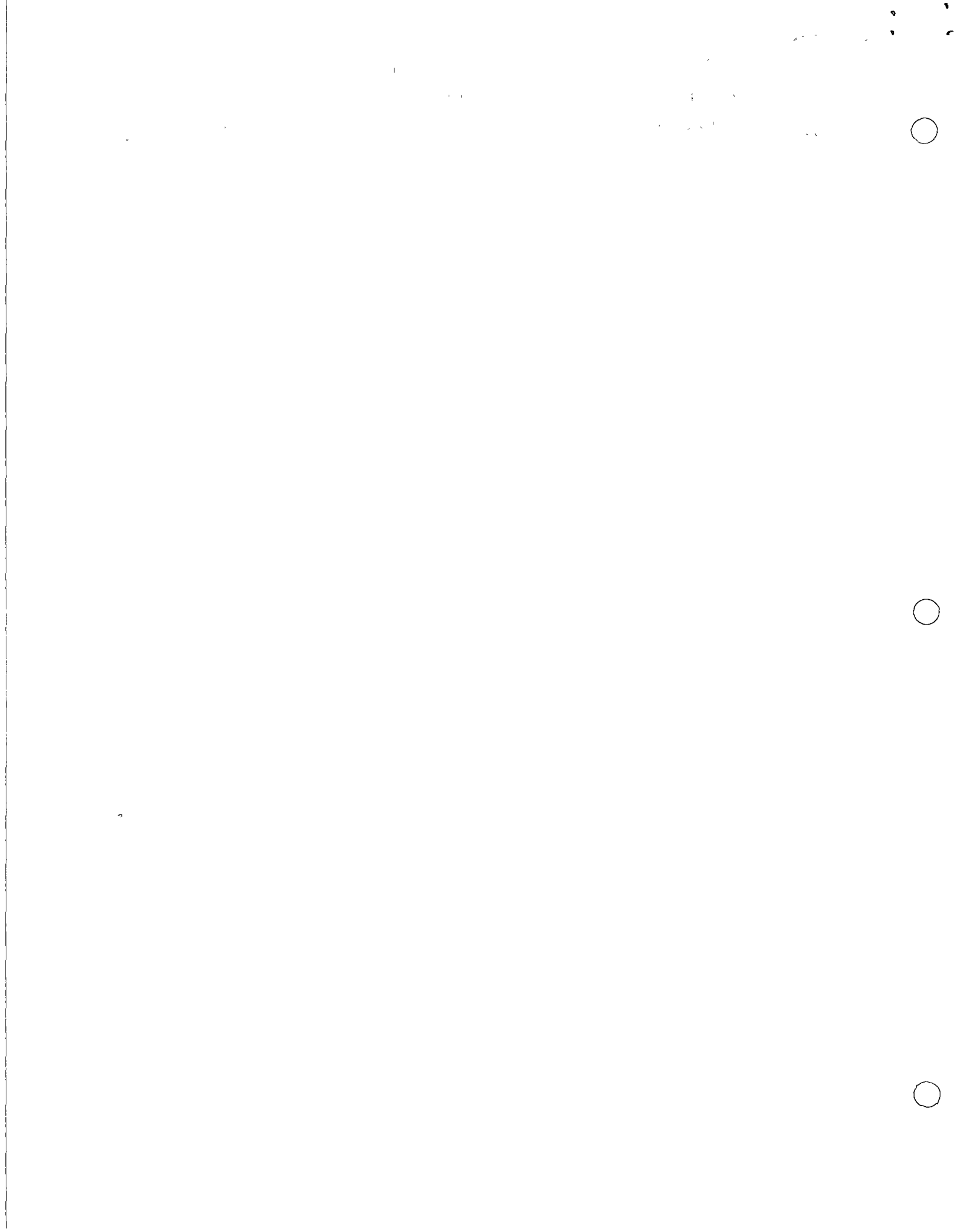
HIDROLOGIA SUBTERRANEA



INTERPRETACION DE REGISTROS DE POZOS DE AGUA

ING. LUIS ENRIQUE LARA TRUJILLO

JULIO DE 1976.





## 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/o 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 radiactivas 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 configuren 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 adome 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.

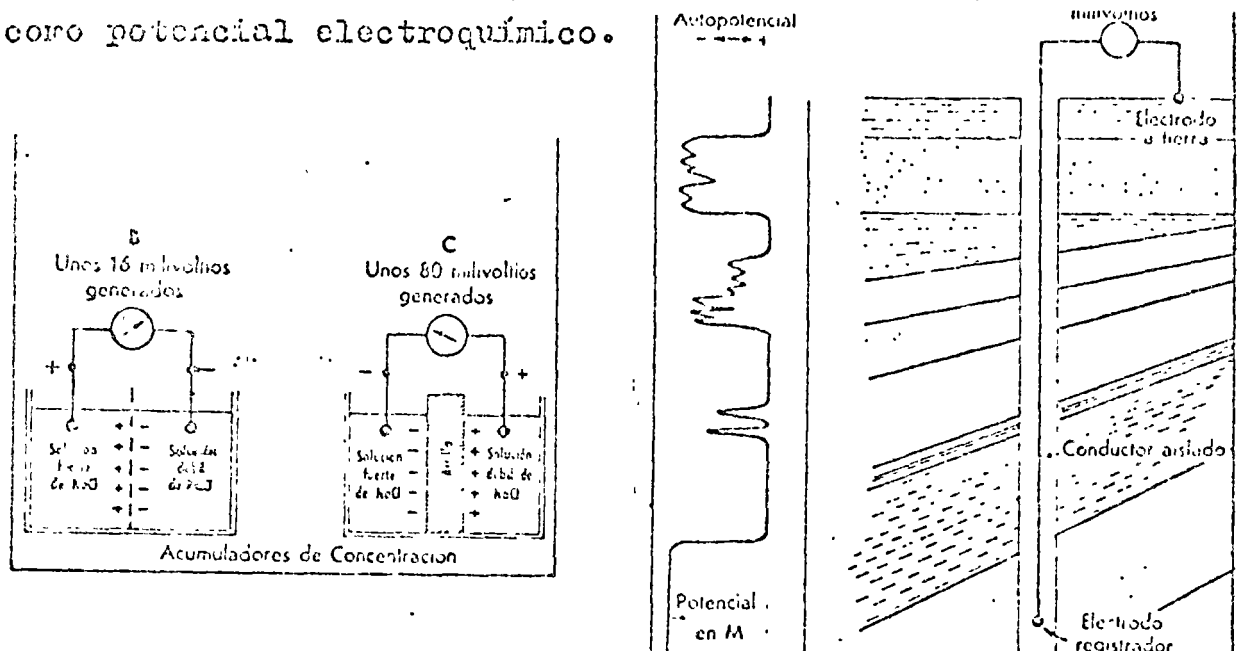
El potencial espontáneo es obtenido simultáneamente a otros registros. Las variaciones de la curva reflejan las diferencias de potencial entre puntos dentro del agujero frente a rocas porosas y puntos frente a cuerpos arcillosos. Cuando las rocas atravesadas están constituidas por capas de arcilla ó 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-

contracción, potencial de membrana ó de Nernst 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 Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> pueden pasar de una solución a otra. Como los iones de Cl<sup>-</sup> tienen mayor movilidad que los iones de Na<sup>+</sup> 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.

Cuando una arcilla separa soluciones de NaCl de diferente concentración, los cationes Na<sup>+</sup> se desplazan a través de la arcilla (las arcillas son permeables a los cationes Na<sup>+</sup> e impermeables a los aniones Cl<sup>-</sup>), 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 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 argilla 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 NaCl es igual a 71 á 25°C.

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

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

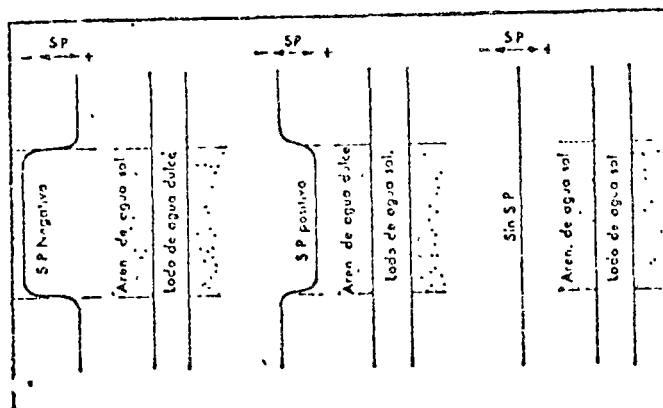
en donde:

$SP$  = 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 en tre 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.

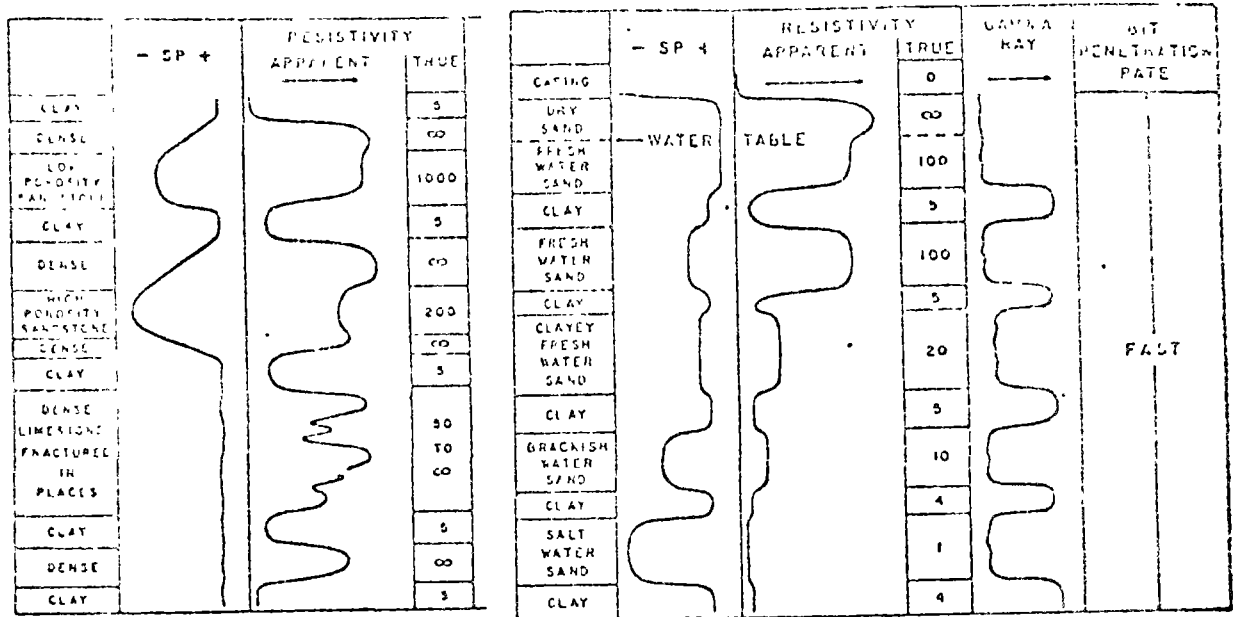
Tomando como referencia, la línea base de lutitas, el potencial espontáneo que es medido en milivolts, puede ser negativo si su deflexión es a la izquierda, positivo si la deflexión es a la derecha de la misma referencia ó bien nó dar ningún valor relativo.

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 ú 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, empaquetados 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.

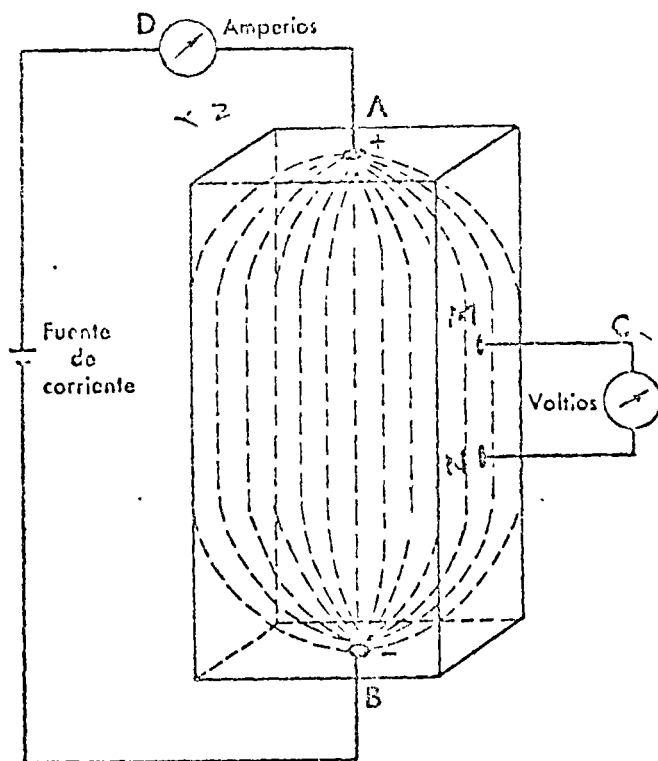
2.- En los intervalos en donde la amplitud del SP frente a los acuíferos potentes, permanece constante con respecto a la profundidad, todas las aguas de formación tienen aproximadamente la misma salinidad.

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.

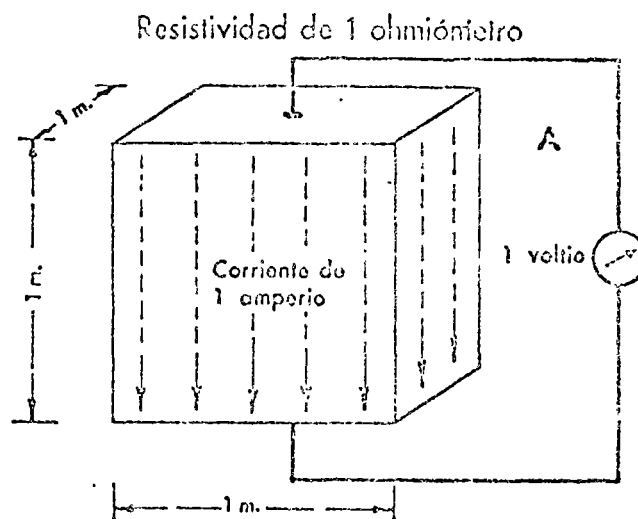
A = Area del conductor.

L = longitud del conductor.

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

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

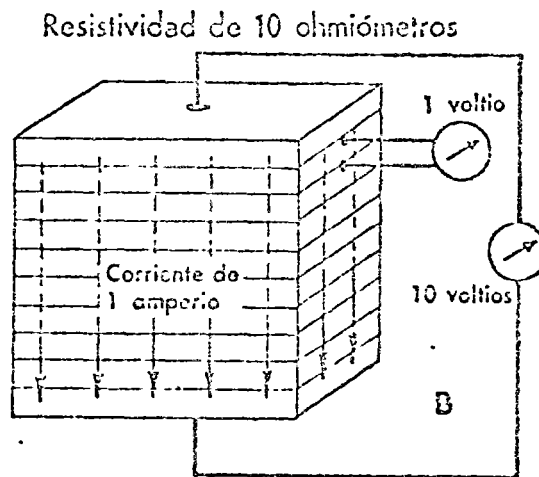
Para ilustrar el concepto, en la siguiente figura se tiene un cubo de un metro por lado de un determinado material,



Si la diferencia de potencial entre los extremos del cubo, es de un volt y la intensidad de corriente de un amperé, se tendrá

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

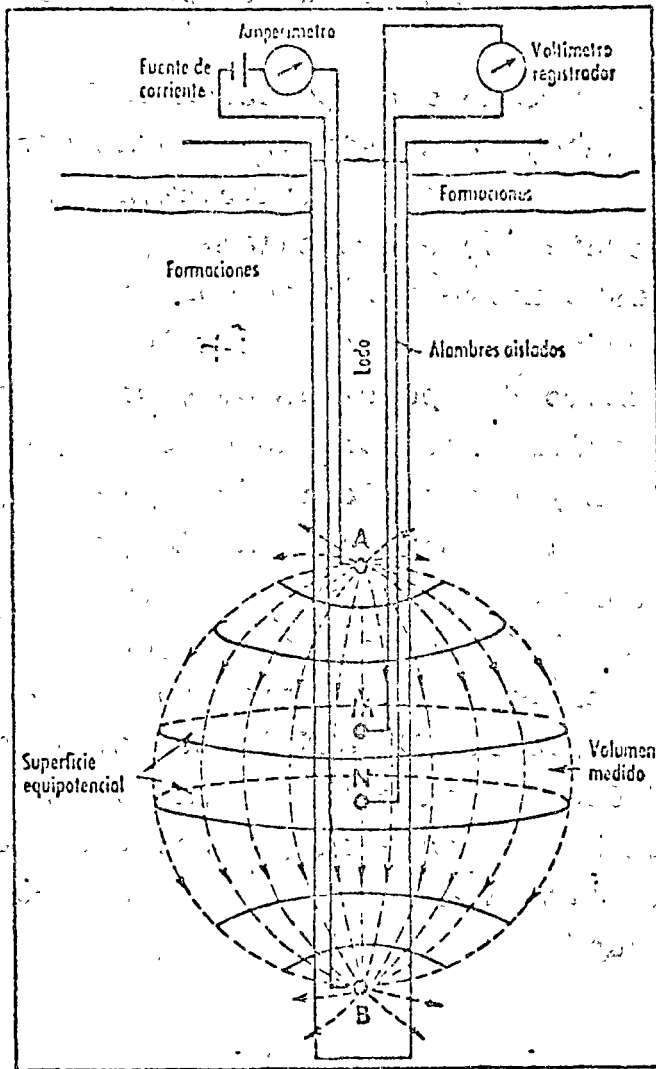
Si se tuviese el mismo volumen de roca y la misma corriente, pero una diferencia de potencial de 10 volts, la resistencia en tal caso será:  $\frac{10 \text{ volts}}{1 \text{ ampere}} = 10 \text{ ohms}$  y la resistividad igual a:  $10 \text{ ohms} \times \text{m}^2/\text{m}$ , que puede expresarse más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



MEDECION 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.

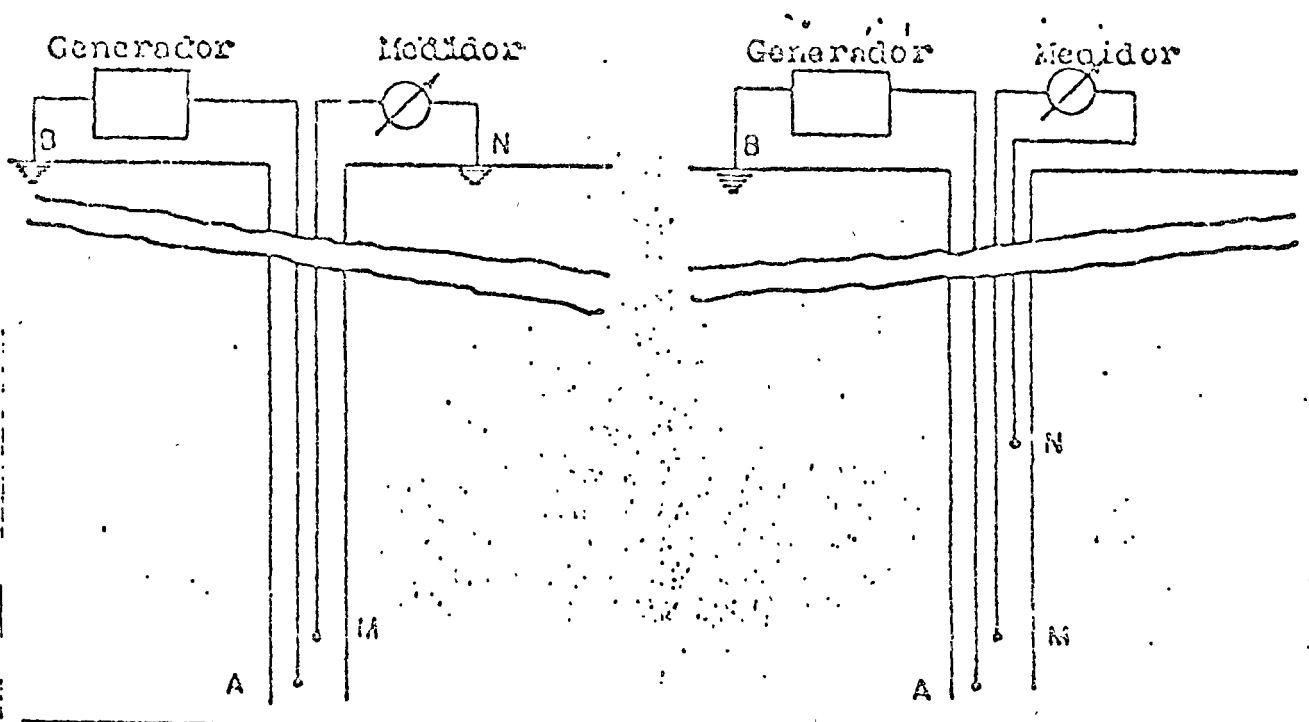


Los dispositivos usados para medir la resistividad, comúnmente llamados sondas, consisten fundamentalmente de un cable conductor múltiple que en el extremo que se introduce al pozo quedan dentro de un cilindro metálico, con orificios a ciertas distancias, en los cuales se localizan los electrodos. Con 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 NOMINAL.- 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 fué 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.

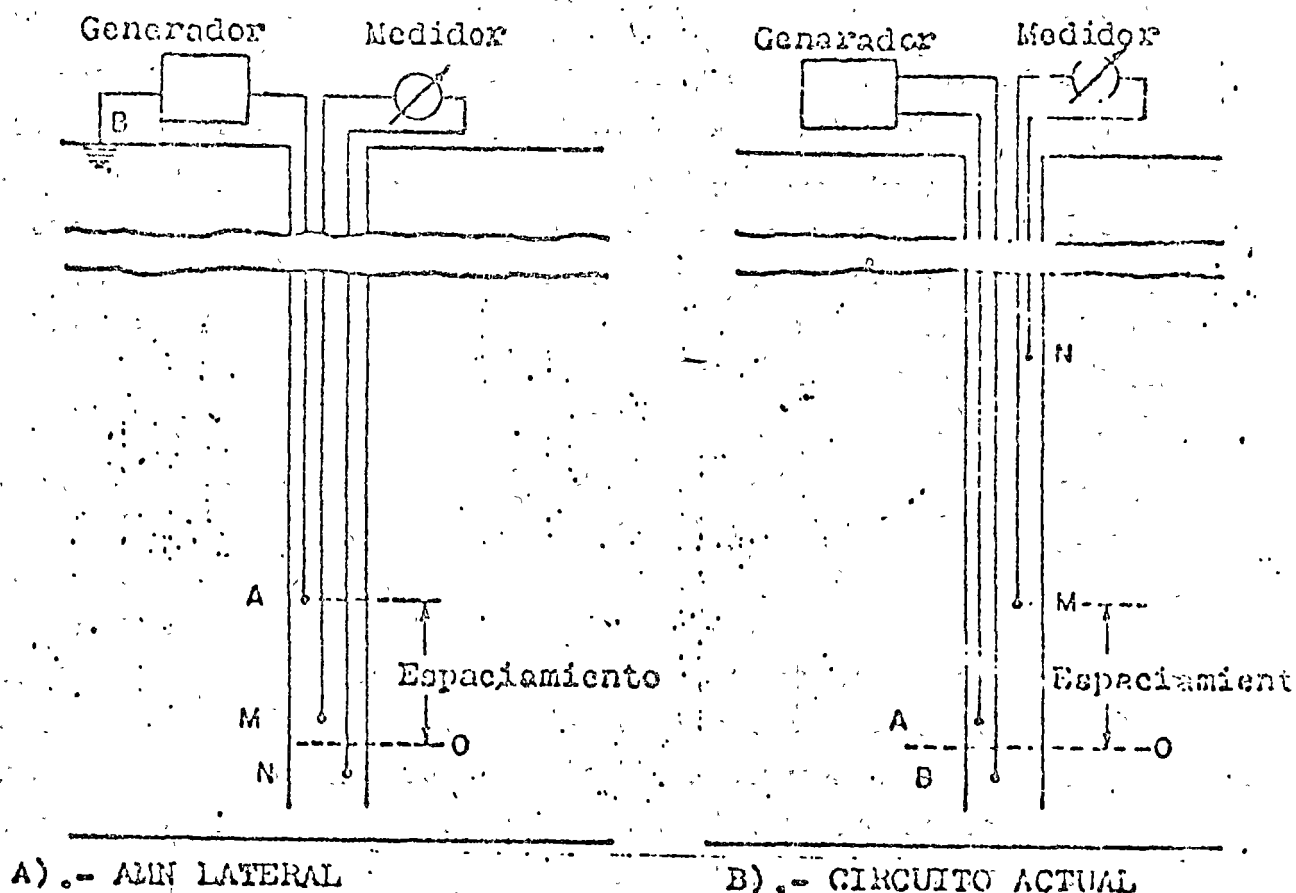


Figura 7

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 ventajoso.

Tipo de sonda	espaciamento	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 volumen 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.

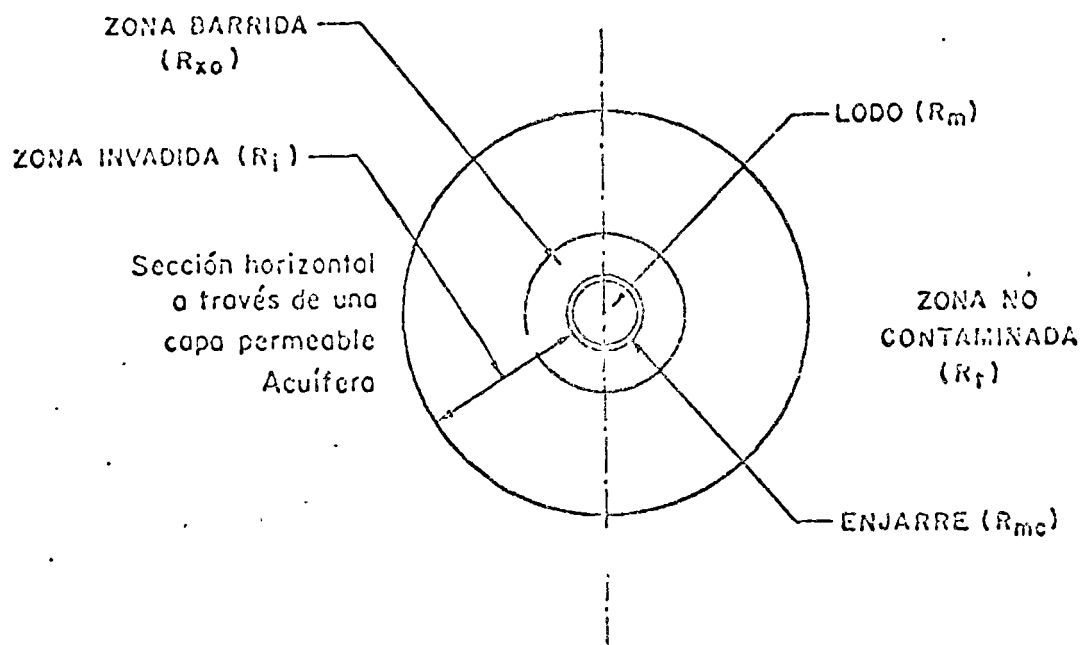
En los intervalos permeables atravesados, la presión del lodo hace que se forme una película con las partículas en suspensión y penetre en la roca agua constituyente del lodo, que recibe el nombre de filtrado del lodo. El agua ó filtrado del lodo que penetra en la formación permeable, puede ser de distinta 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 puede 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 compuestas 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:

$$R_w = k/ppm \quad (3)$$

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  $k=6500 \pm 25\%$

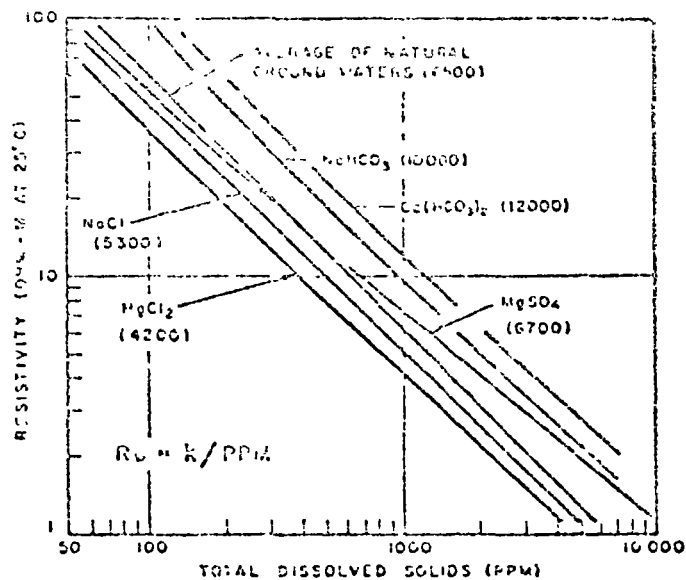


Fig. 1 - Solution resistivity vs. total dissolved solids at 25° C. Figures in parenthesis are k values. (After Agriculture Handbook 60, USDA).

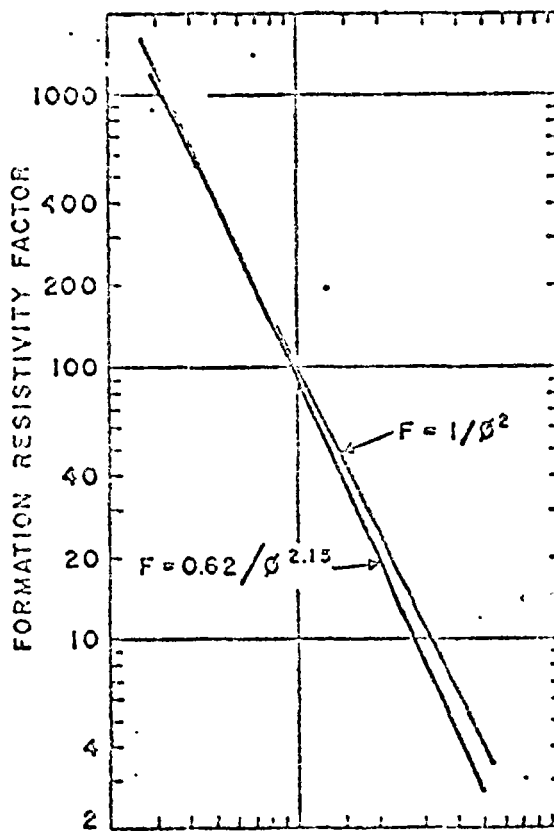
Para rocas granulares limpias, que tienen una porosidad mayor del 10 por ciento, A y m tienen los siguientes valores:  
rocas poco cementadas ó no cementadas:

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

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.



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 porcentaje 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 rocas 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.

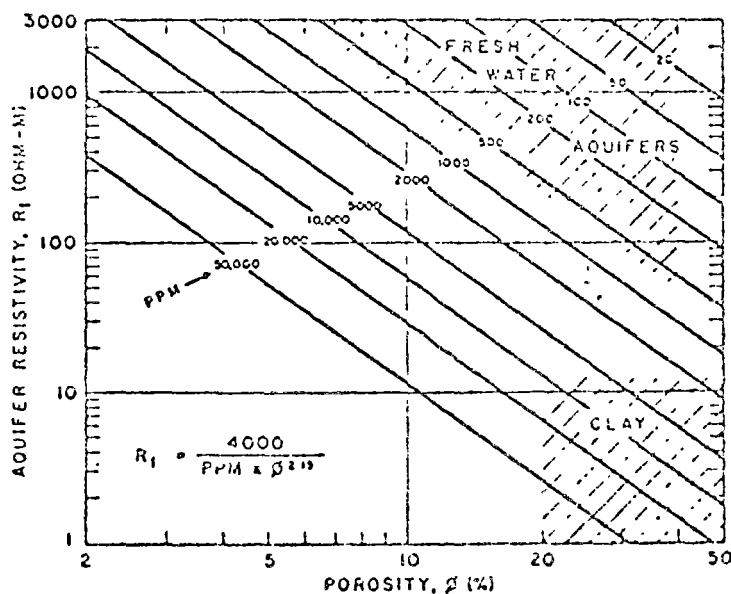


Fig. 3 - Approximate resistivity of granular aquifers vs. porosity for several water salinities.

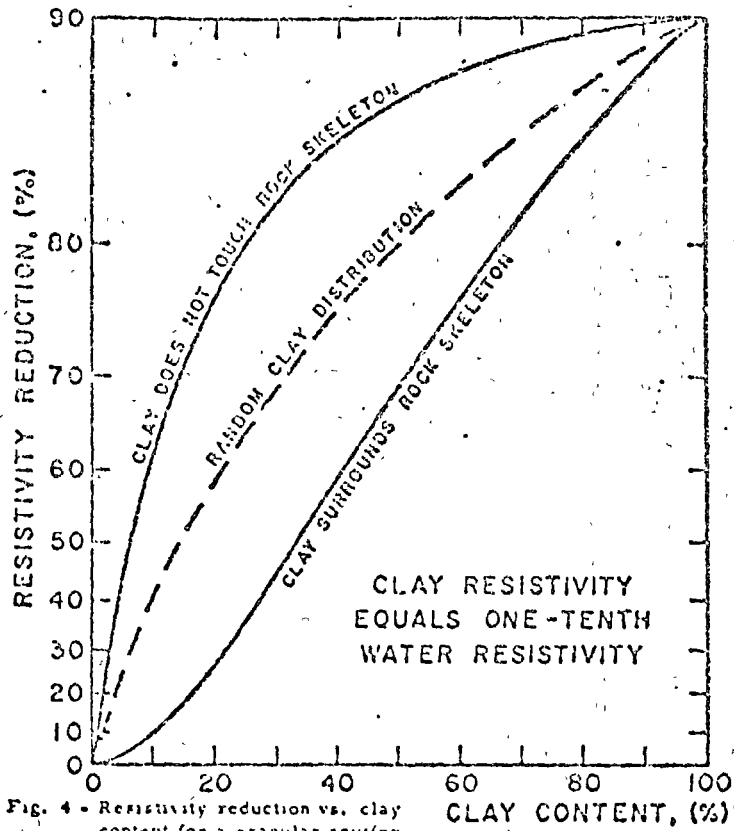
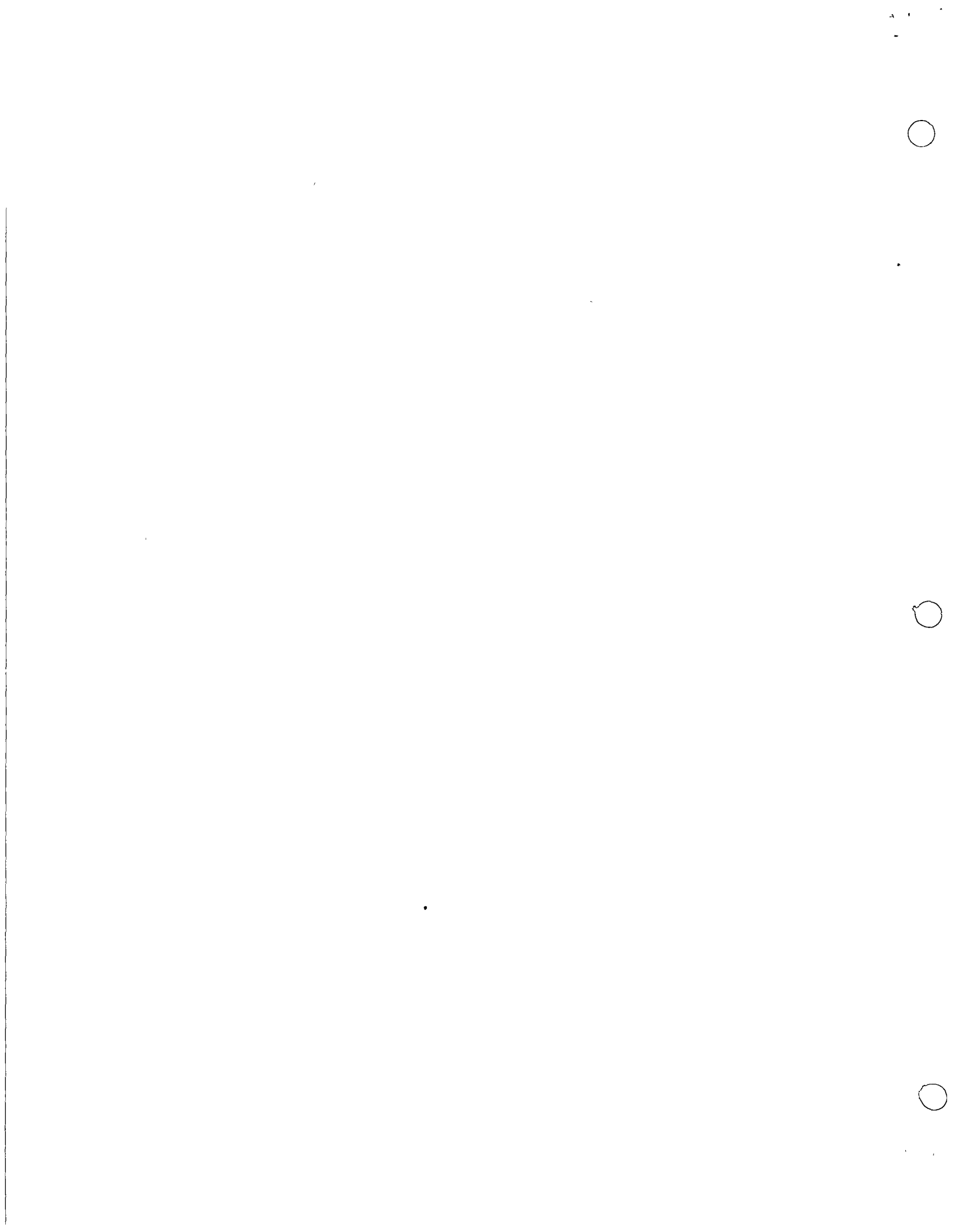


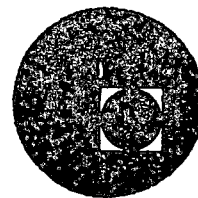
Fig. 4 • Resistivity reduction vs. clay content for a granular aquifer. Clay resistivity is assumed to be one-tenth of water resistivity.



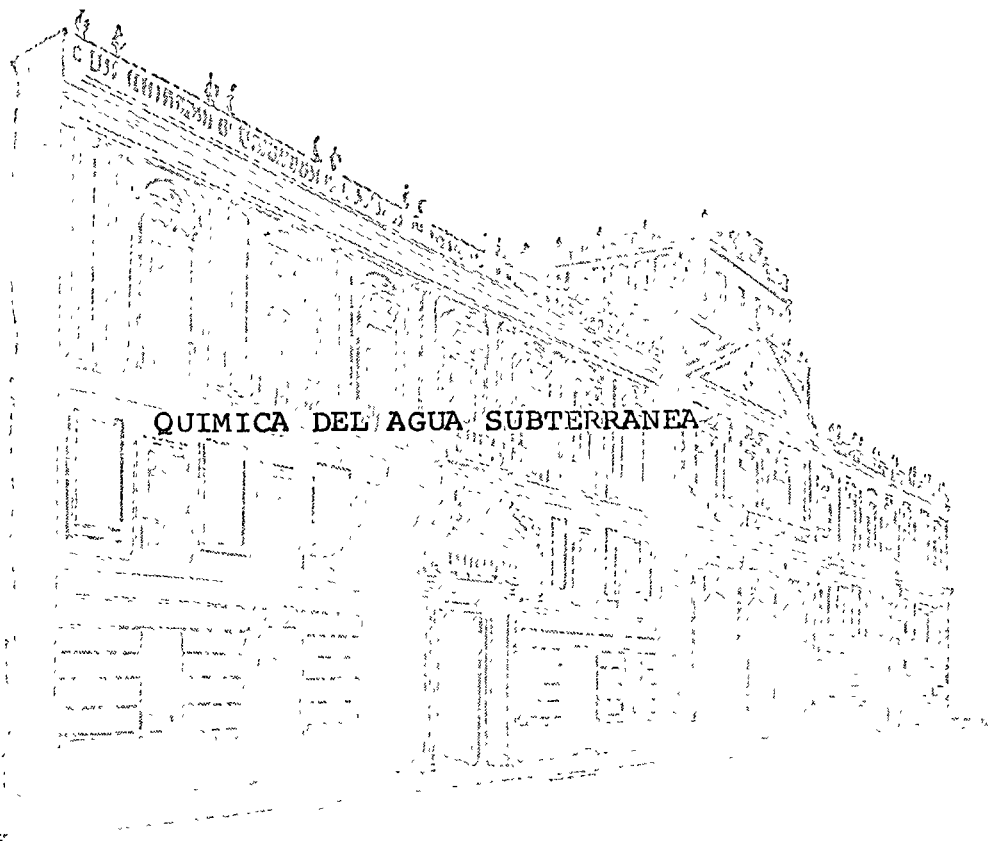




centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUBTERRANEA

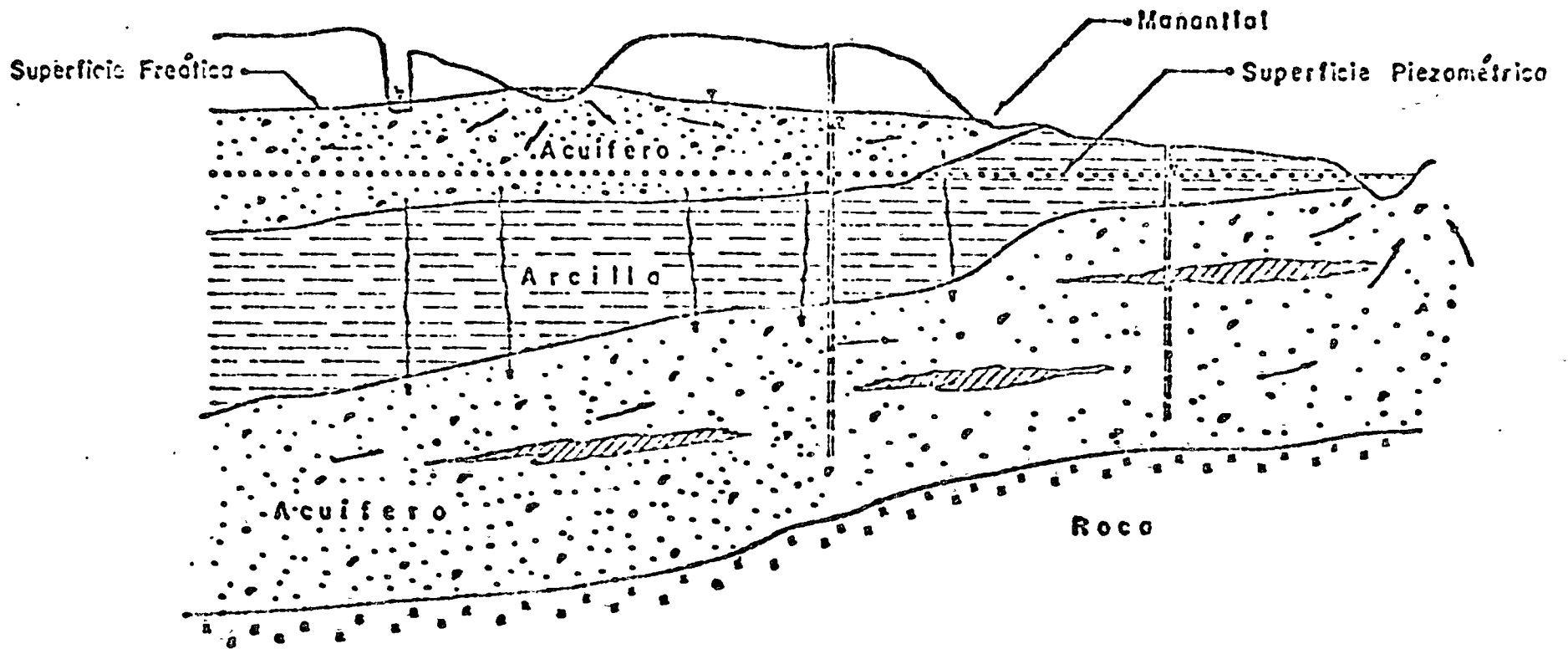


M. EN I. ANTONIO LIST MENDOZA

JULIO DE 1976.



Iny List



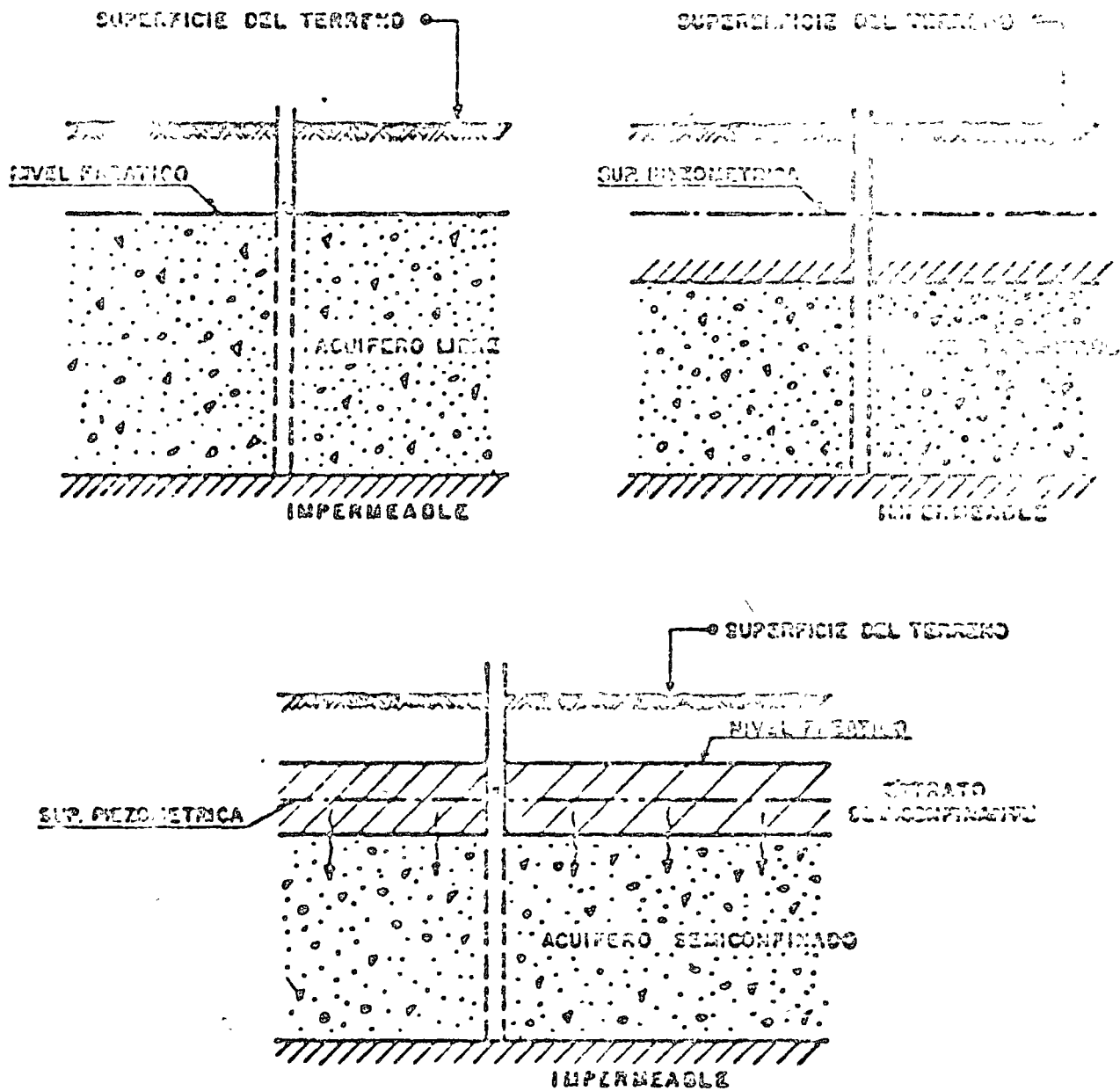


FIGURA No. 2

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LOS DIFERENTES  
TIPOS DE ACUIFEROS

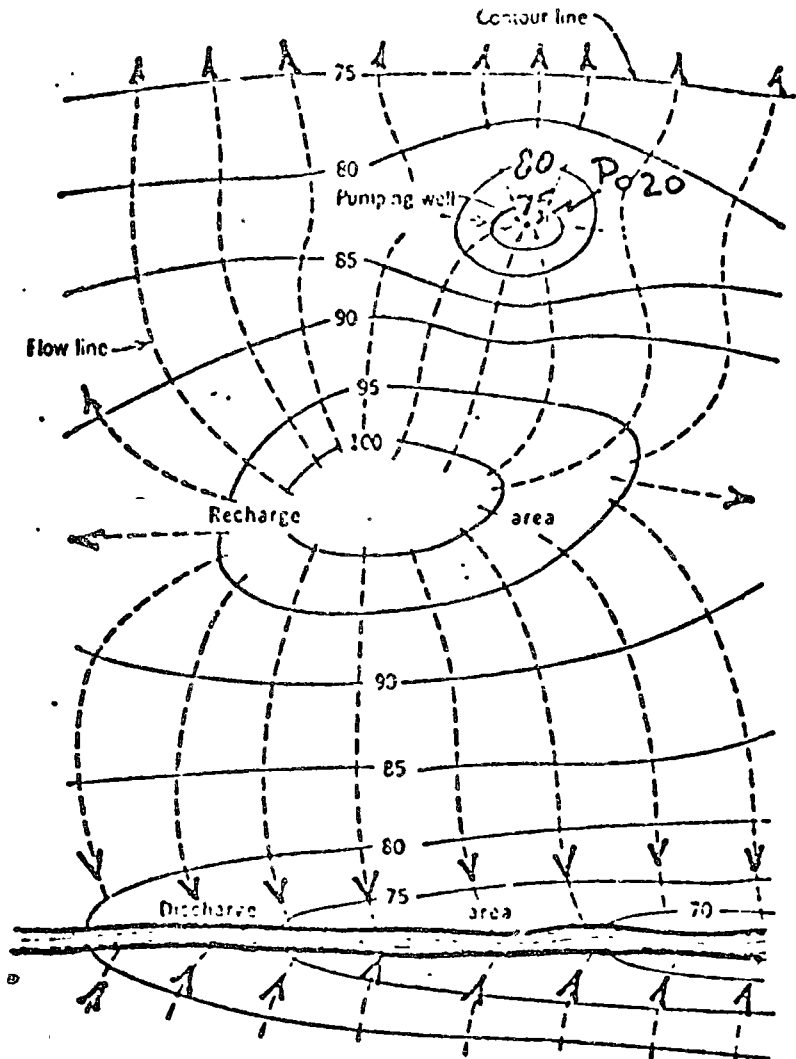


Figure 8.3. Identification of recharge and discharge areas on a map showing water-level contours and flow lines.

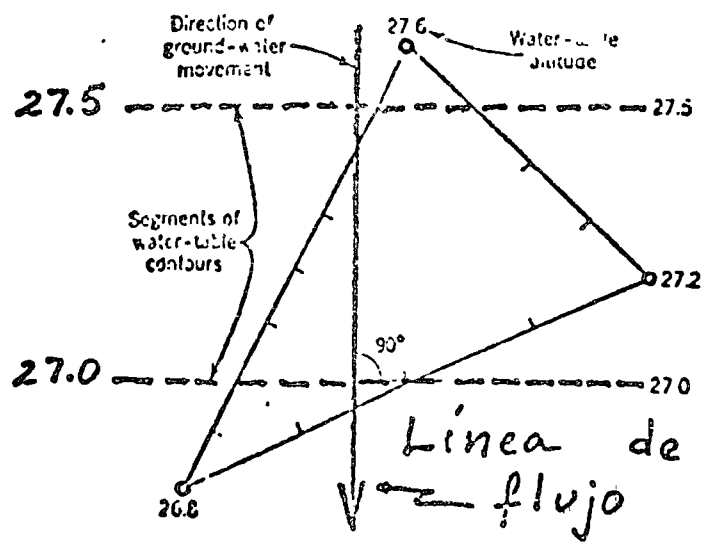
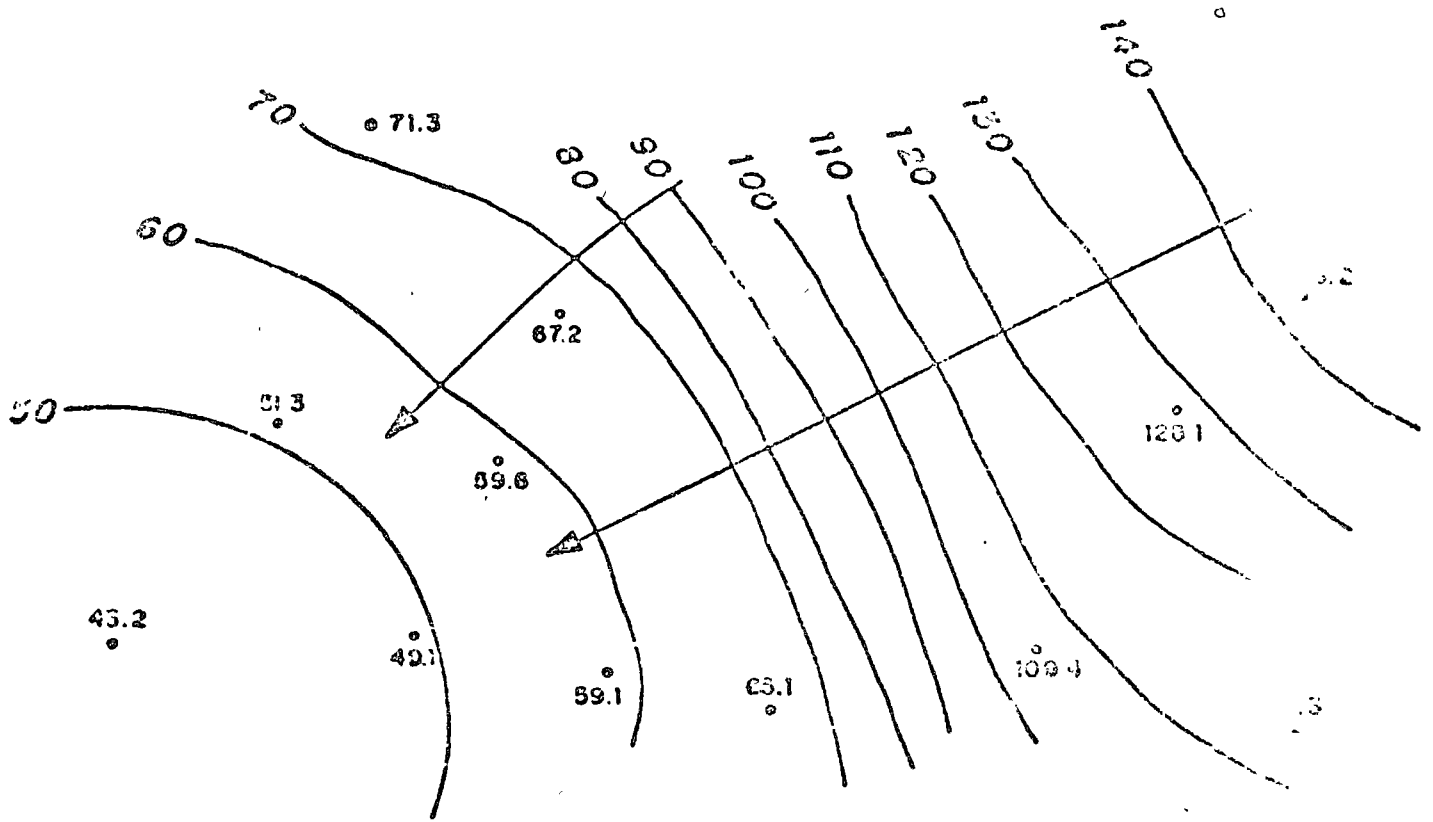
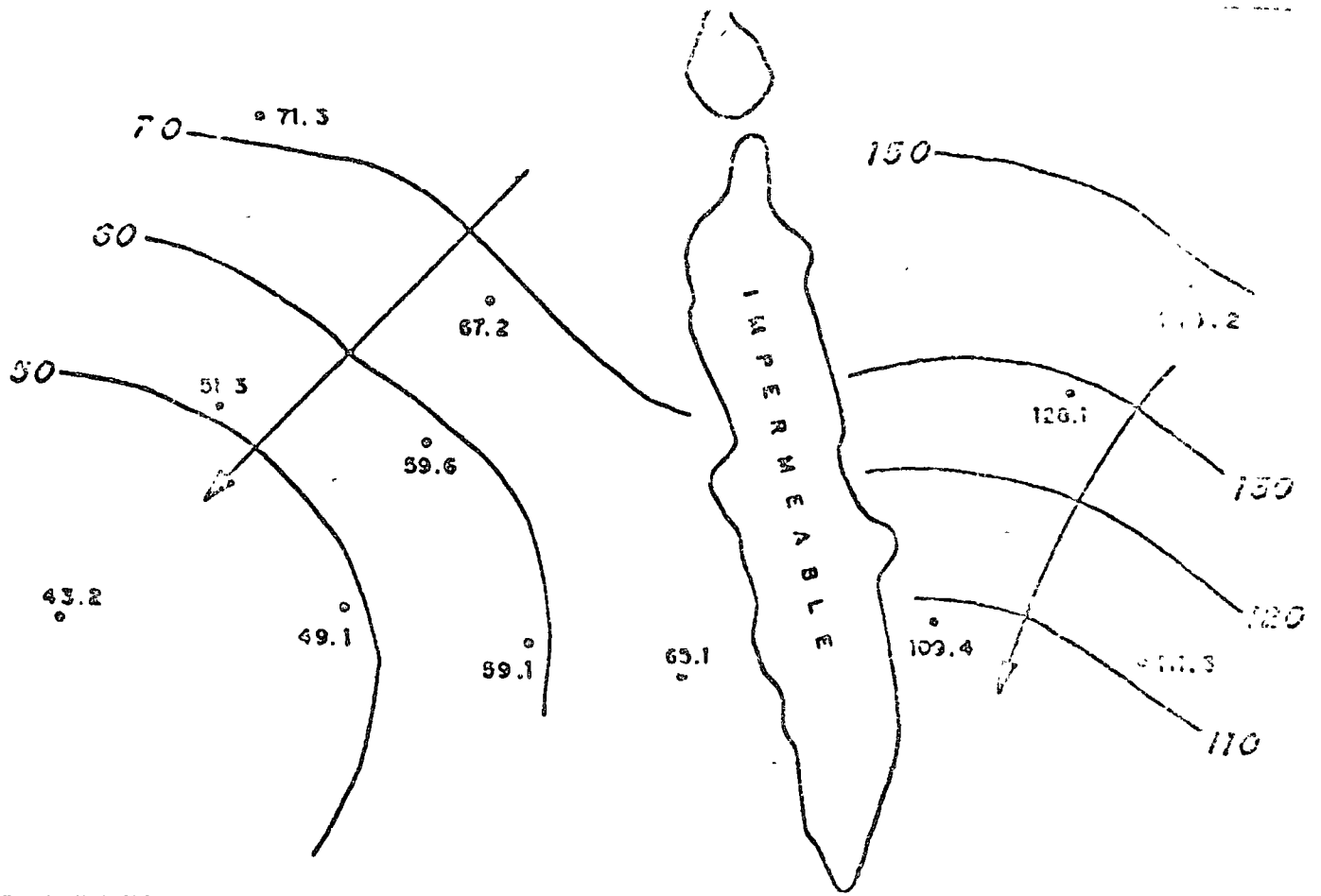
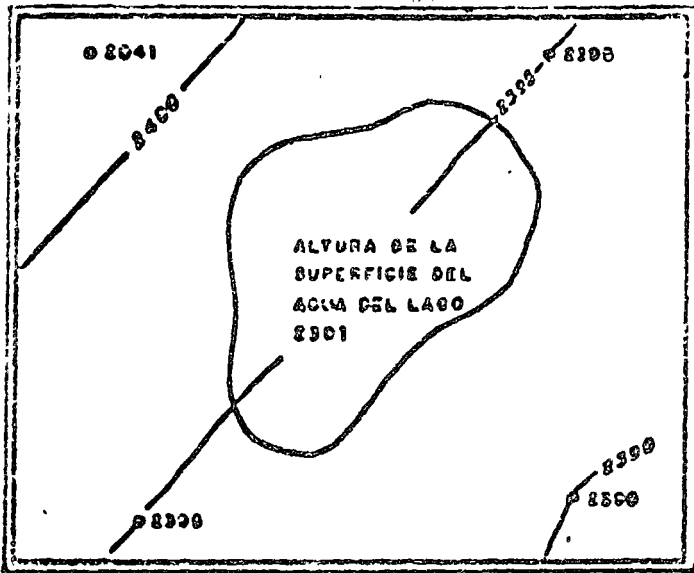
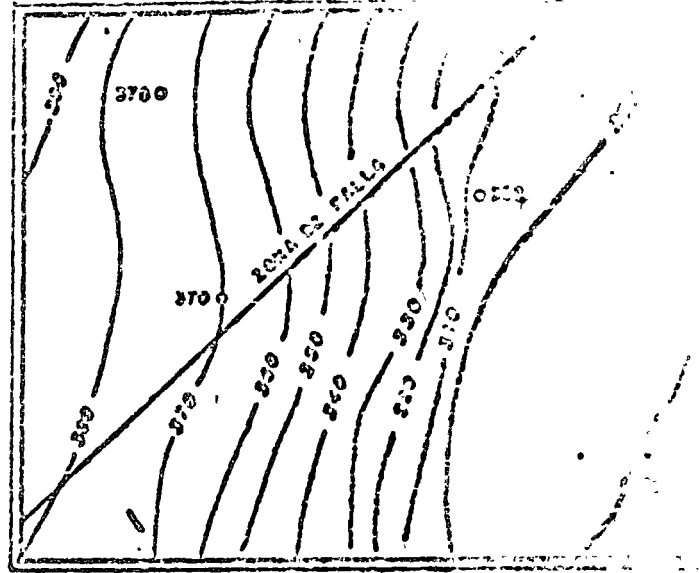


Figure 8.2. Use of water-table attitudes at three wells to determine direction of groundwater movement.



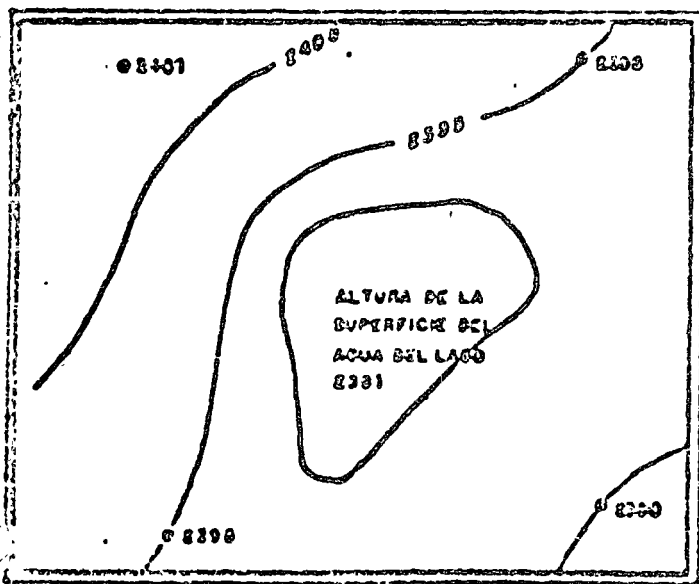


INCORRECTO

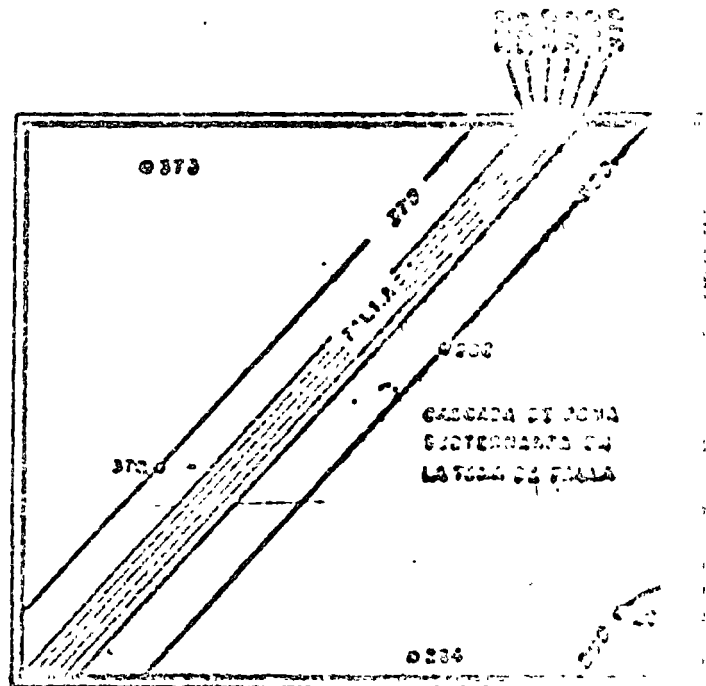


INCORRECTO

FIG.- (C) Errores más frecuentes encontrados en los mapas de superficies freáticas en zonas de depresiones topográficas ocupadas por lagos (a) y en zonas con fallas (b)



CORRECTO  
(a)



CORRECTO  
(b)

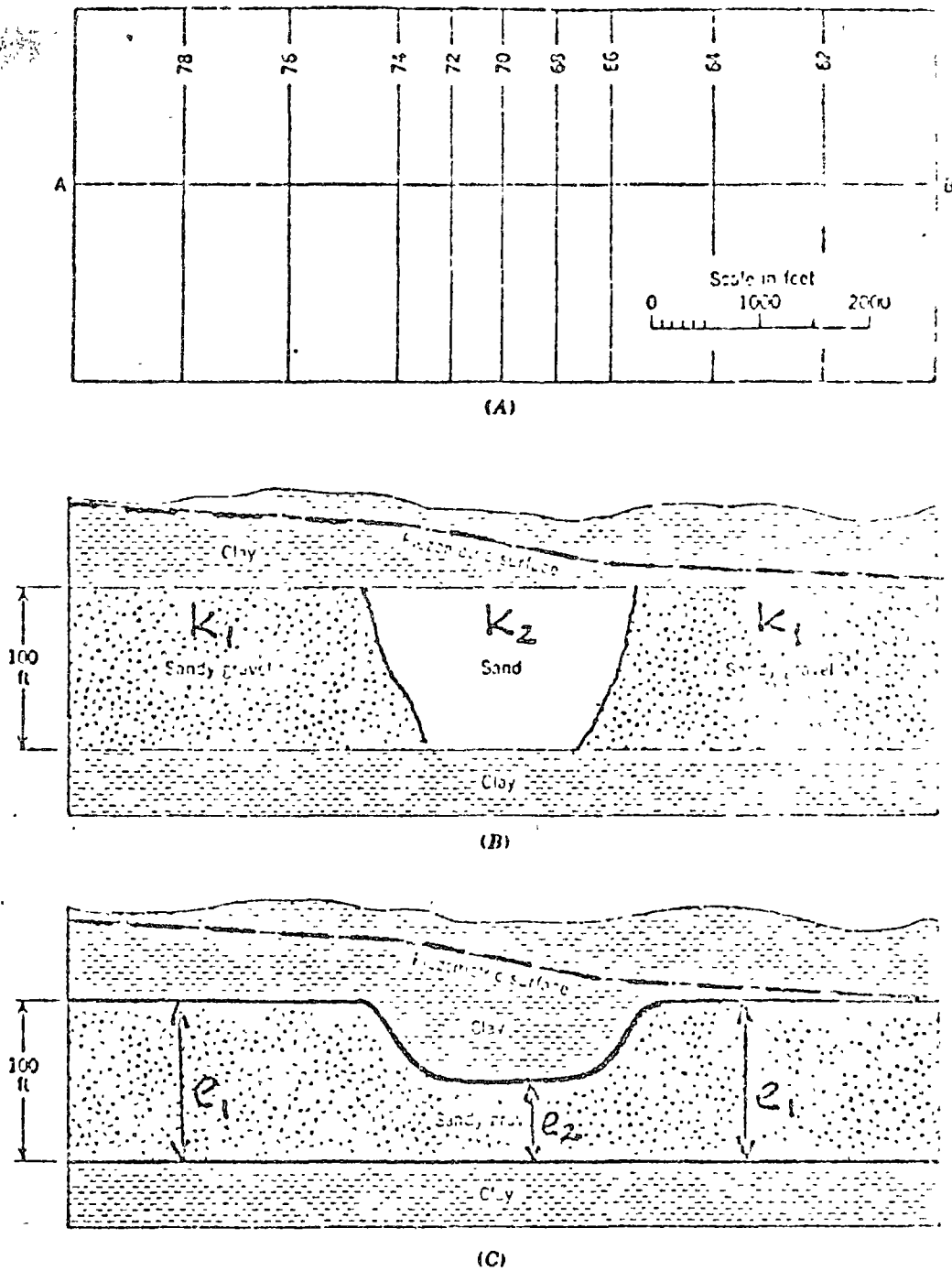
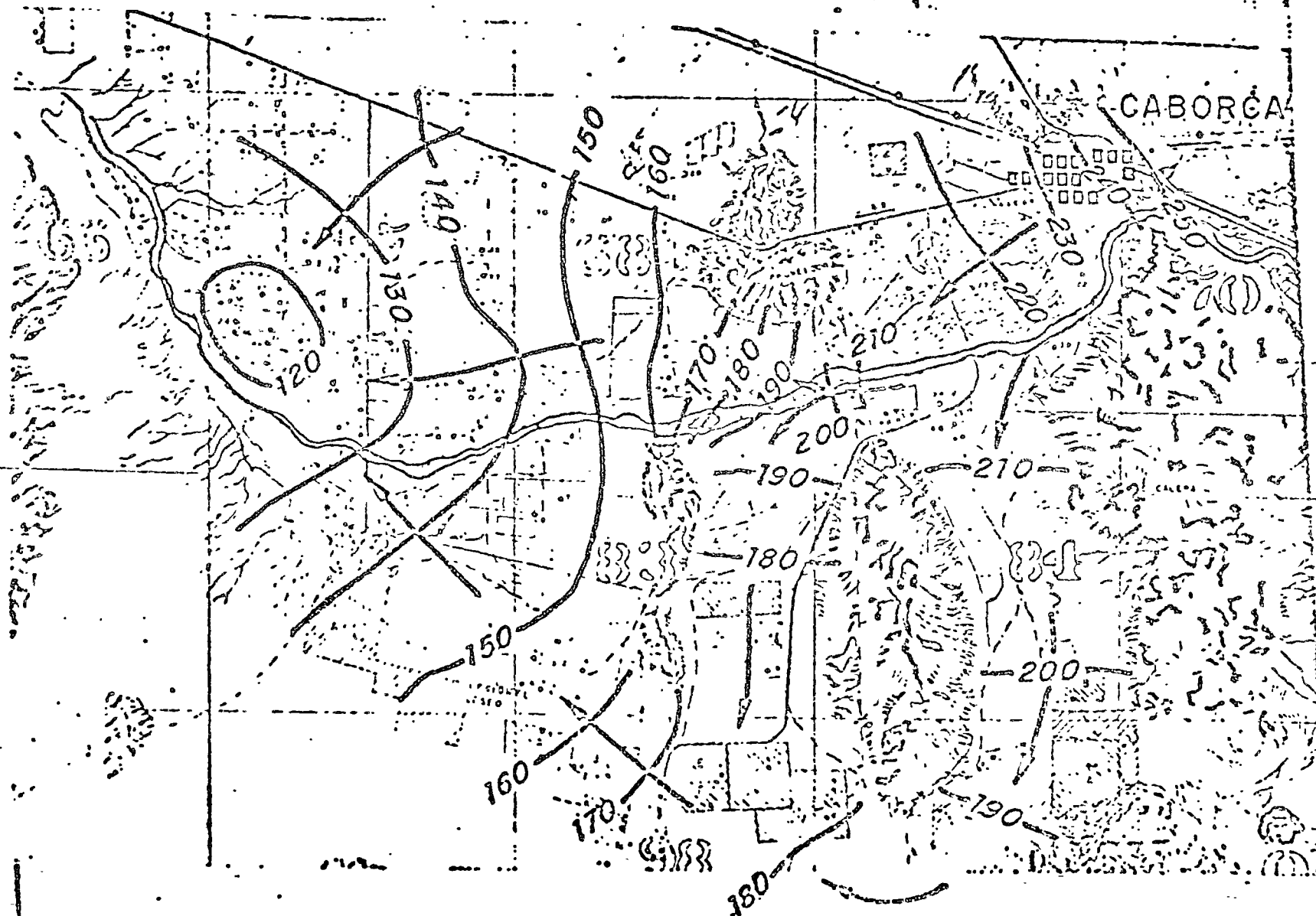


Figure 8.5. The effect of permeability and aquifer thickness on hydraulic gradient. A. Map of piezometric surfaces (contours in feet). B. Cross section illustrating change in permeability (a). C. Cross section illustrating change in thickness (b).

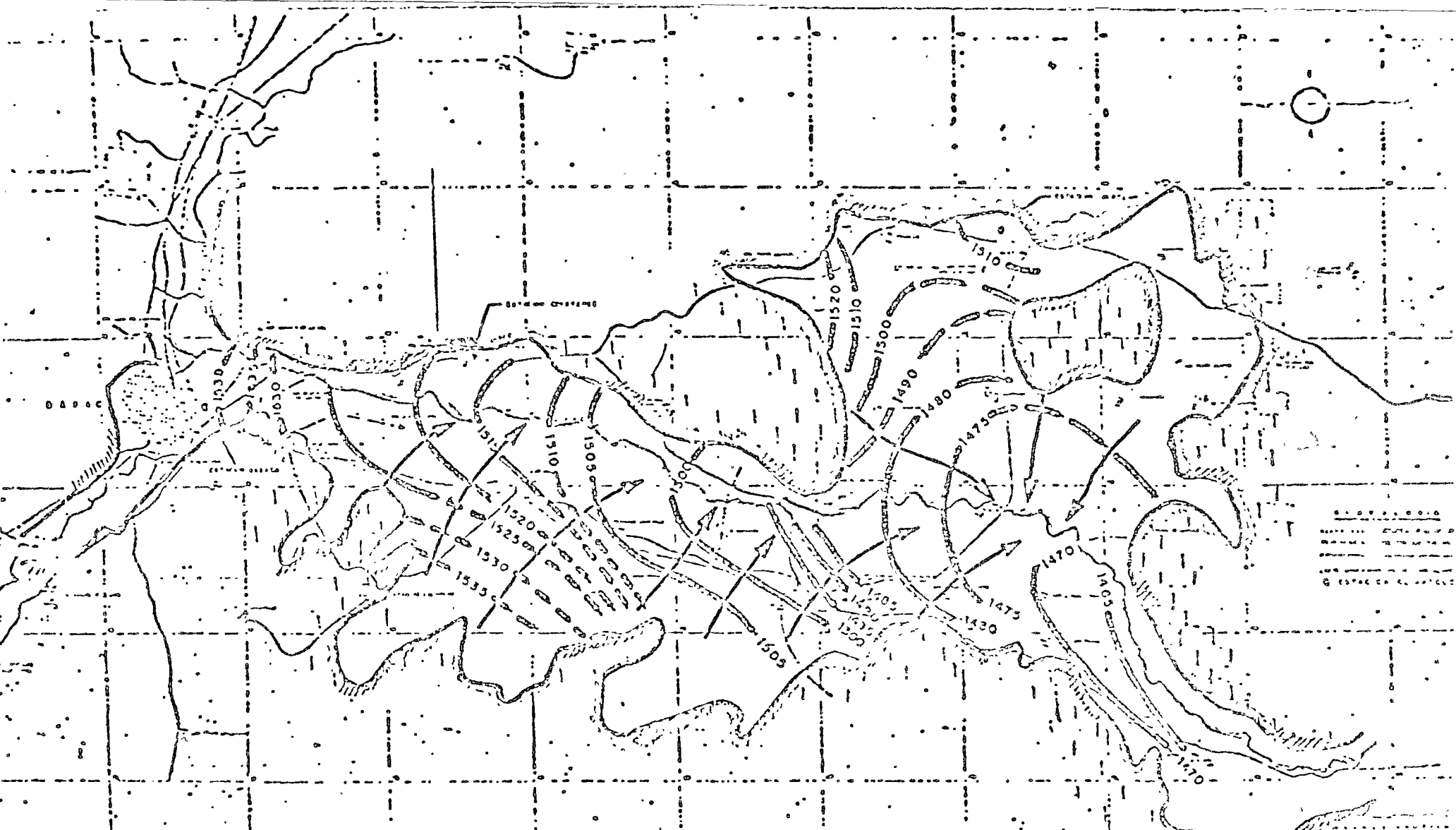
An important part of many ground-water investigations consists of determining the capacity of aquifers to transmit water. As we shall see in Part III, the answer as determined from most of the present quantitative methods is in terms of  $Kb$ .





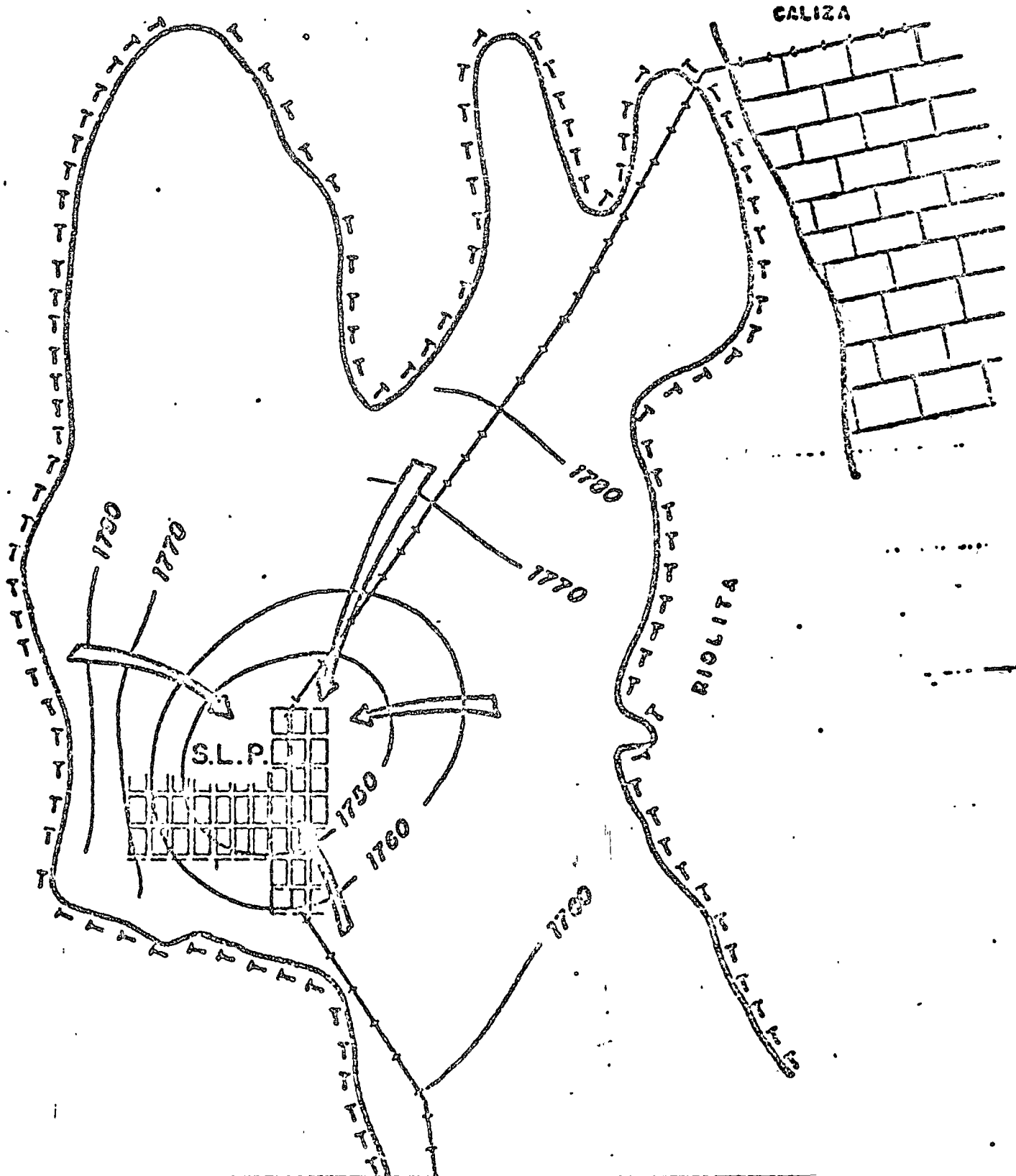
VALLE DE CABORCA.- CONFIGURACION DE NIVELES ESTATICOS 1974

Notese el control geológico sobre la circulación del agua subterránea, el incremento del gradiente en las partes orientales y los efectos del bombeo en la zona de concentración de pozos.

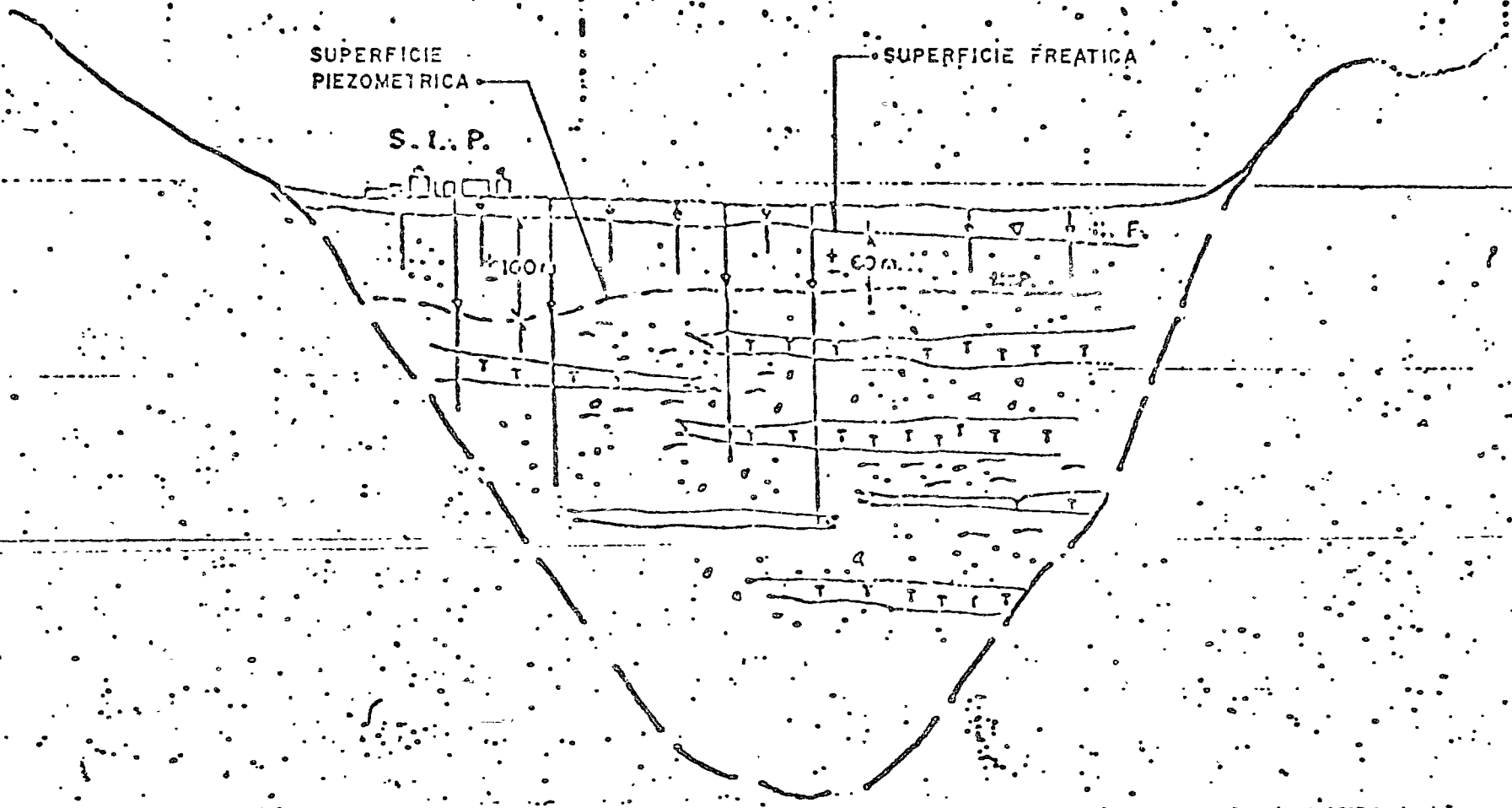


VALLE DE OAXACA.- CONFIGURACION DE NIVELES ESTATICOS EN 1974.- Observese el flujo hacia el río y el incremento del gradiente en los estrechamientos del Valle.

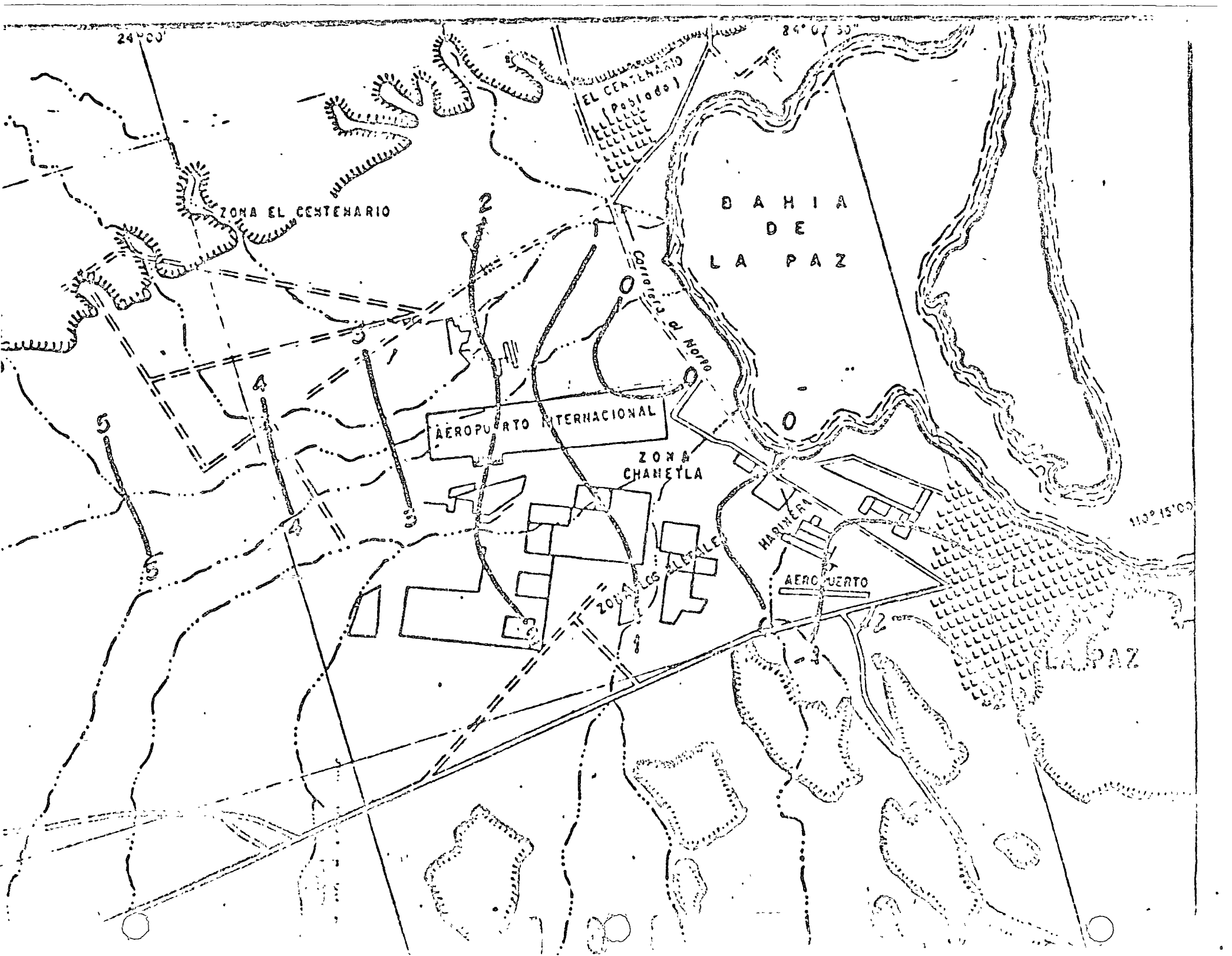
CONFIGURACION DE NIVELES ESTATICOS  
EN DICIEMBRE DE 1971  
ACUIFERO INFERIOR  
( 90 - 350 m )

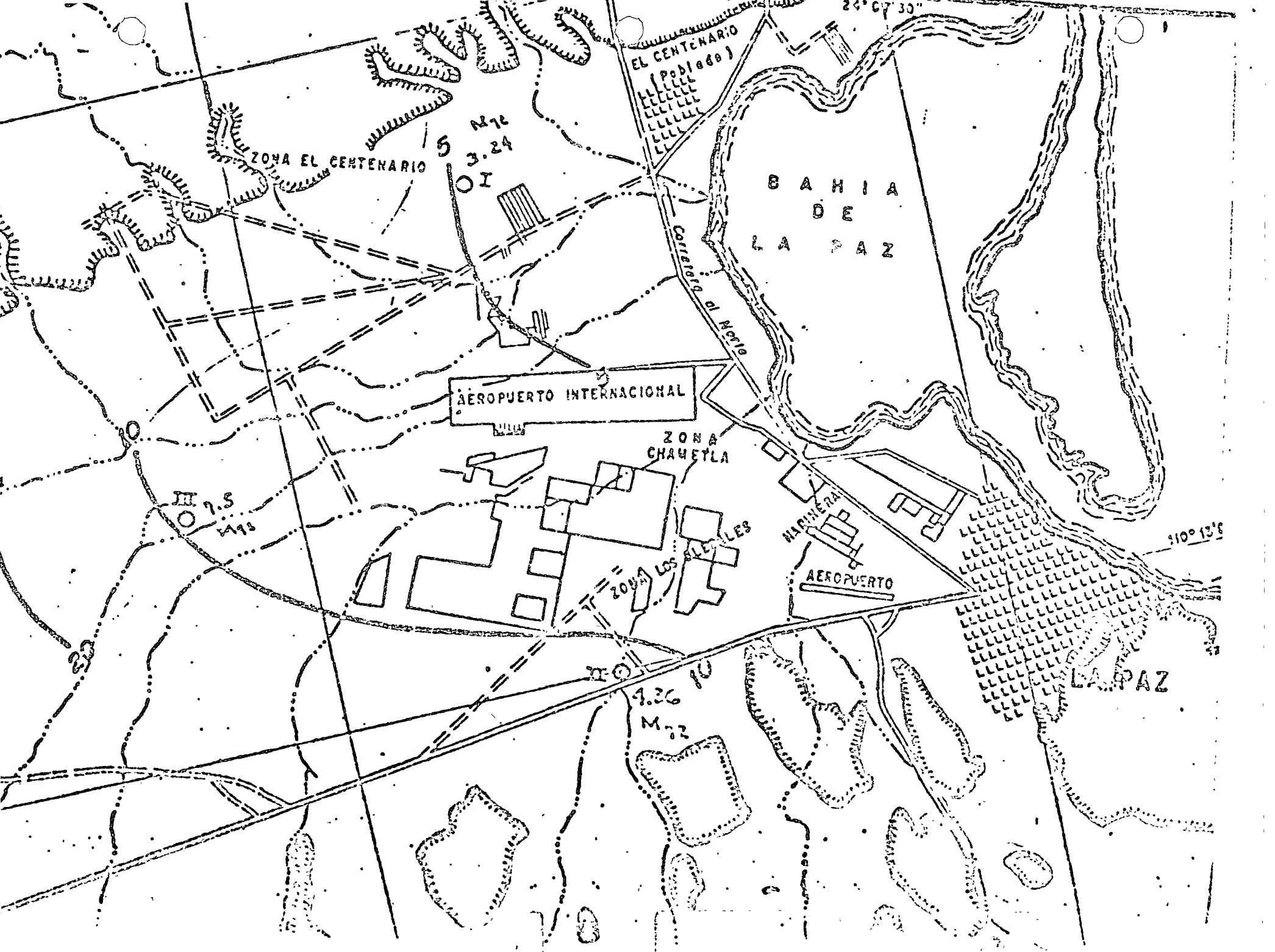




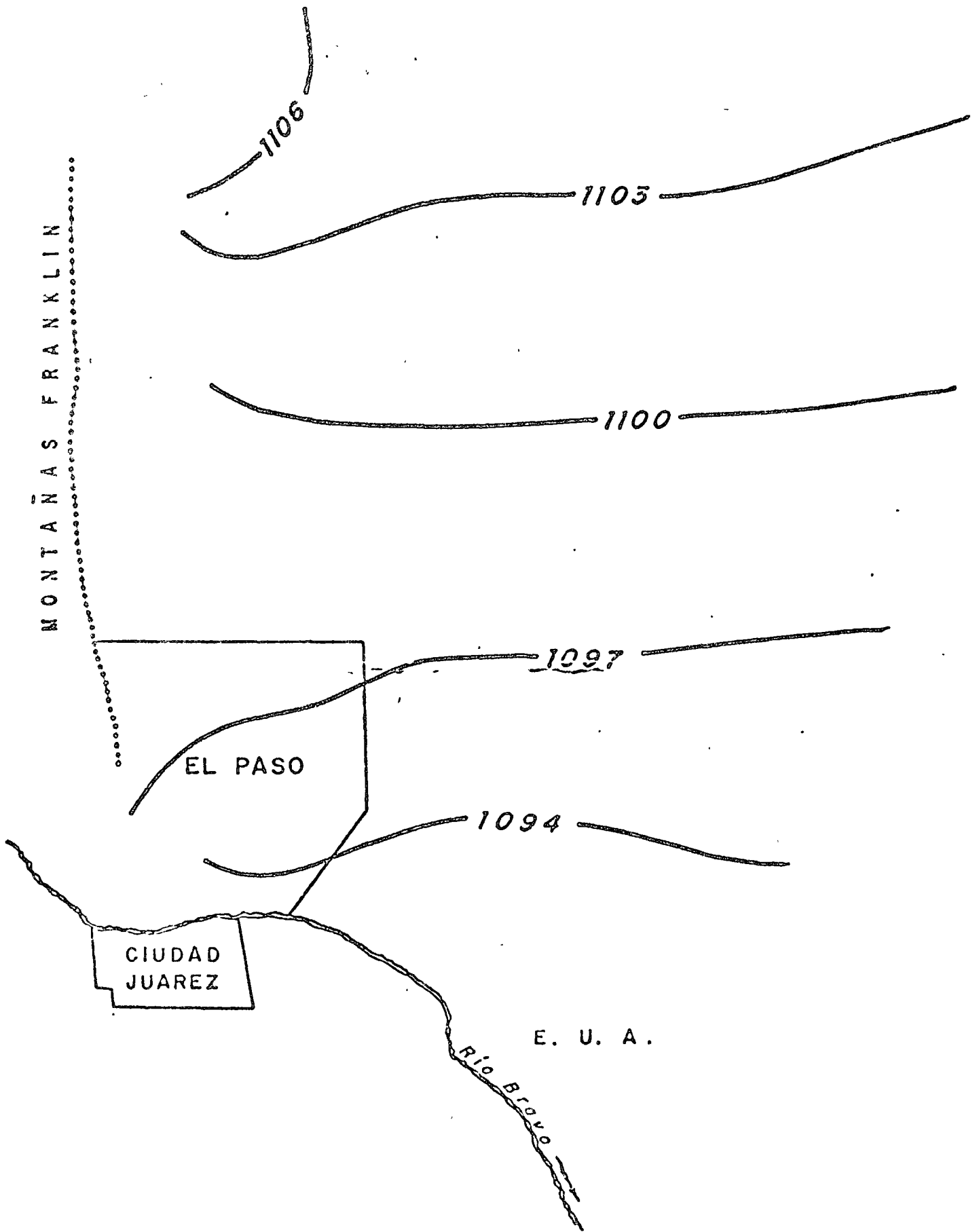


VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ.- CONFIGURACIONES DE NIVELES ESTÁTICOS.- (a).- Acuífero superior (5-80m); (b).- Acuífero inferior (90-350 m); (c).- Perfiles de los niveles de agua.

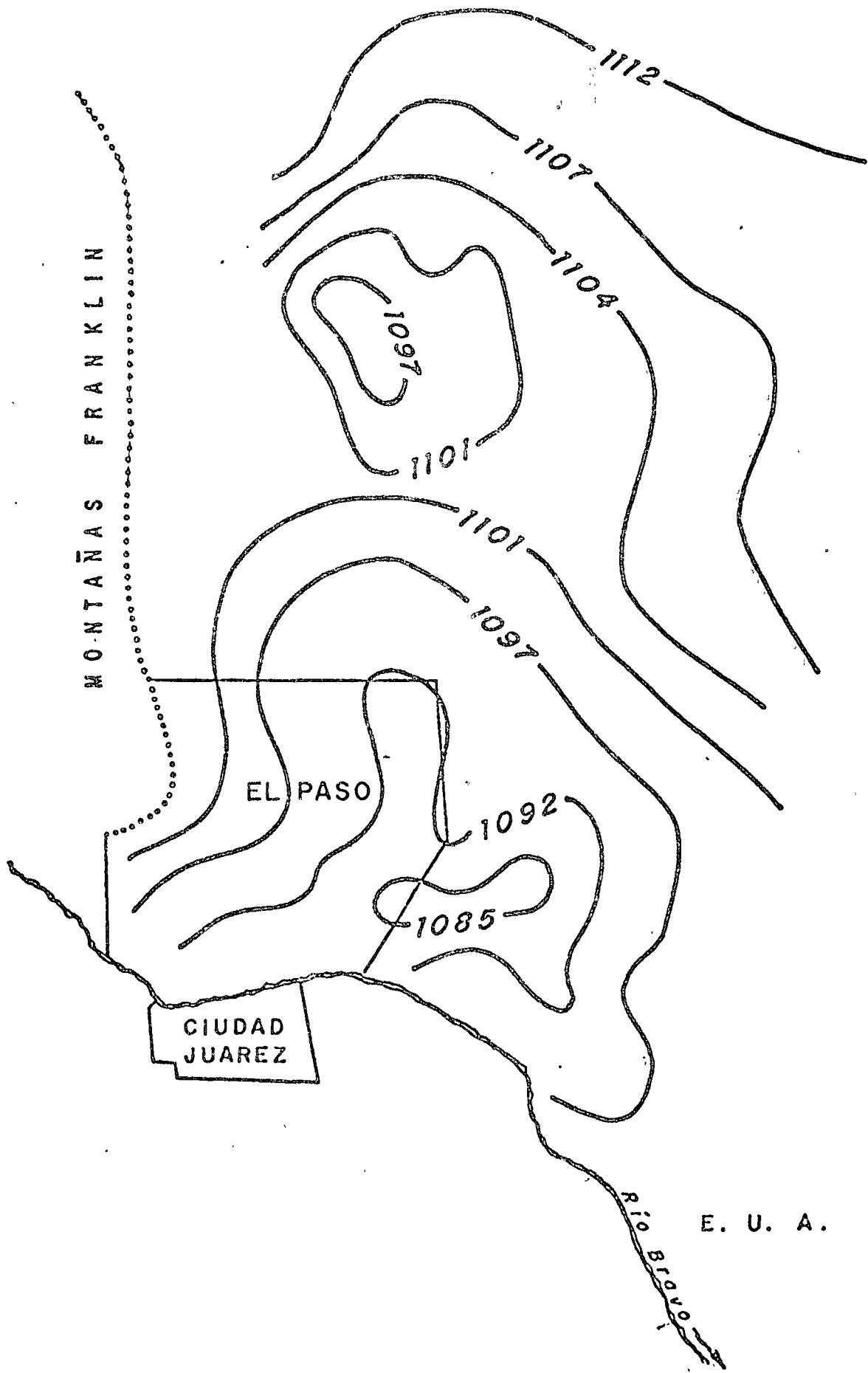




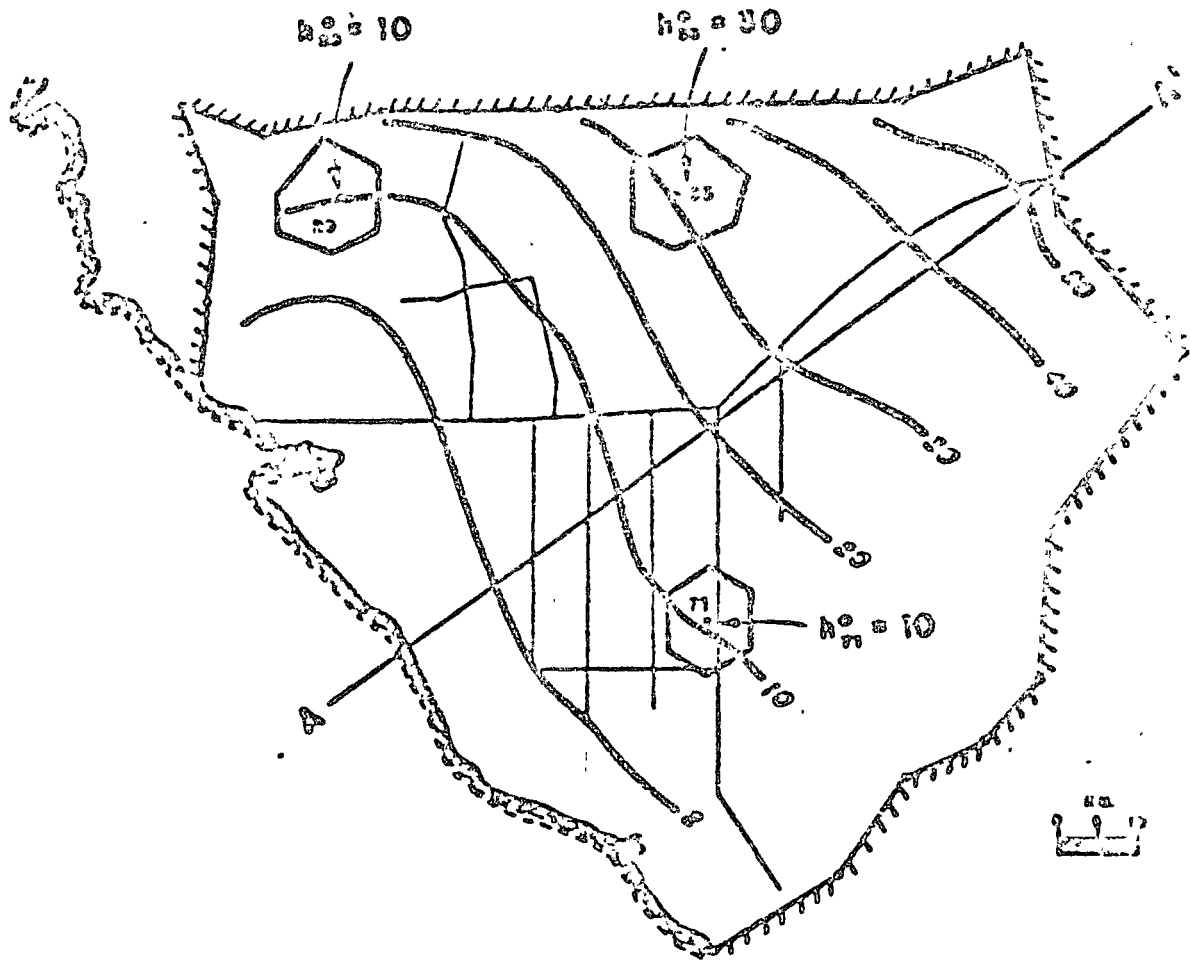
MONTAÑAS FRANKLIN



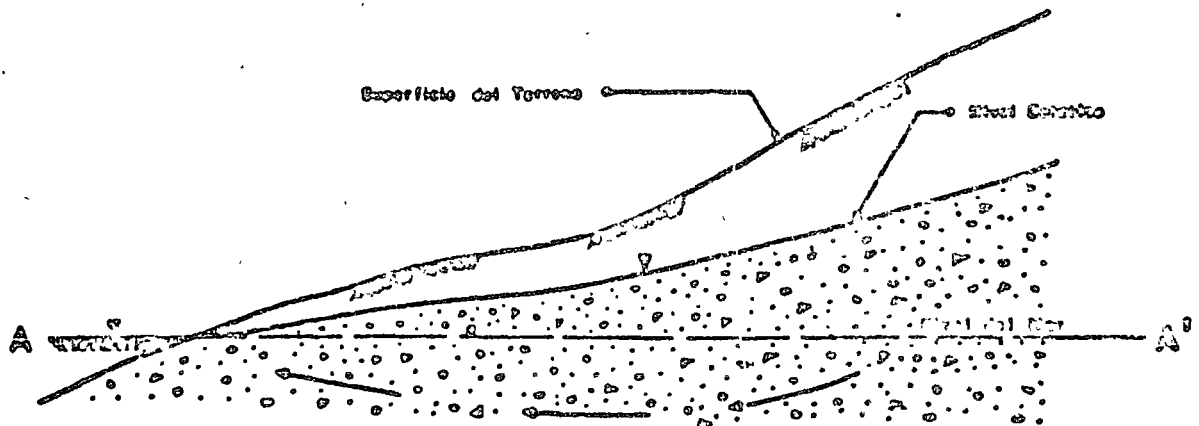


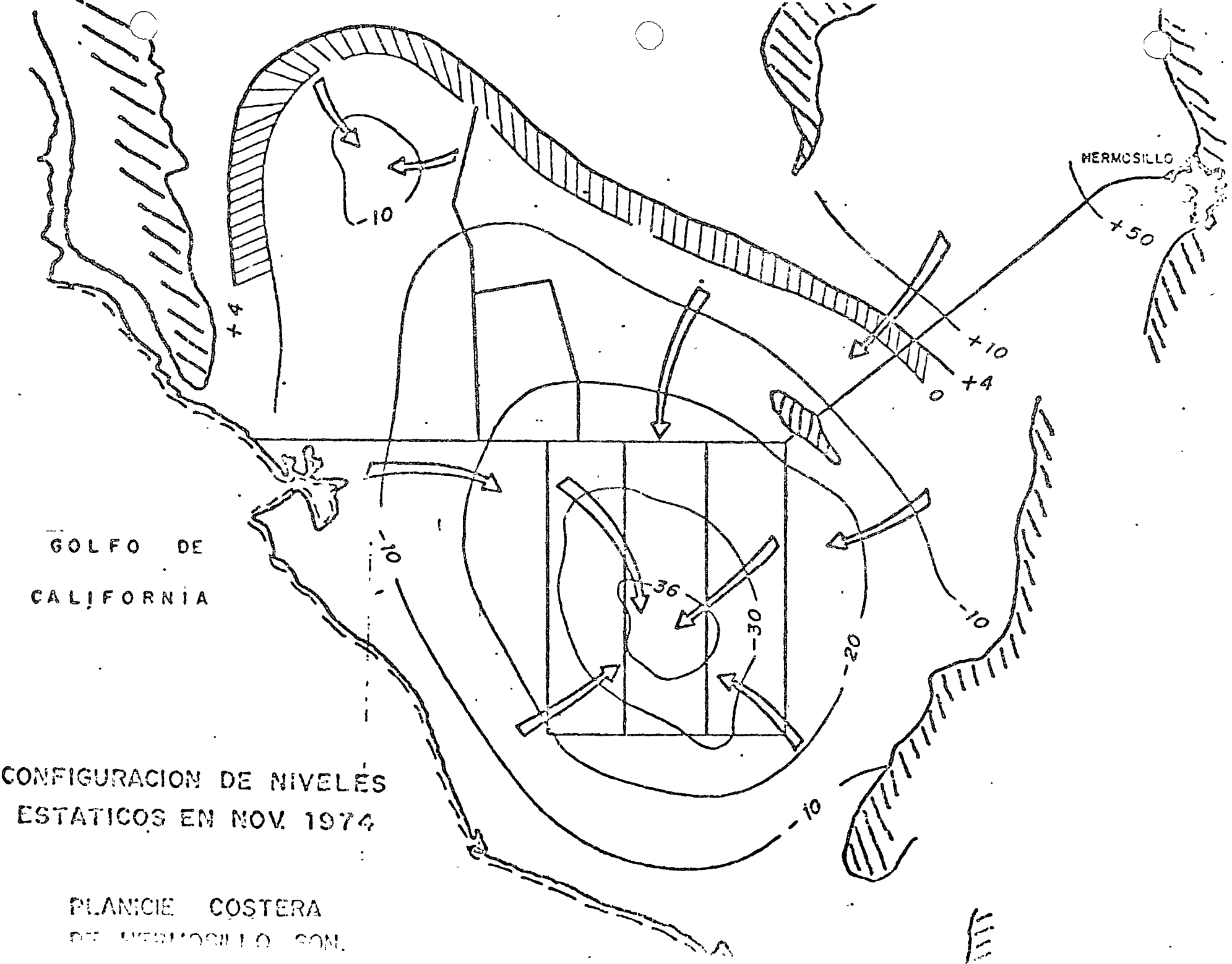


CONFIGURACION DE NIVELES ESTATICOS. ENERO 1970



**CONFIGURACIONES DE NIVELES ESTATICOS EN 1931**  
**( CONDICIONES NATURALES )**





HERMOSILLO

+50

+10

+4

0

-10

+4

GOLFO DE CALIFORNIA

-10

-36

-30

-20

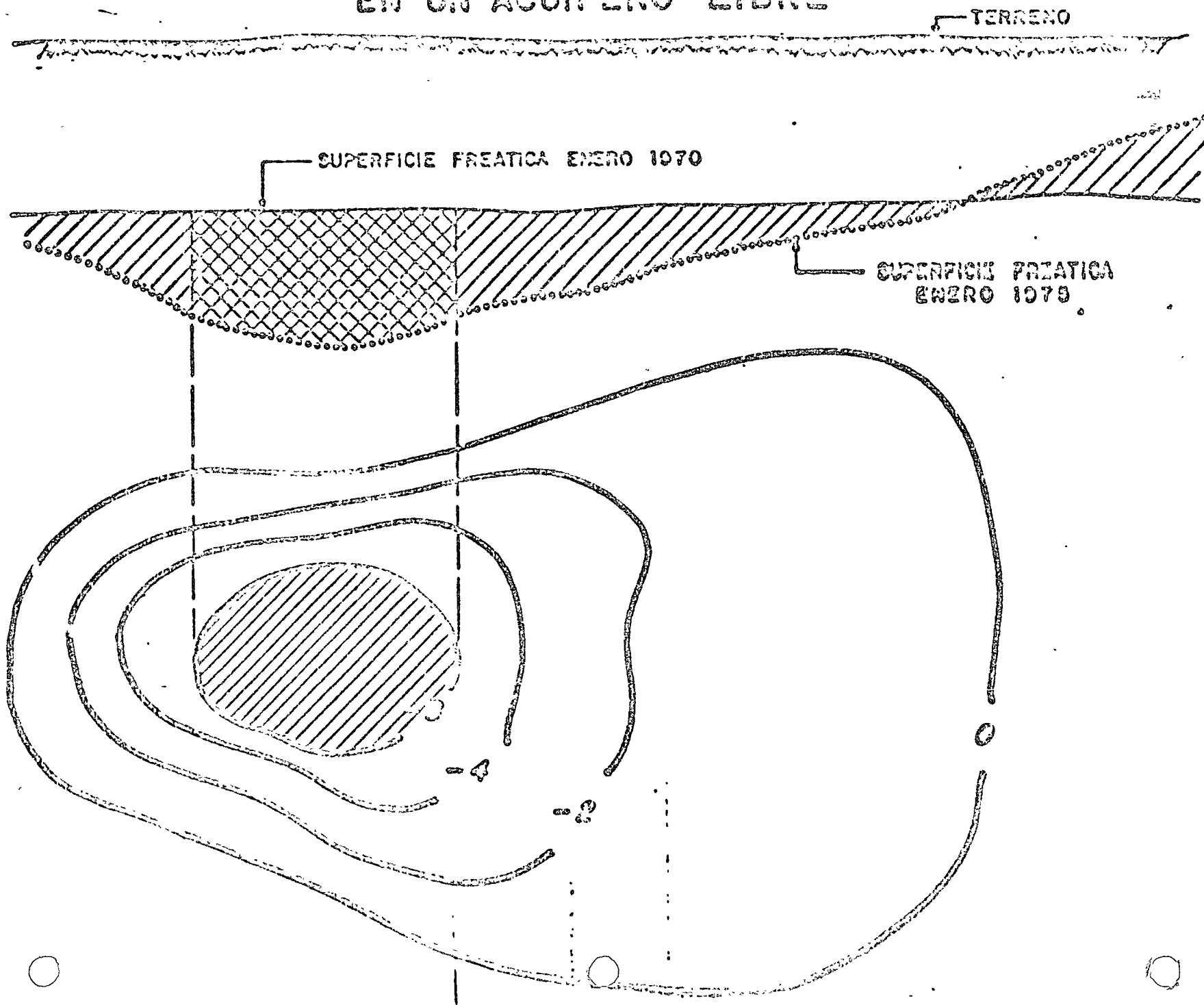
-10

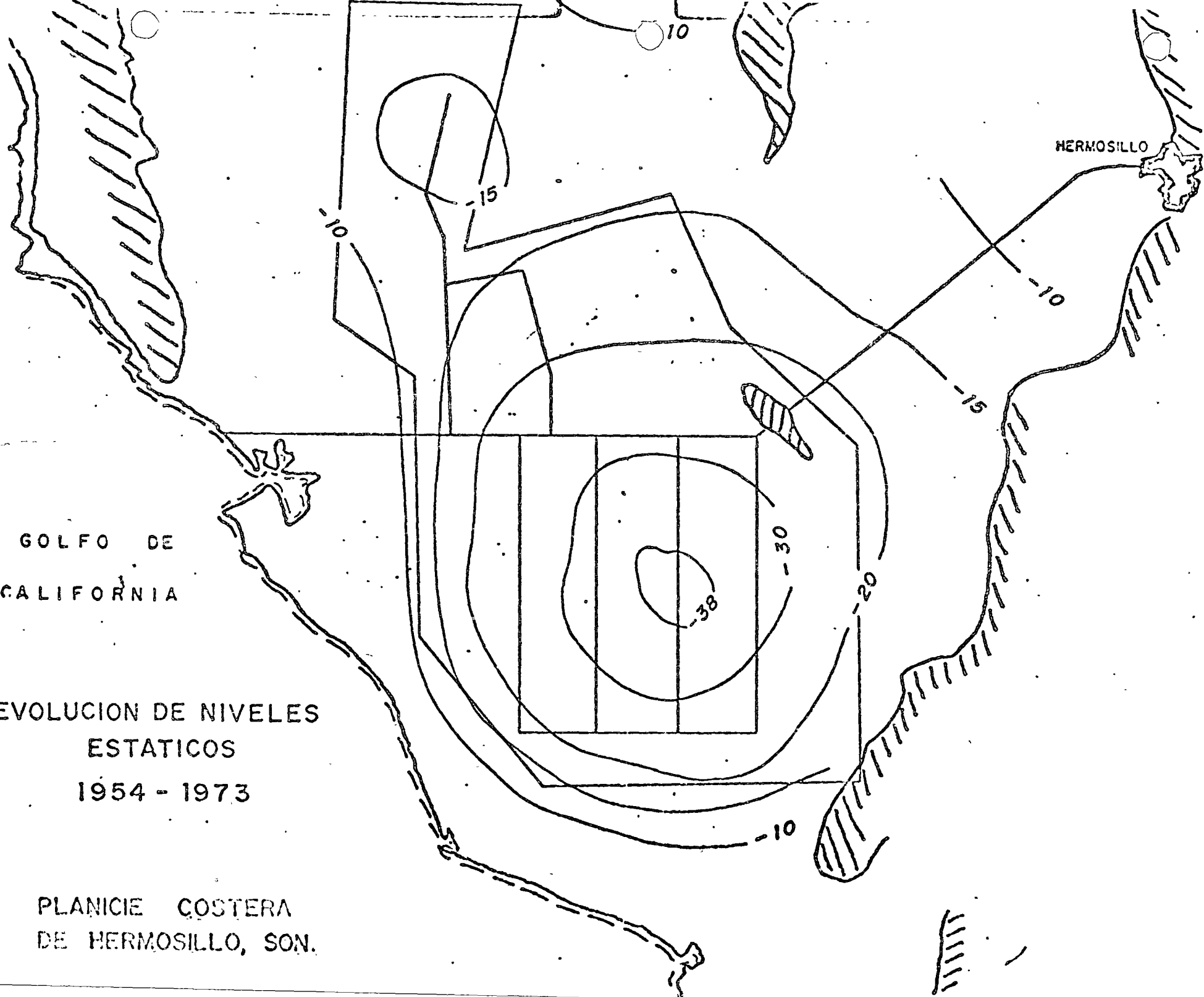
-10

CONFIGURACION DE NIVELES ESTATICOS EN NOV. 1974

PLANICIE COSTERA DE HERMOSILLO, SON.

# CALCULO DE LOS CAMBIOS DE ALMACENAMIENTO EN UN ACUIFERO LIBRE



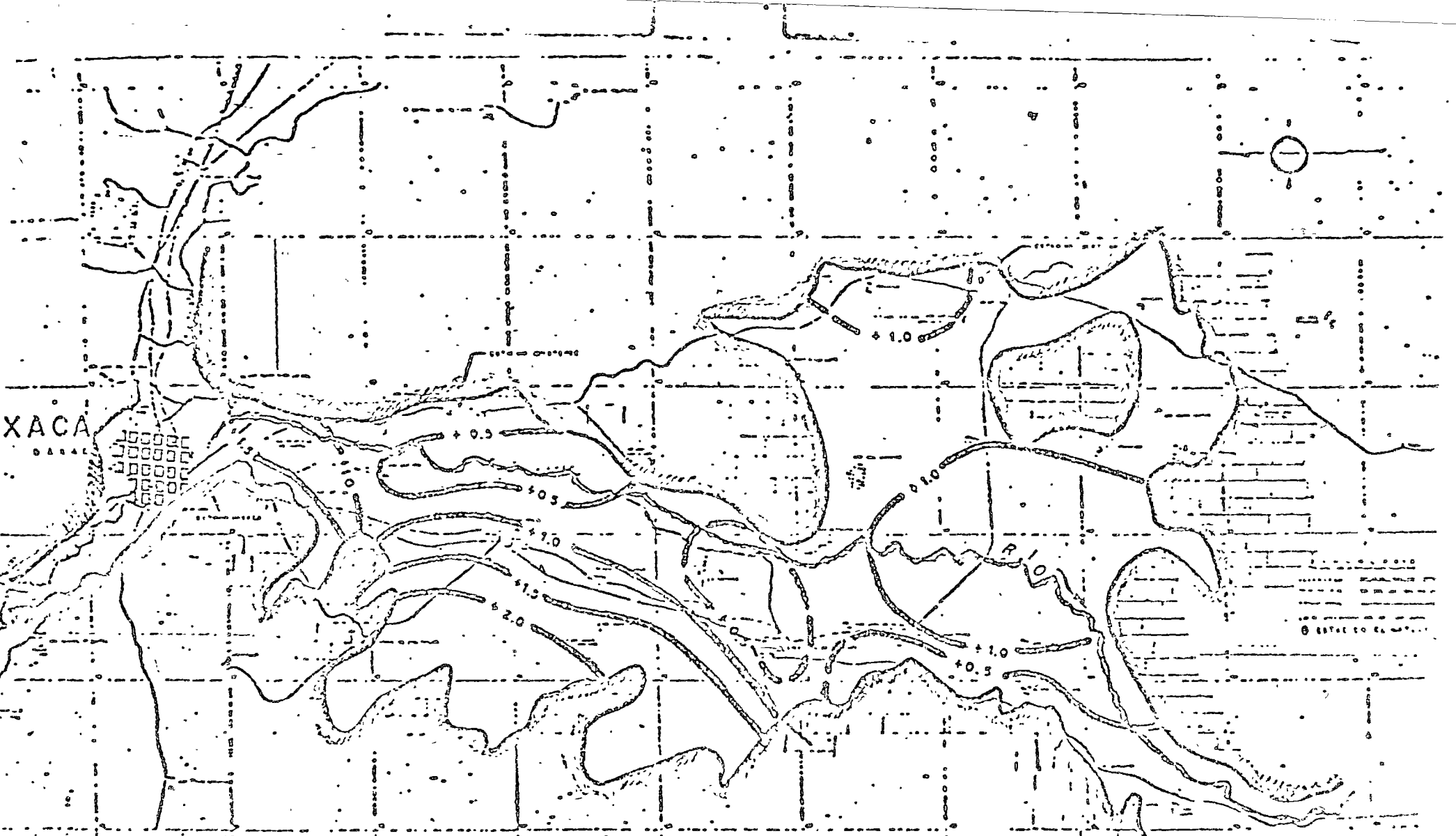


HERMOSILLO

GOLFO DE CALIFORNIA

EVOLUCION DE NIVELES ESTATICOS 1954 - 1973

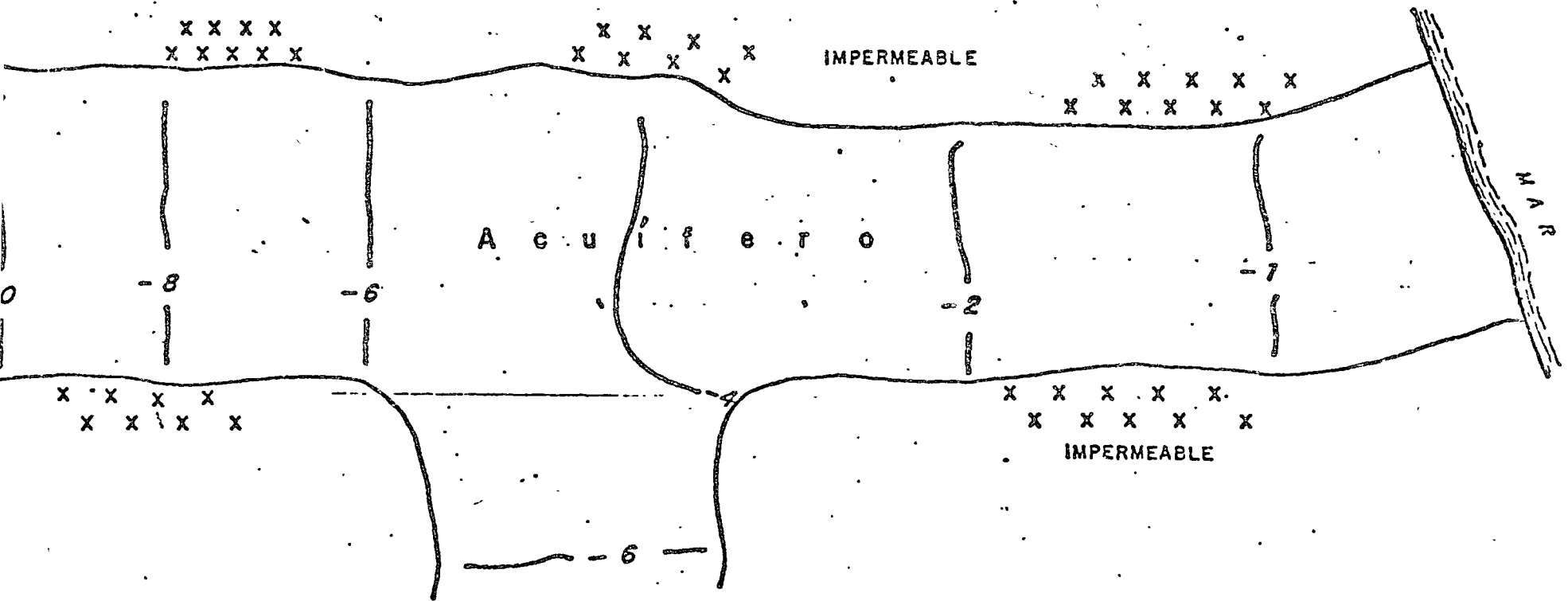
PLANICIE COSTERA DE HERMOSILLO, SON.



ESTADO DE OAXACA.- Curvas de igual evolución de nivel estático mayo-septiembre 1972

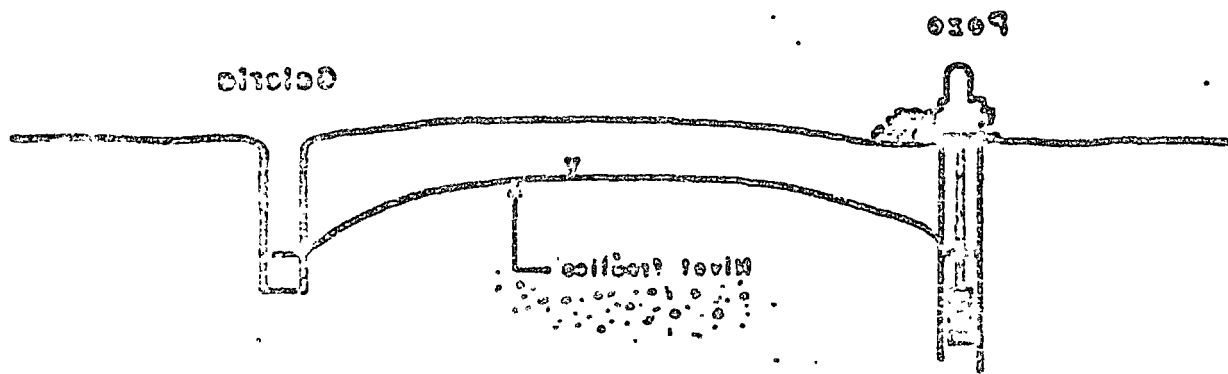
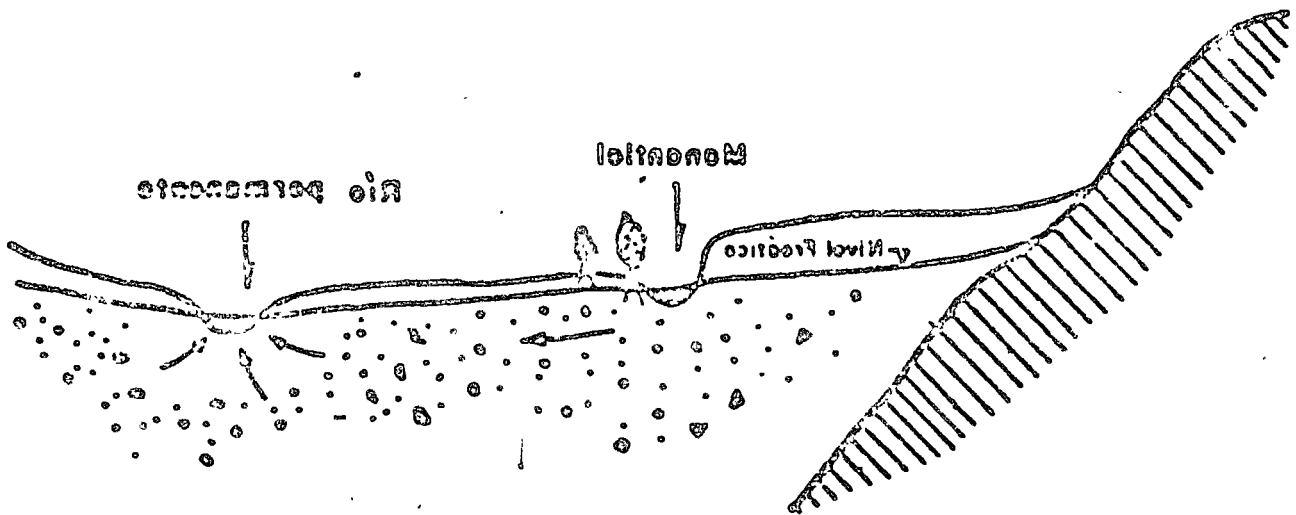
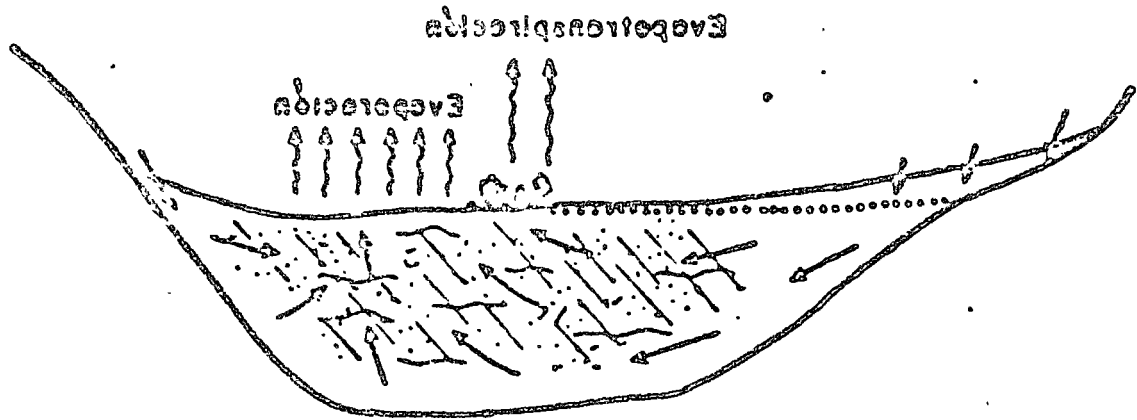
Las curvas reflejan la distribución de la recarga en el área.

619

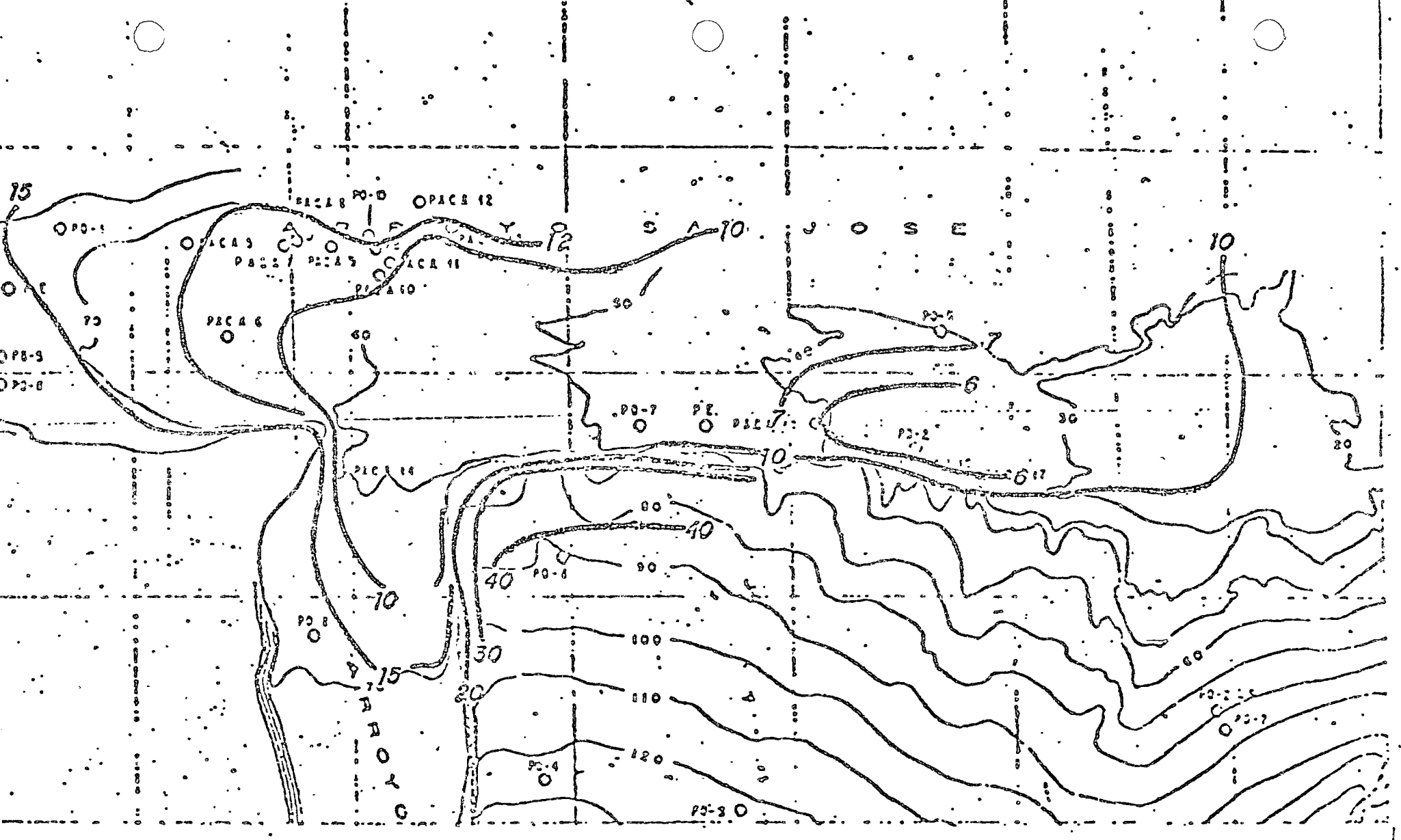


EVOLUCION DE NIVELES ESTATICOS. - Curvas abiertas y abatimientos decrecientes en la dirección del flujo son características del drenado natural del acuífero.

DESCARGA DE LOS ACUIFEROS  
FIGURA No. 4

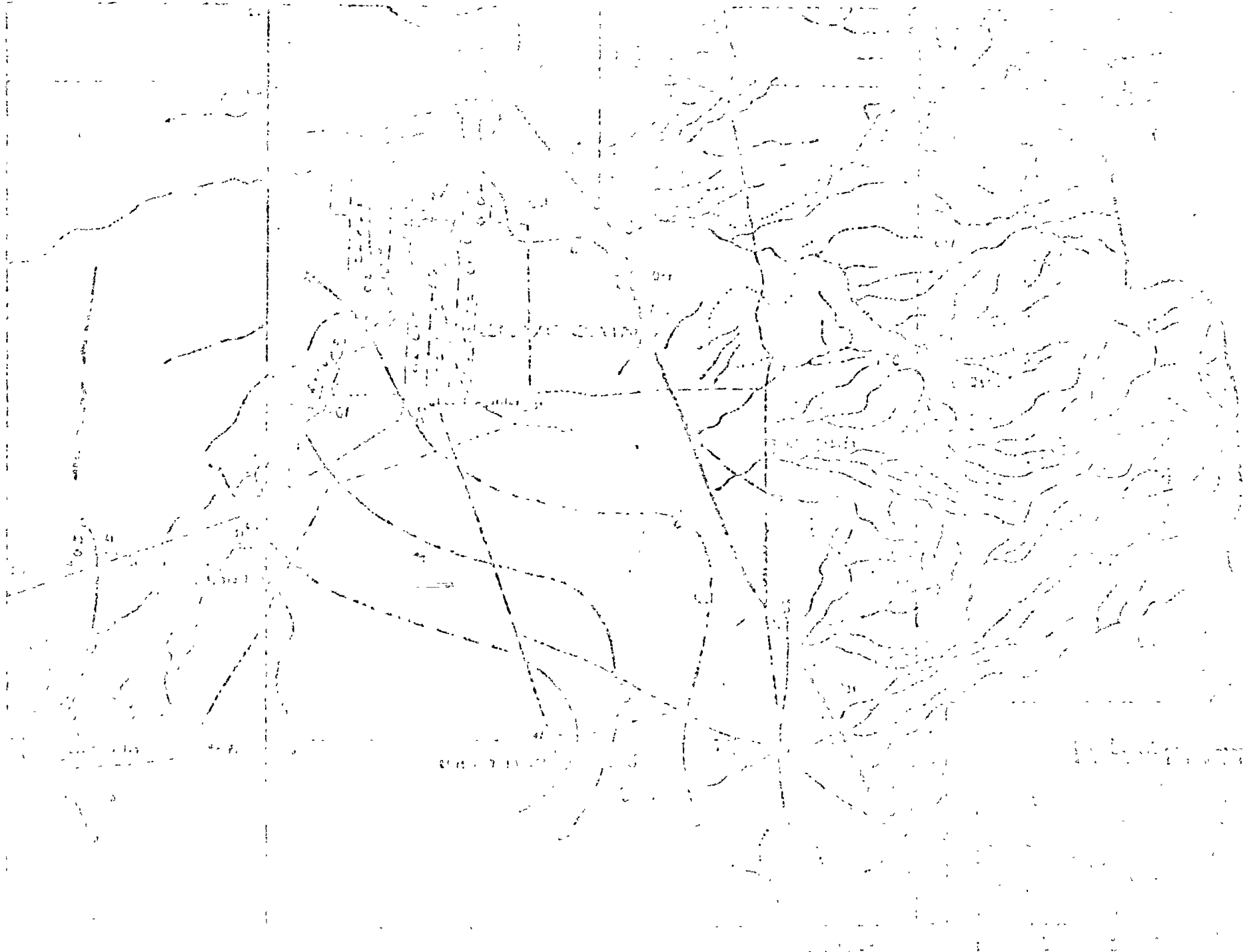


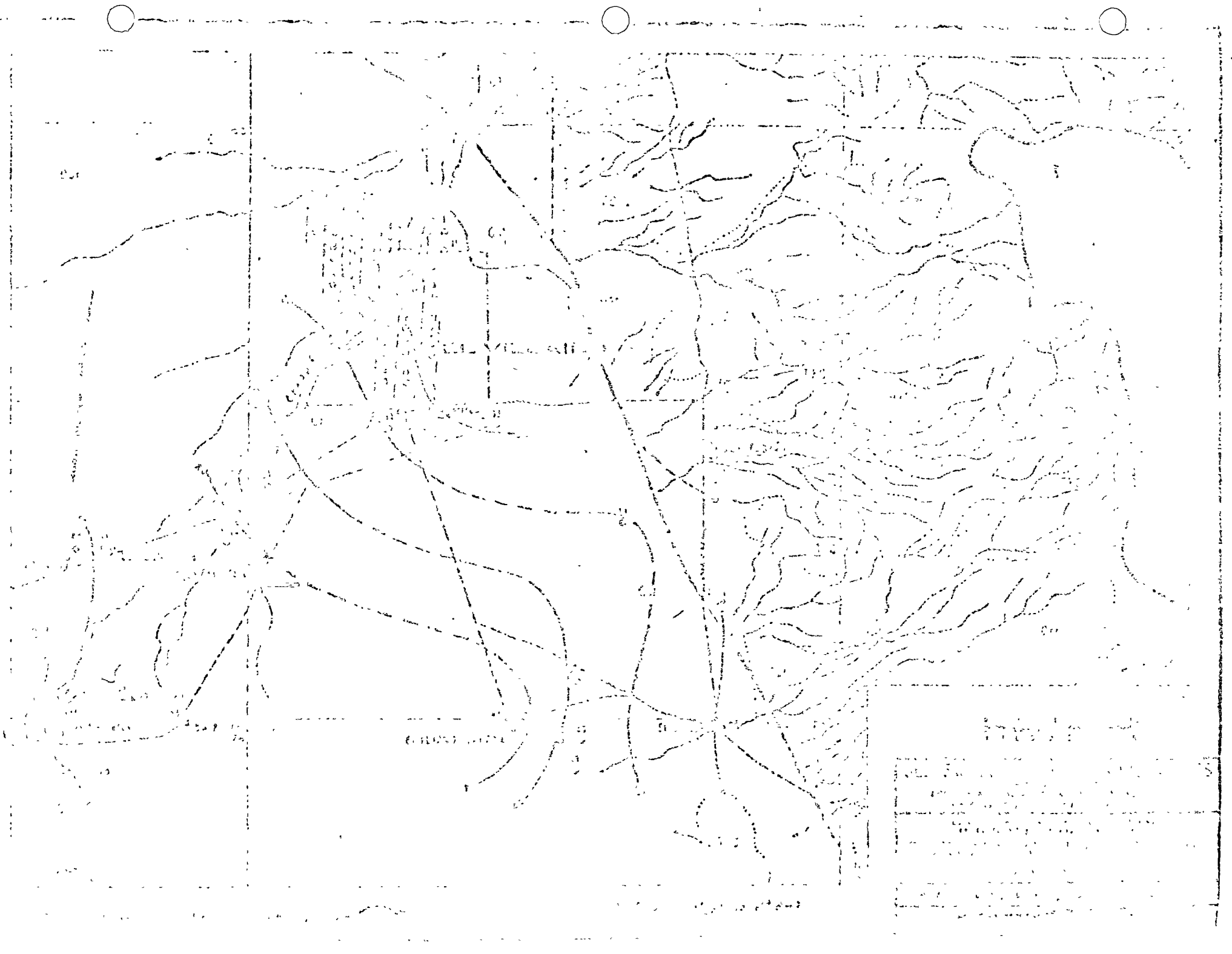




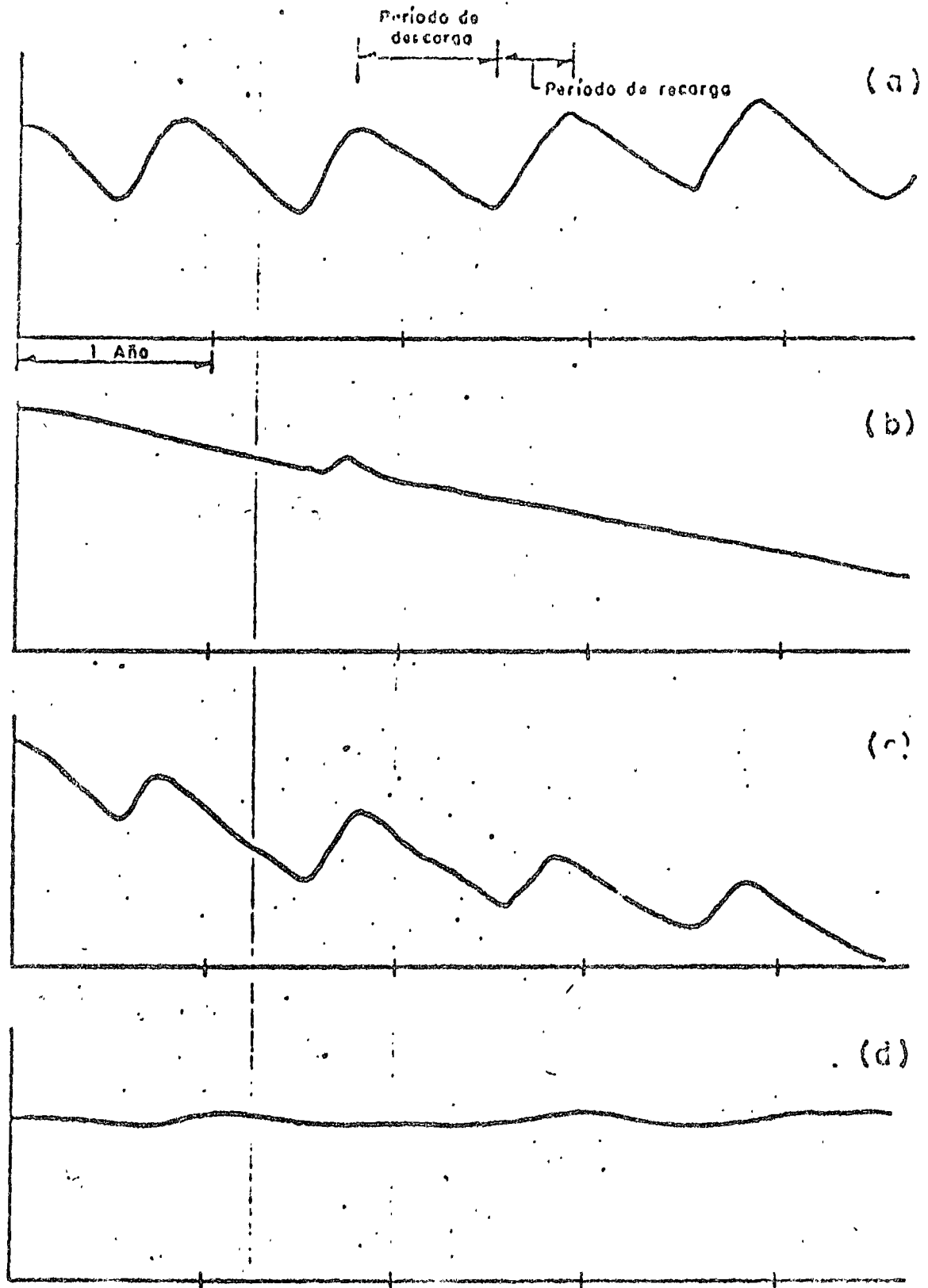
PROFUNDIDAD A LOS NIVELES DEL AGUA.- En el trazo de las curvas debe tomarse en cuenta la configuración topográfica.

20





PROFUNDIDAD AL NIVEL DEL AGUA



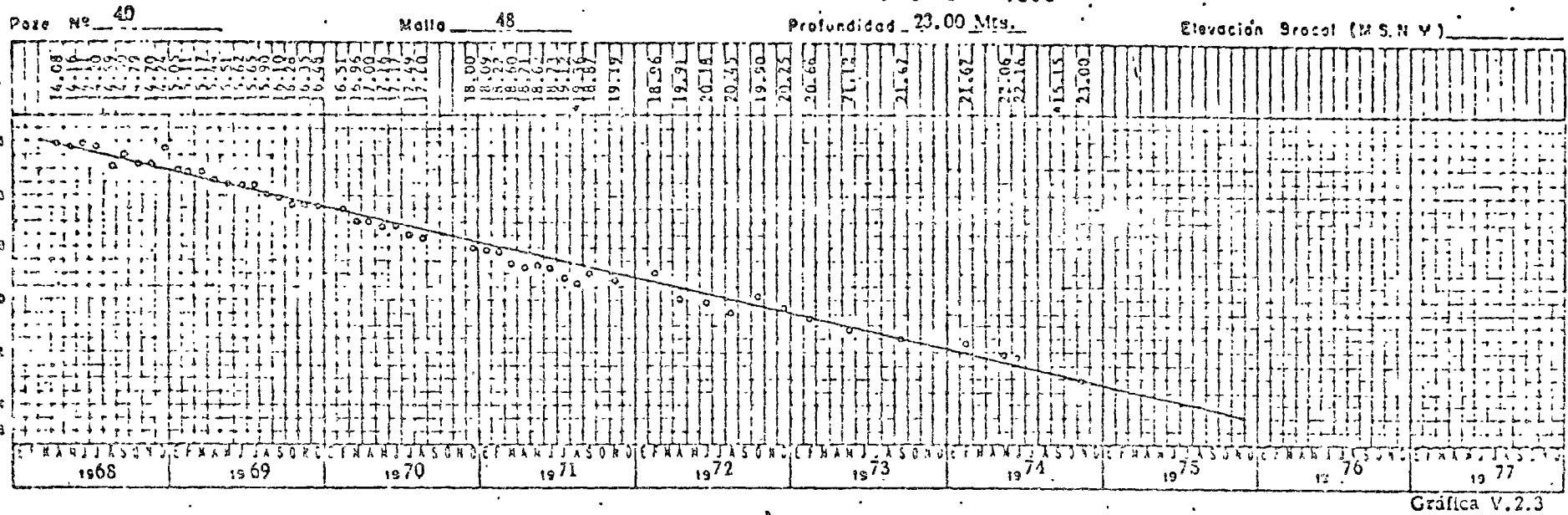
### HIDROGRAFOS DE POZOS

- a). - Distribución de los períodos de recarga y descarga.
- b). - Drenado natural de un acuífero sin recarga en el período de observación.
- c). - Abatimientos progresivos provocados por la explotación.
- d). - Comportamiento del nivel del agua en un pozo alejado de las zonas de recarga y descarga.

# TECNICAS MODERNAS DE INGENIERIA S.A.

## ESTUDIO GEOHIDROLOGICO DEL VALLE DE SAN JOSE DEL CABA

REGISTRO DE NIVELES ESTATICOS EN POZOS



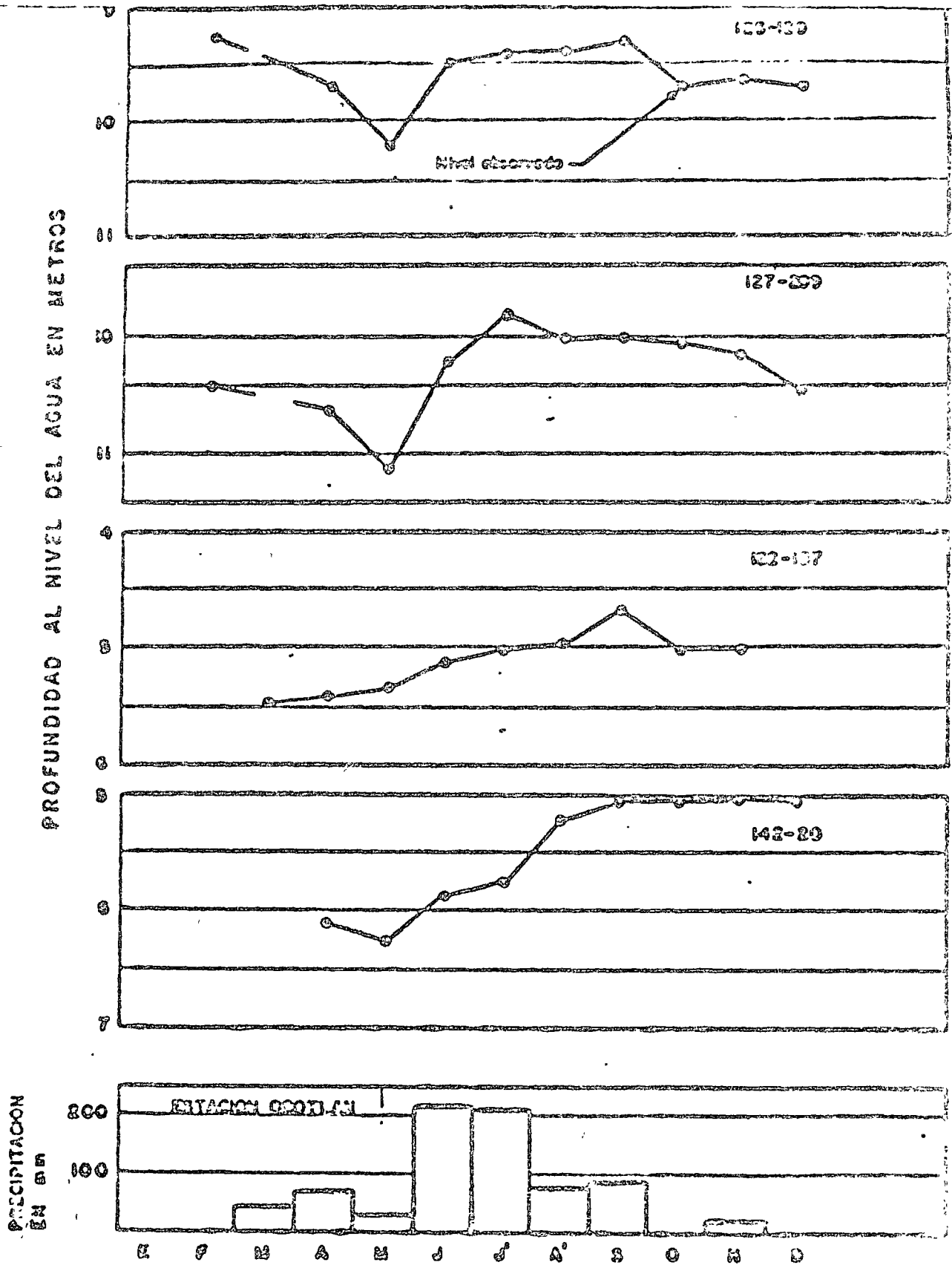
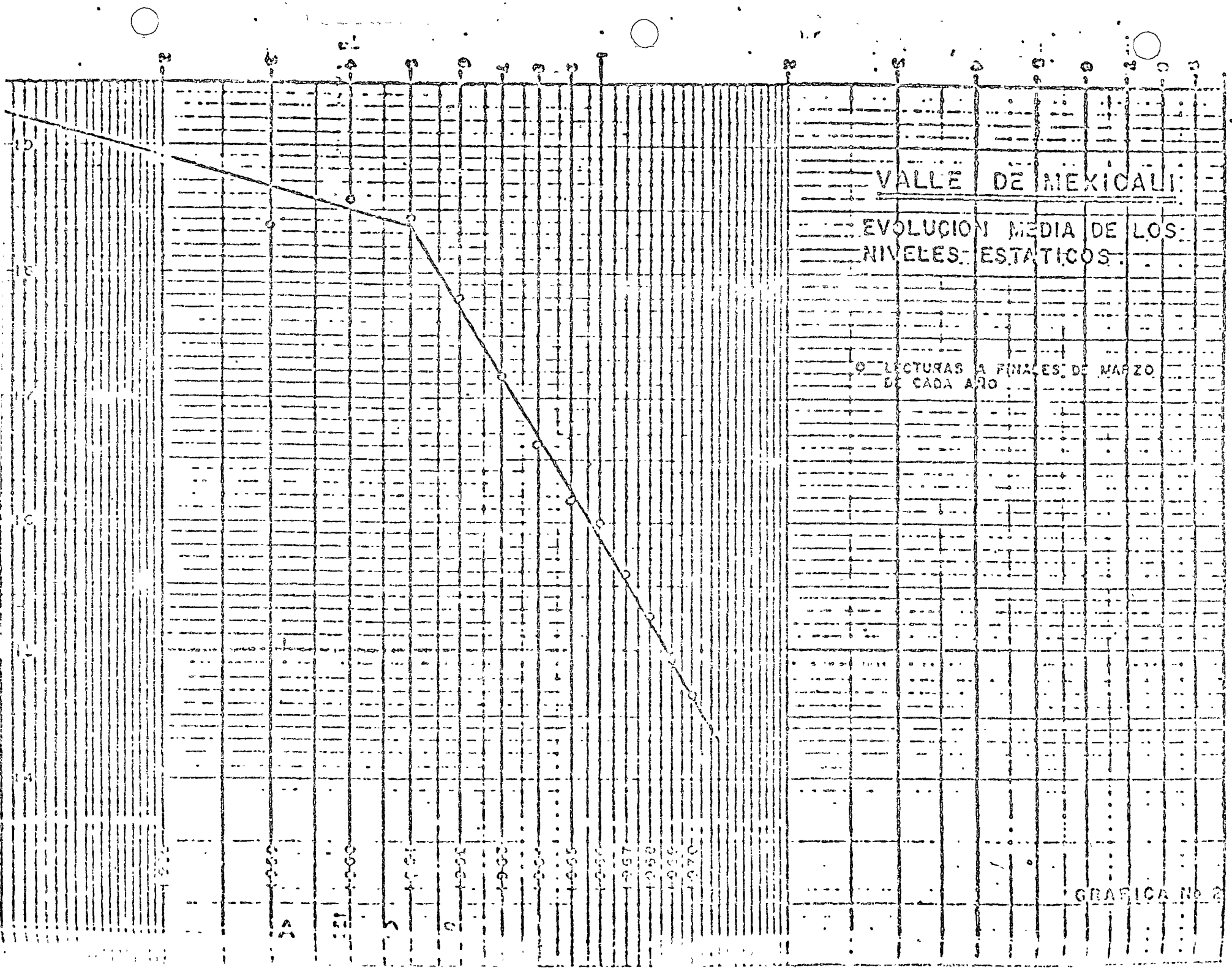


FIGURA 8 — HIDROGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACION SELECCIONADOS EN EL VALLE DE ZIMATLAN

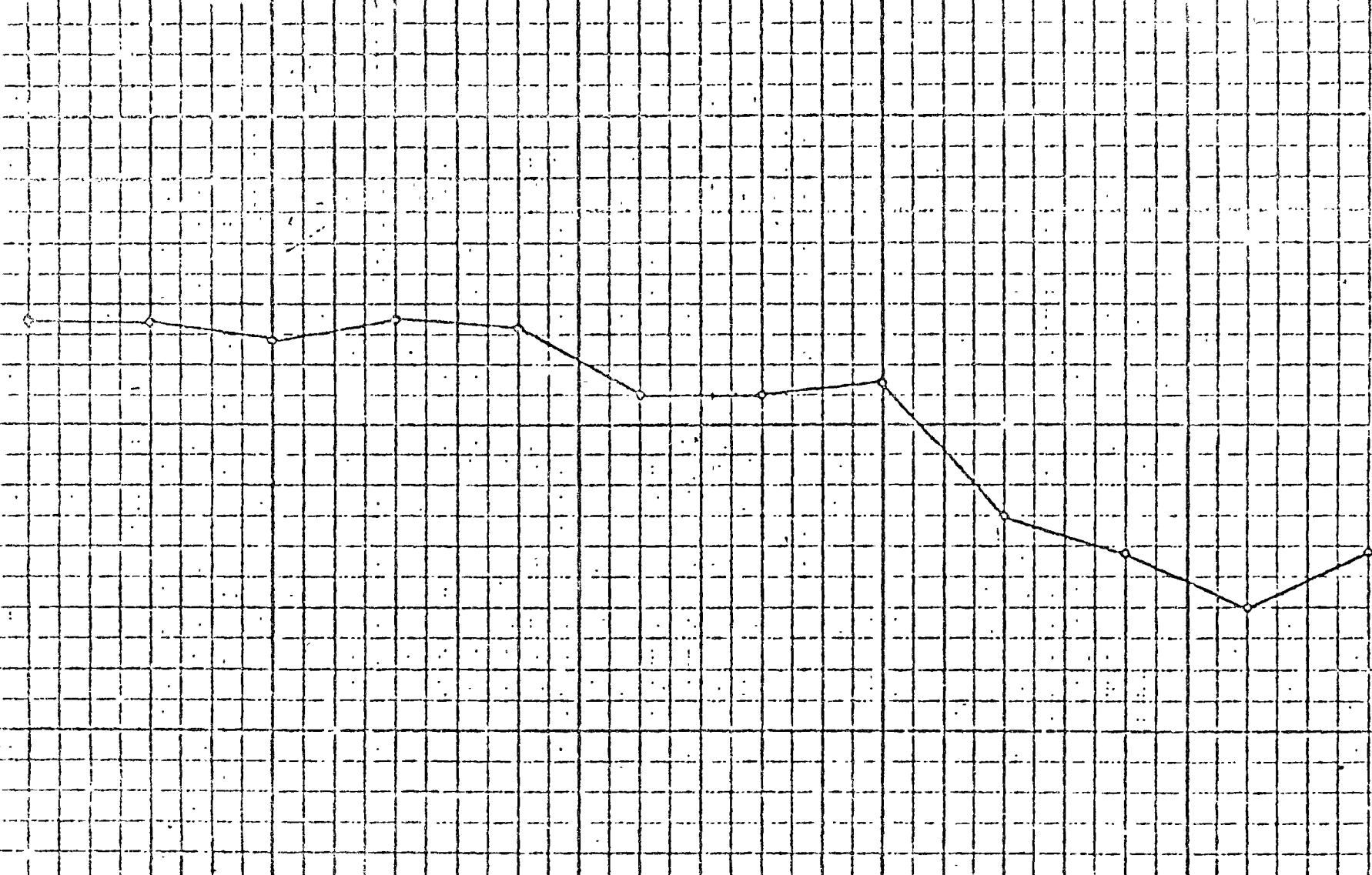


ESTADÍSTICAS DE LA INDUSTRIA DE LA ALIMENTACIÓN EN MEXICO

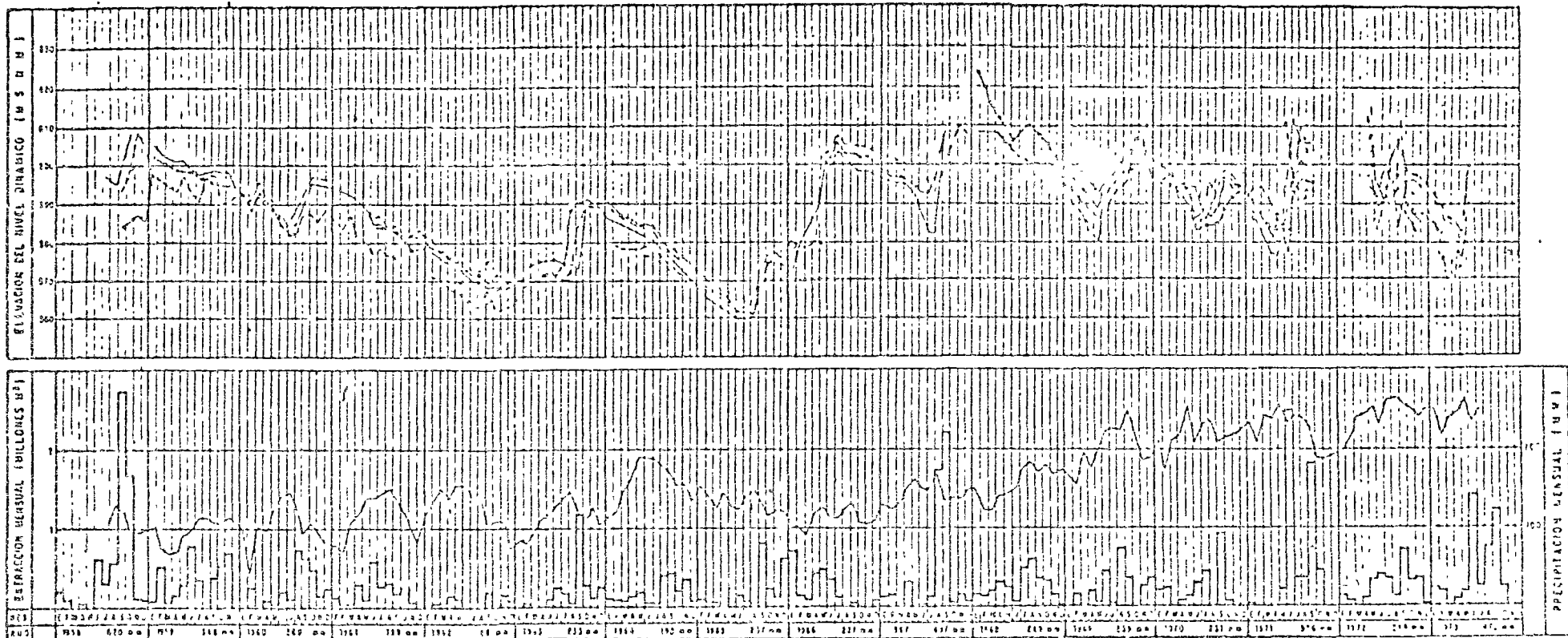
GRAFICO NO. 1

1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1960 1961 1962

1500  
1000  
500  
0







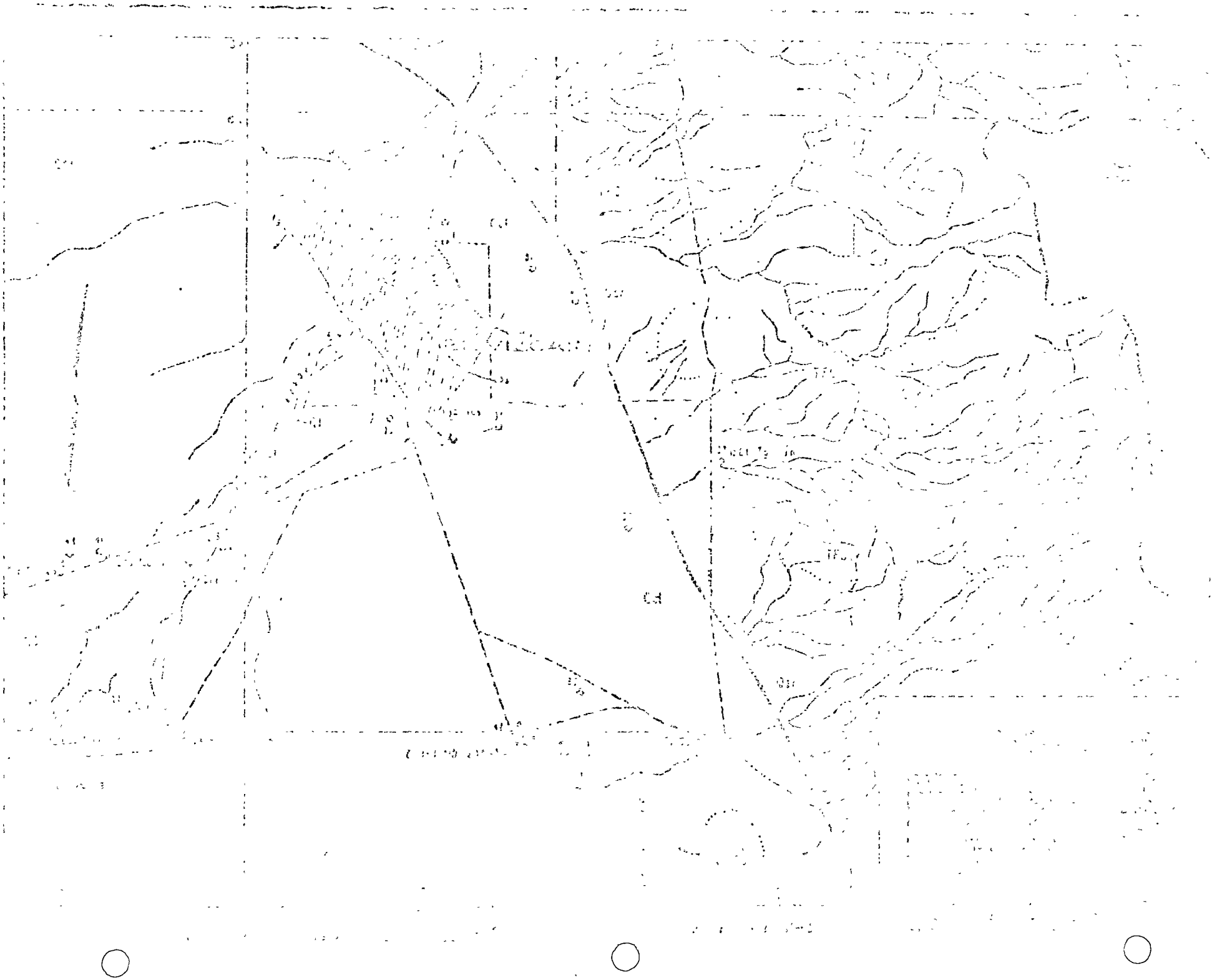
Q07A :- Datos de precipitación obtenidos de la estación climatológica Mina

POZO	ELEVACION DE BROCAL (m s n m)	SIMBOLOGIA
MINA 1	004 28	—————
MINA 6	011 23	-----
MINA 7	010 50	- - - - -
MINA 0	021 70	.....
MINA 9	004 20	— — — — —
MINA 10	020 09	-----

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
 DIRECCION GENERAL DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS  
 CAMPO DE POZOS MINA, MONTERREY N.L.  
 EVOLUCION PIEZOMETRICA, VOLUMENES  
 DE EXTRACCION Y PRECIPITACION PLUVIAL

Confirma: \_\_\_\_\_  
 EL DIRECTOR DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS  
 Agosto 1975  
 SECRETARIA GENERAL

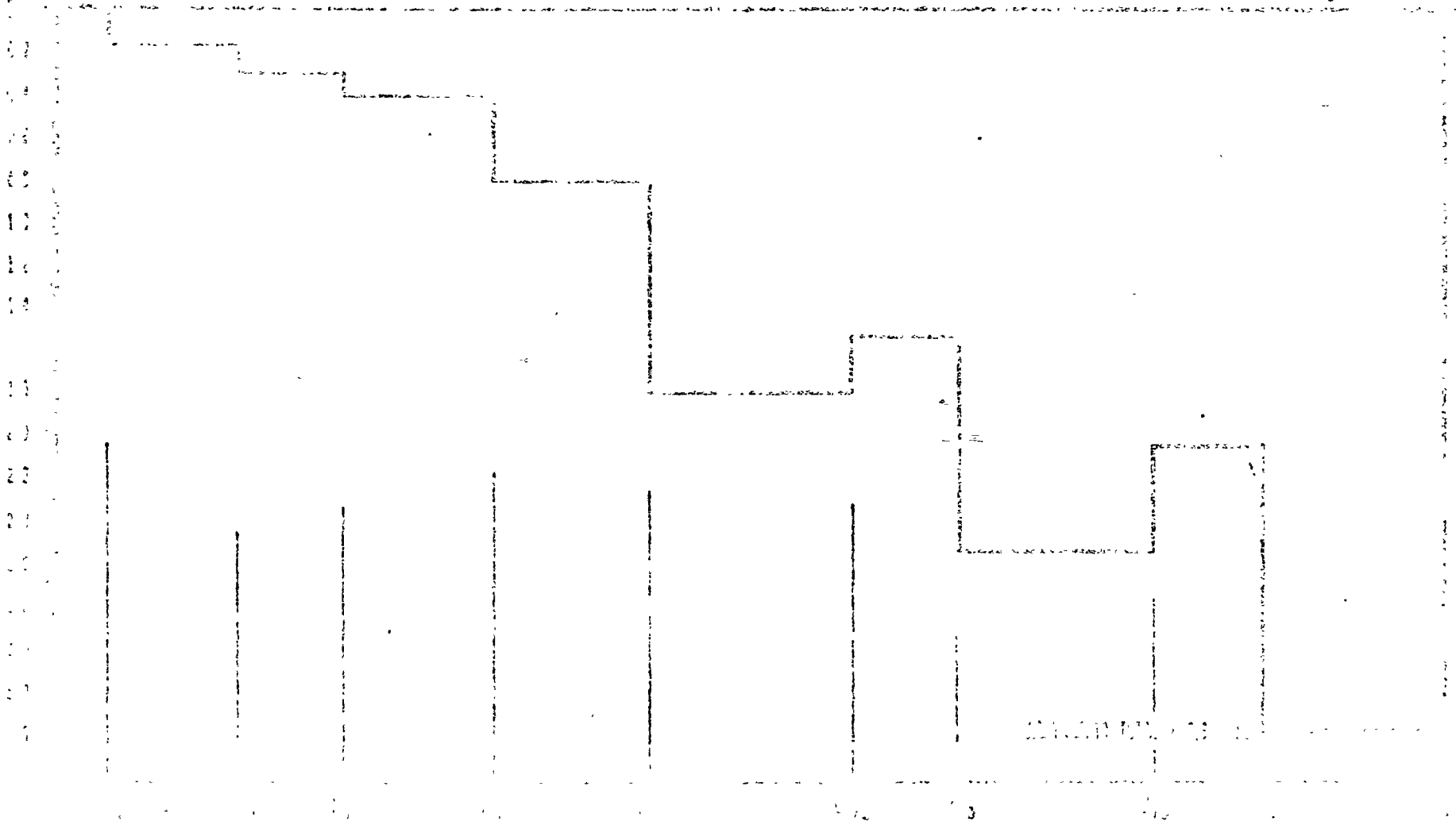
Parad: \_\_\_\_\_ Objeto: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

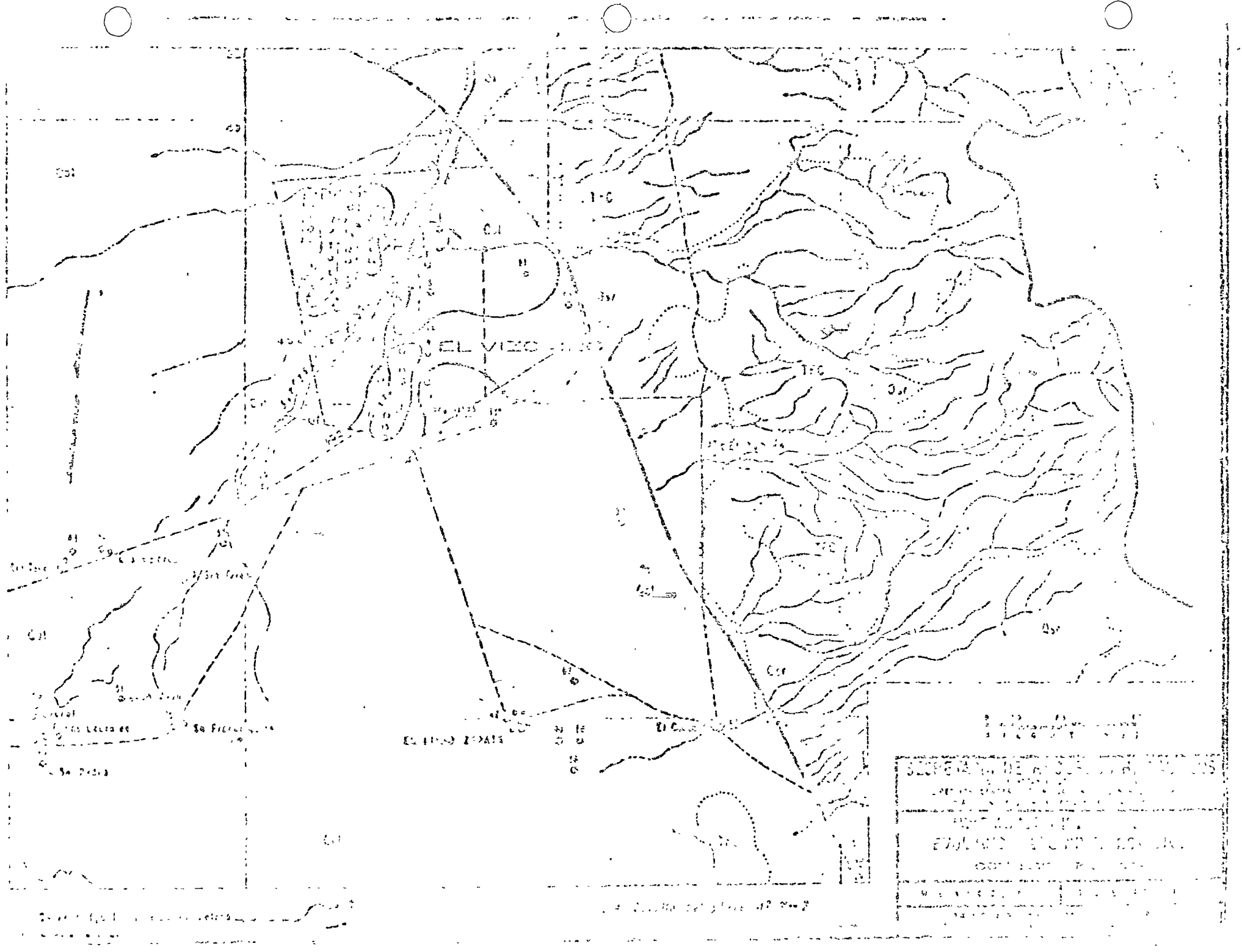




1. The first part of the document is a list of names and addresses.

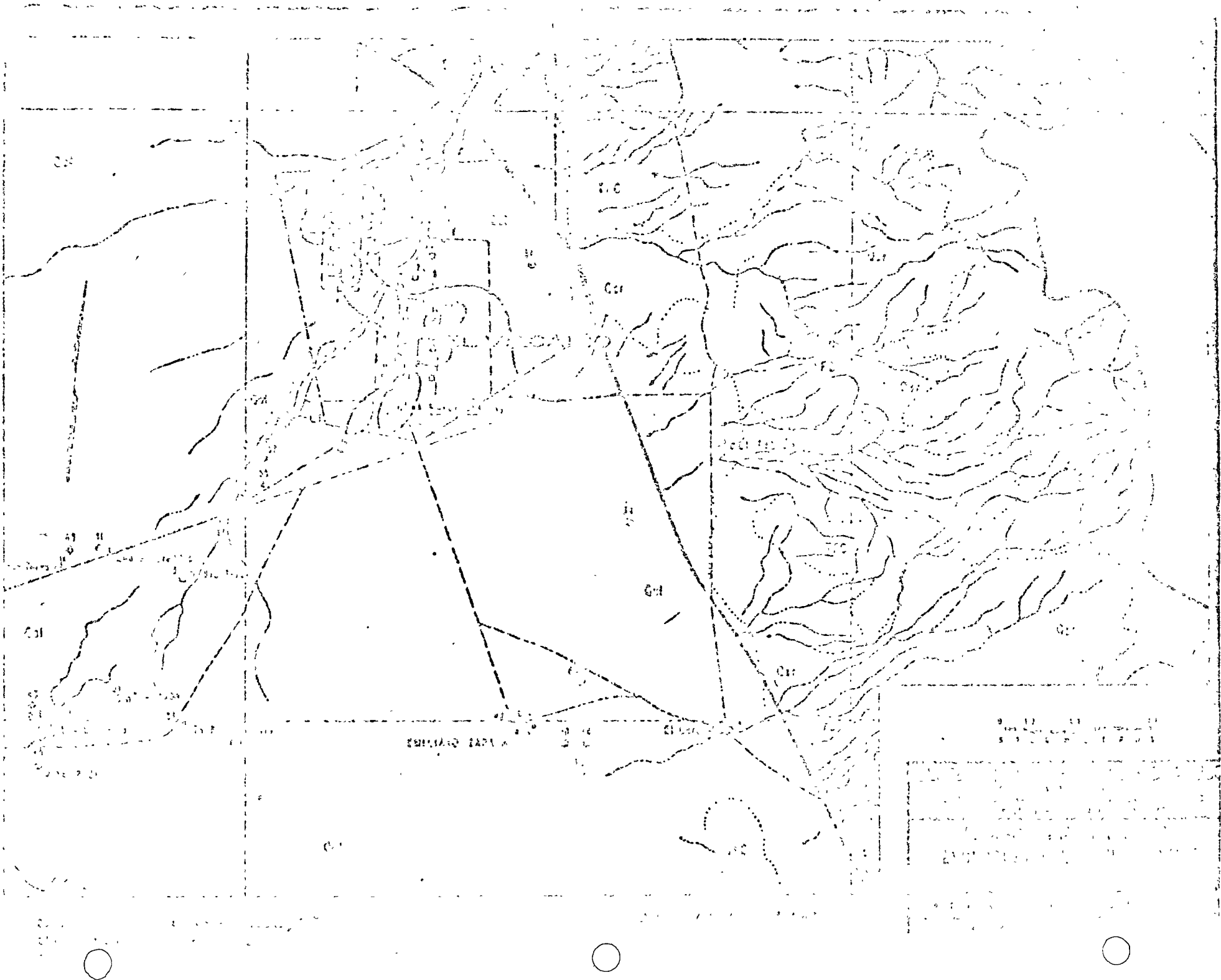
2. The second part of the document is a list of names and addresses.





SECRETARIA DE DEFENSA NACIONAL  
 INSTITUTO MEXICANO DE GEOGRAFIA Y ESTADISTICA  
 ESTADISTICA GEOGRAFICA Y DEMOGRAFICA  
 COMISIÓN NACIONAL DE ESTADÍSTICA  
 CENSO DE PUEBLO Y VIVIENDA  
 1970

Escala 1:500,000



BRITISH ISLES

1850

1850  
1851  
1852  
1853  
1854  
1855  
1856  
1857  
1858  
1859  
1860  
1861  
1862  
1863  
1864  
1865  
1866  
1867  
1868  
1869  
1870  
1871  
1872  
1873  
1874  
1875  
1876  
1877  
1878  
1879  
1880  
1881  
1882  
1883  
1884  
1885  
1886  
1887  
1888  
1889  
1890  
1891  
1892  
1893  
1894  
1895  
1896  
1897  
1898  
1899  
1900

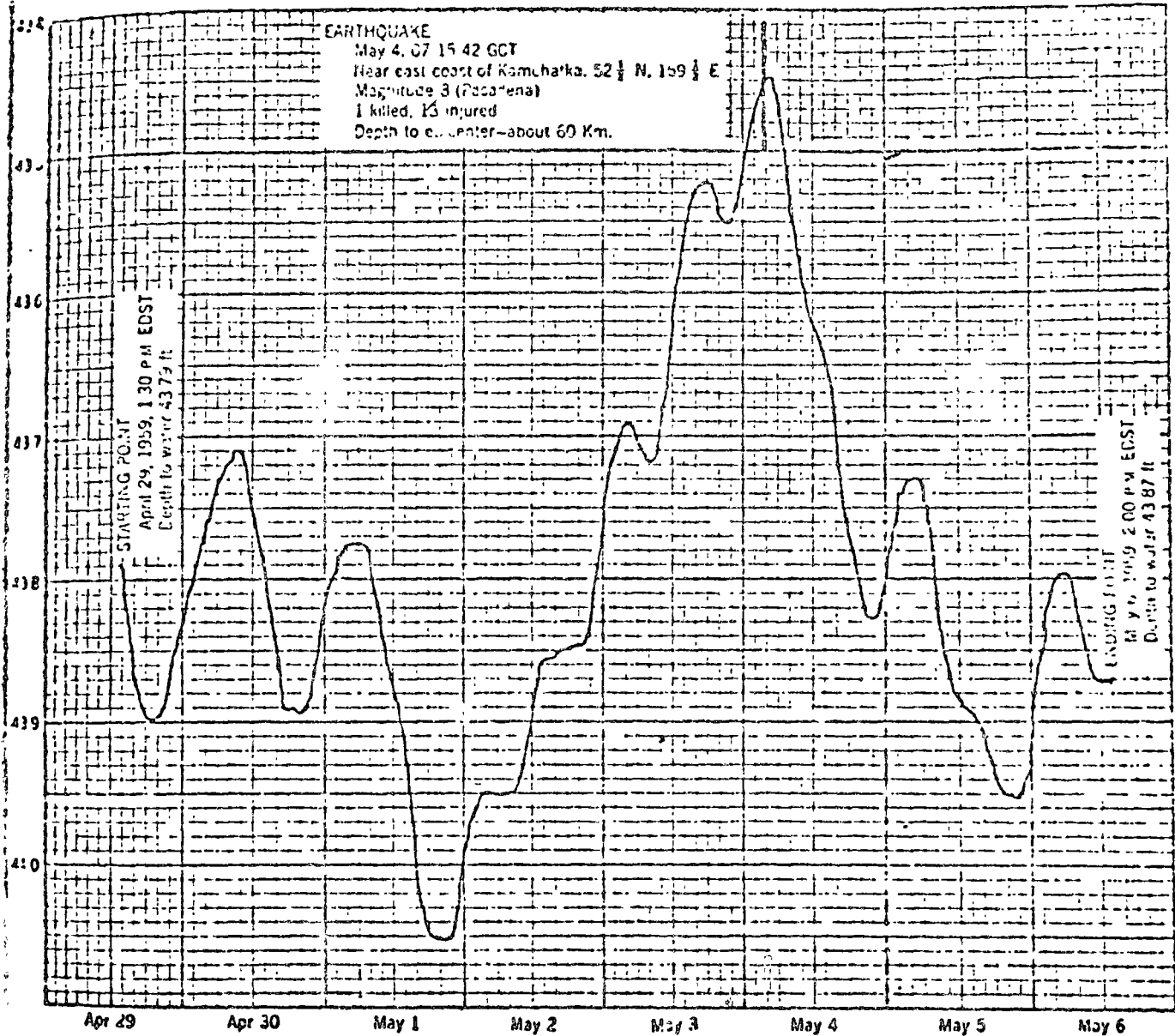


Figure 7.3. Chart from water-level recording page on Well Sa 529, Saratoga County, N.Y. The well is 6 in. in diameter and 304 ft deep. It is cased through glacial sand and Ordovician shale and finished with an open hole in Ordovician dolomite. The water level responds to distant pumping and earthquake waves and is recorded in feet below land surface. Approximately  $\frac{2}{3}$  actual scale. (Reproduced through the courtesy of the U. S. Geological Survey.)

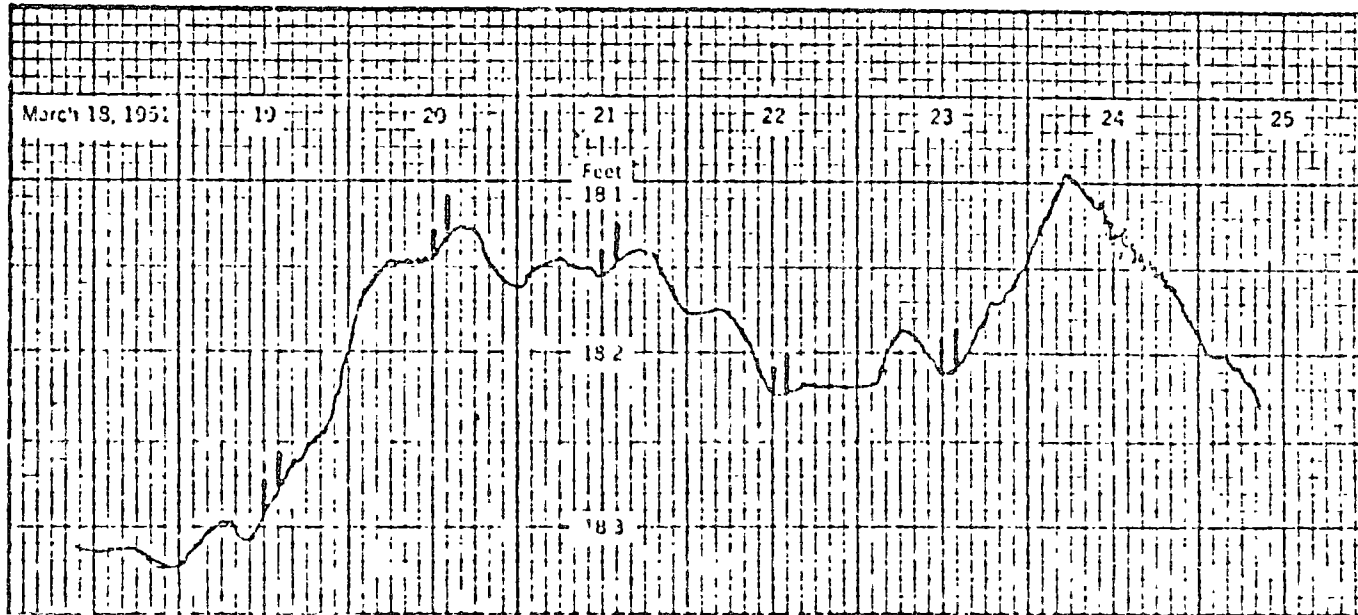


Figure 7.4. Chart from water level recording gage on Well Wn 29, Wayne County, N.Y. The well is 8 in. in diameter, 107 ft deep, and is open in Silurian dolomite from 25 to 107 ft. The water level is quoted in feet below land surface. This figure is reduced 50 percent from original size. (Reproduced through the courtesy of the U. S. Geological Survey.)



A principios del Mioceno, la deposición 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 salidas 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, 1960), aparecieron en esa franja, numerosos volcanes de tipo andésitico y-

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, la precipitación es mayor y nieva en invierno, tal vez la recarga de agua subterránea pueda venir 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. Un espesor semejante de sedimentos y materiales volcánicos se cortó en una perforación en el lago de Texcoco en el Valle de México.

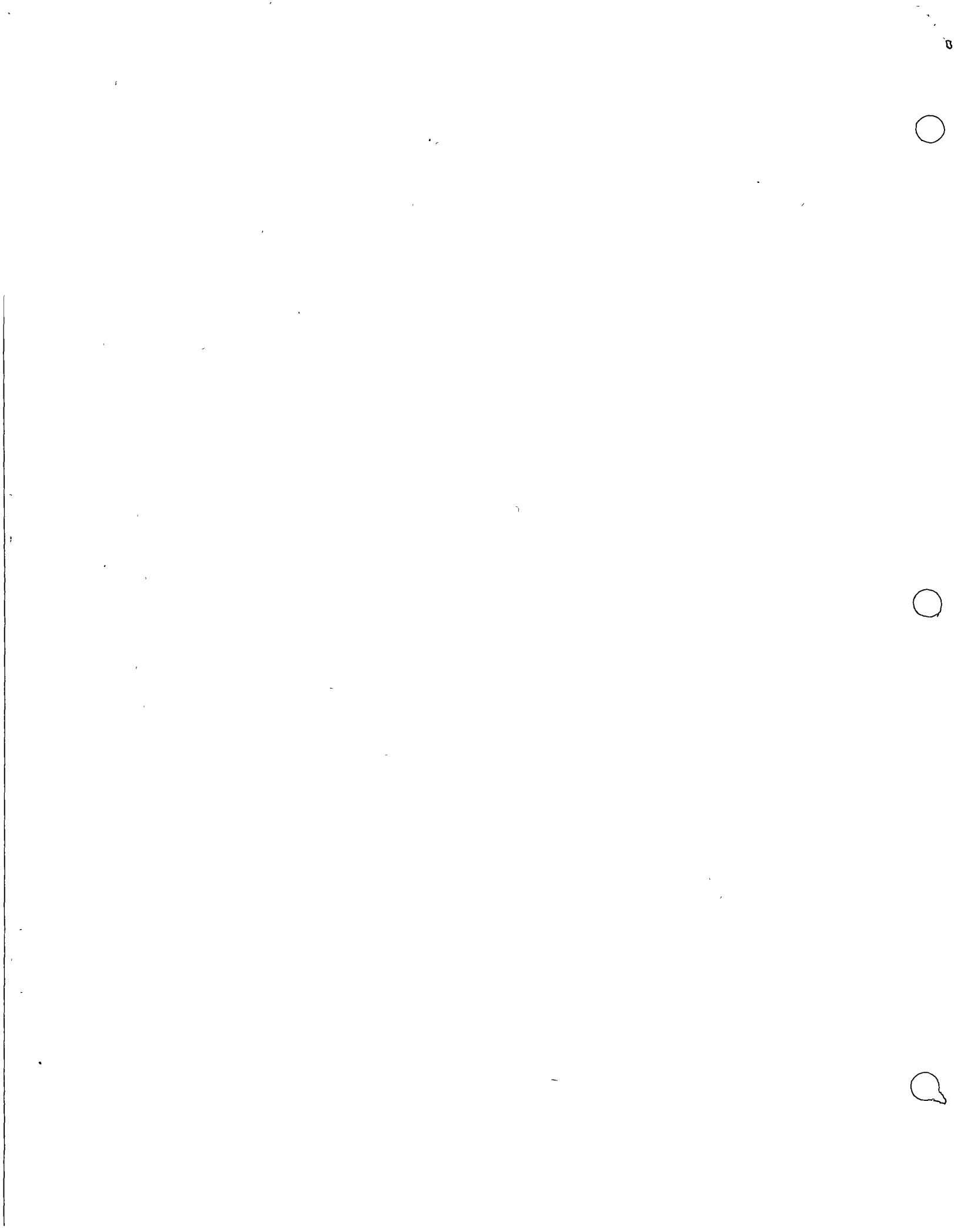
A principios del Cuaternario, lo que ahora es el Valle de México, estaba formado por una serie de depósitos la-

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

REGISTROS DE POZOS 2<sup>a</sup> PARTE

ING. LUIS ENRIQUE LARA TRUJILLO

JULIO DE 1976.



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:

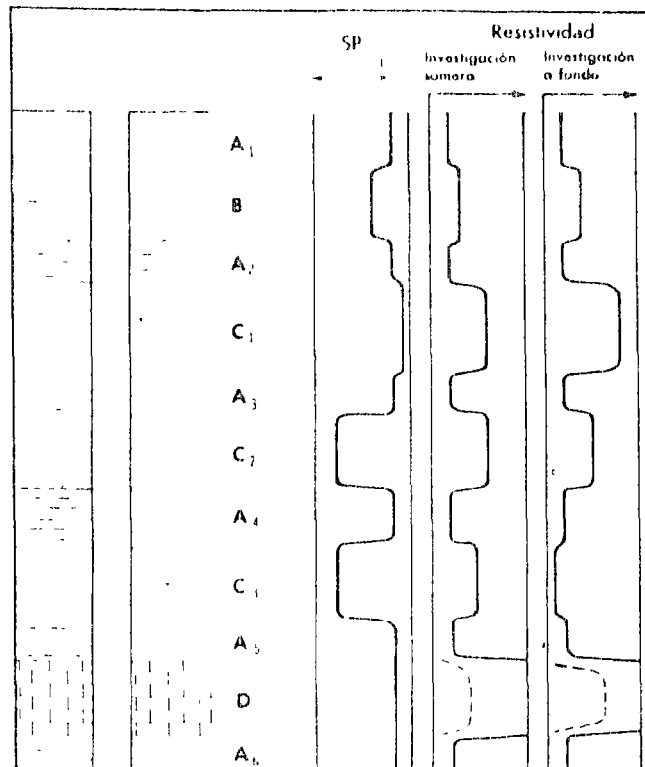
- a).- El potencial muestra deflexión negativa amplia.
- b).- La resistividad del espaciamiento corto, es alta, debido al desplazamiento del agua salada por agua dulce del filtrado del lodo.
- c).- La resistividad del espaciamiento largo es muy baja, por estar midiendo atrás de la zona lavada en donde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



La formación D es de una caliza dura por:

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

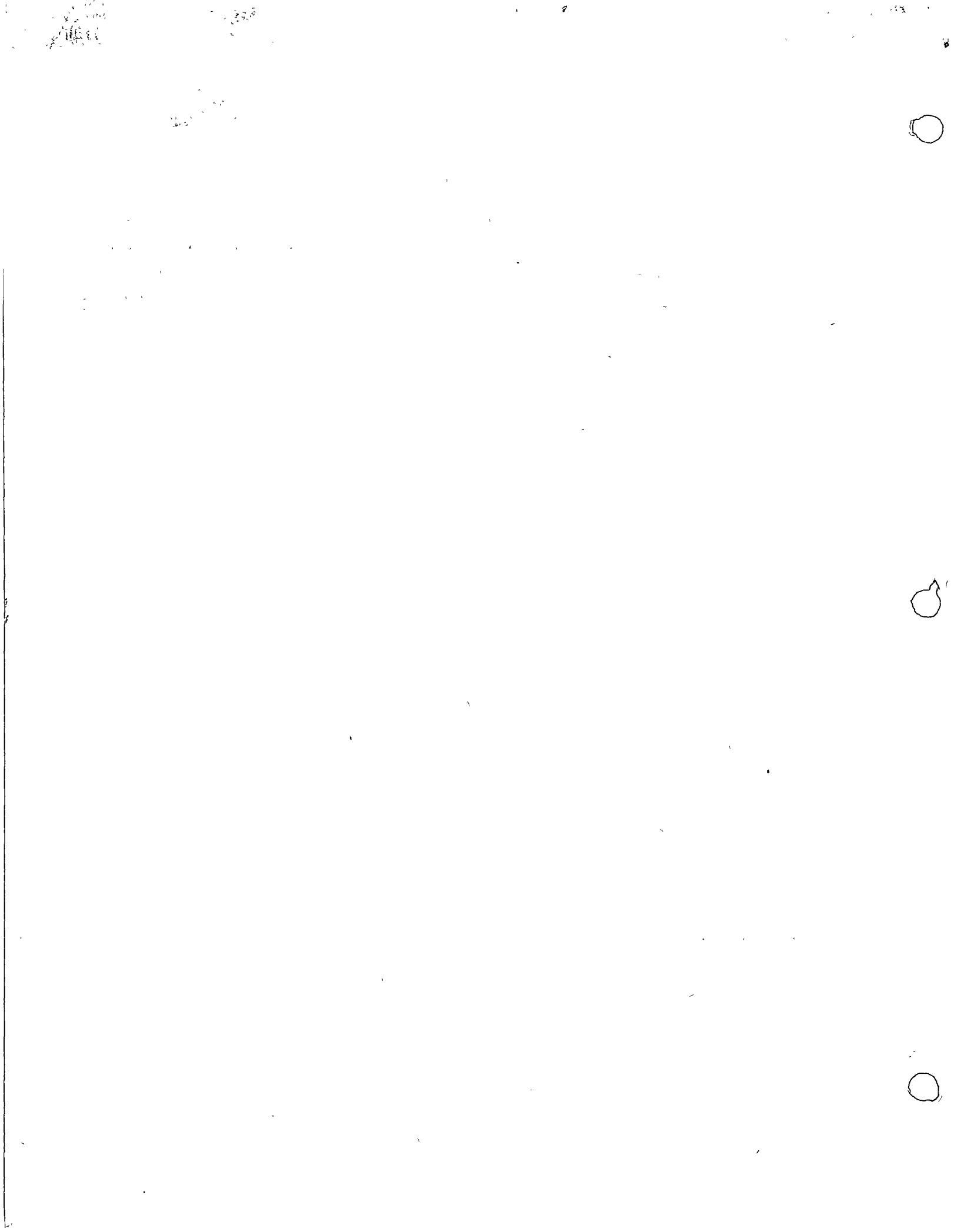
Estas reglas básicas para la interpretación de registros eléctricos, se complementan con la información geológica del área, así como de la obtenida durante la perforación del pozo. Es conveniente cuando el caso lo amerite, disponer de información que proporcionan otro tipo de registros como el microregistro,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



PRESENTACION ESQUEMATICA de las curvas típicas de las necesarias para establecer las reglas básicas de interpretación o S

**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.





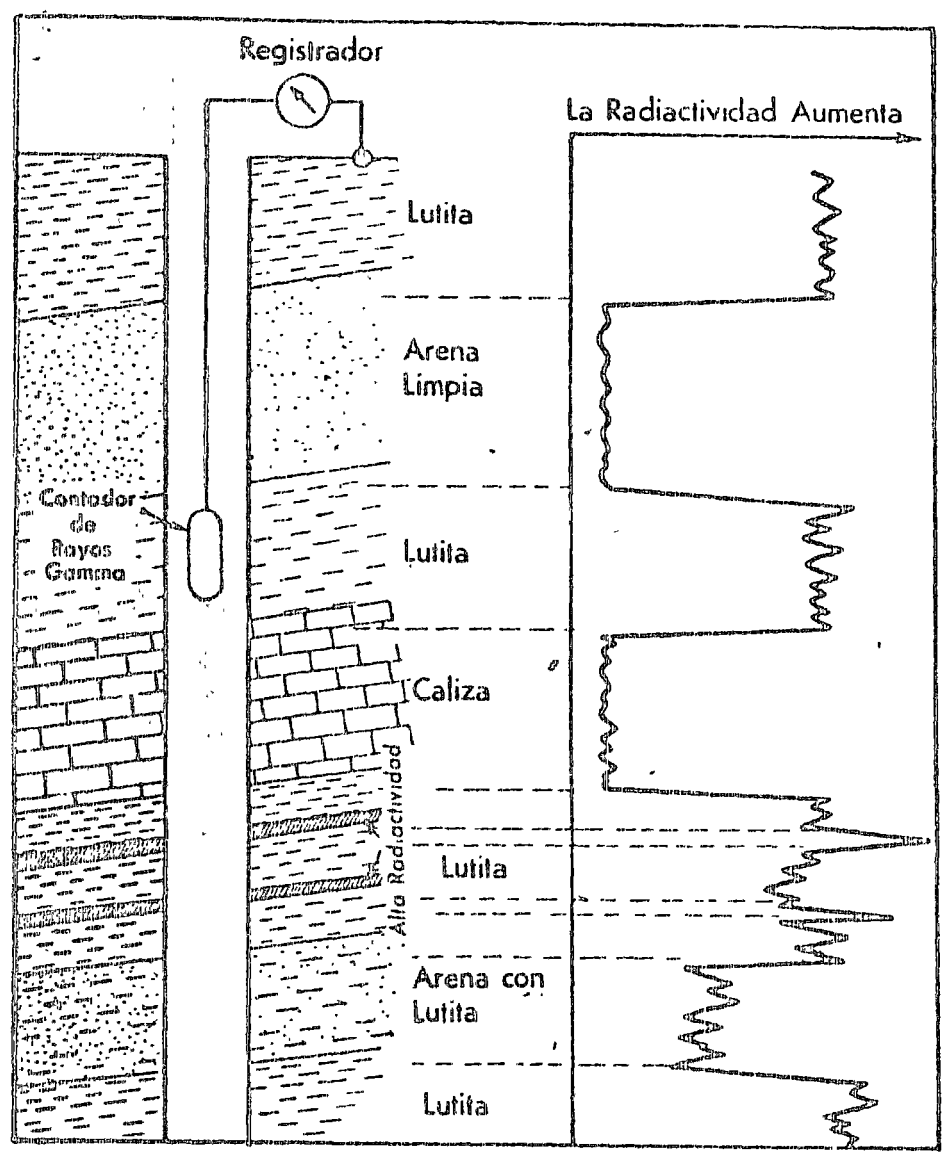


GRAFICO REGISTRADO mediante el perfilaje por rayos gamma. Fig. 18.

A CURVE such as this is recorded by gamma-ray logging. Fig. 18.



El registro de rayos gamma puede ser tomado en pozos que ya han sido ademados, lo cual lo hace 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.

Medición 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.



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 acoplamiento 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:

F.L. 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.

L.A. Puzin.

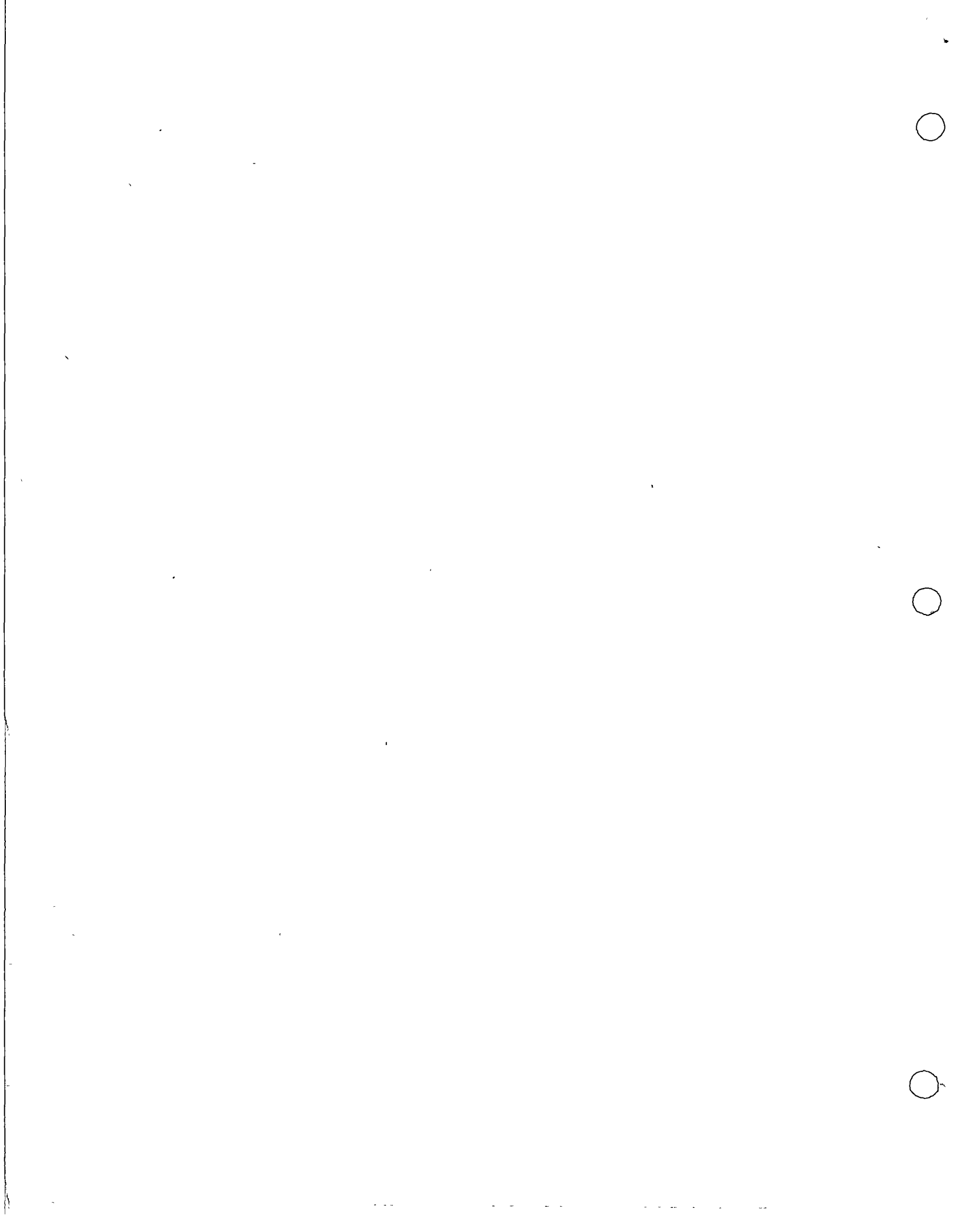
¿ Qué es Perfilaje de Pozos?  
Artículos publicados de junio a diciembre de 1962. Petróleo Interamericano.

R.G. Hamilton and J.L. Myung.

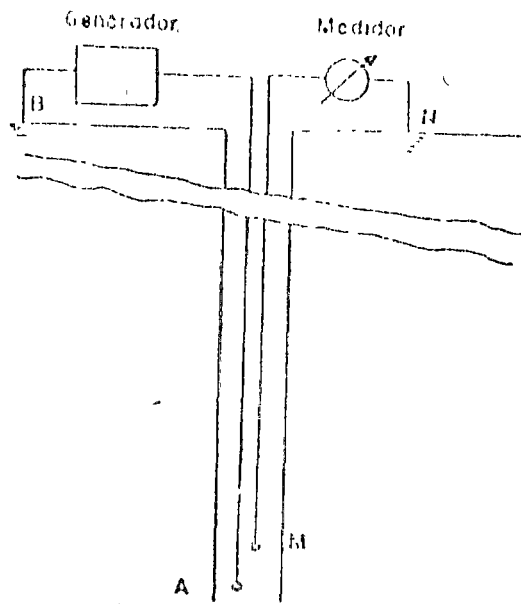
Summary of Geophysical Well Logging. Bardwell Division.

Schlumberger Limited

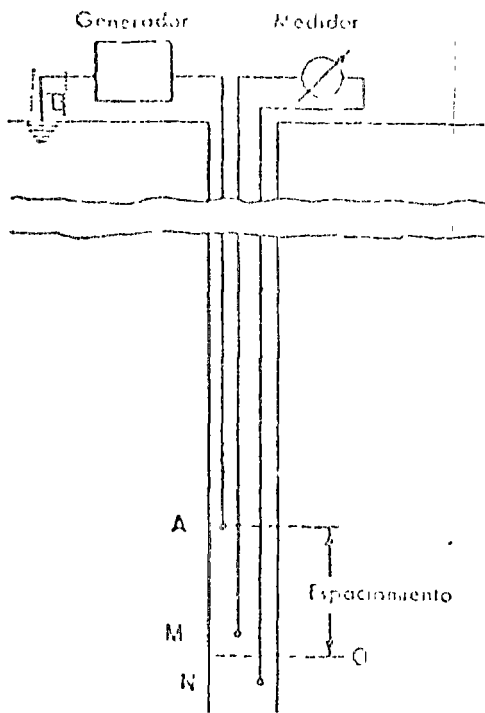
Fundamentos de la interpretación de perfiles. julio de 1970.



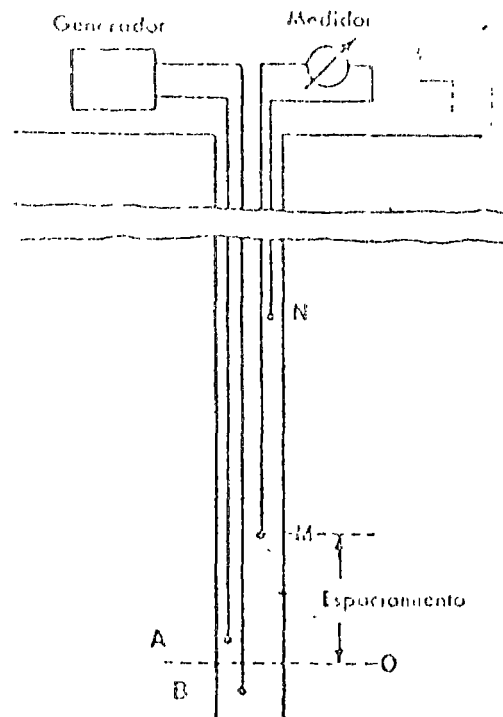




Esquema del arreglo teórico del dispositivo normal.

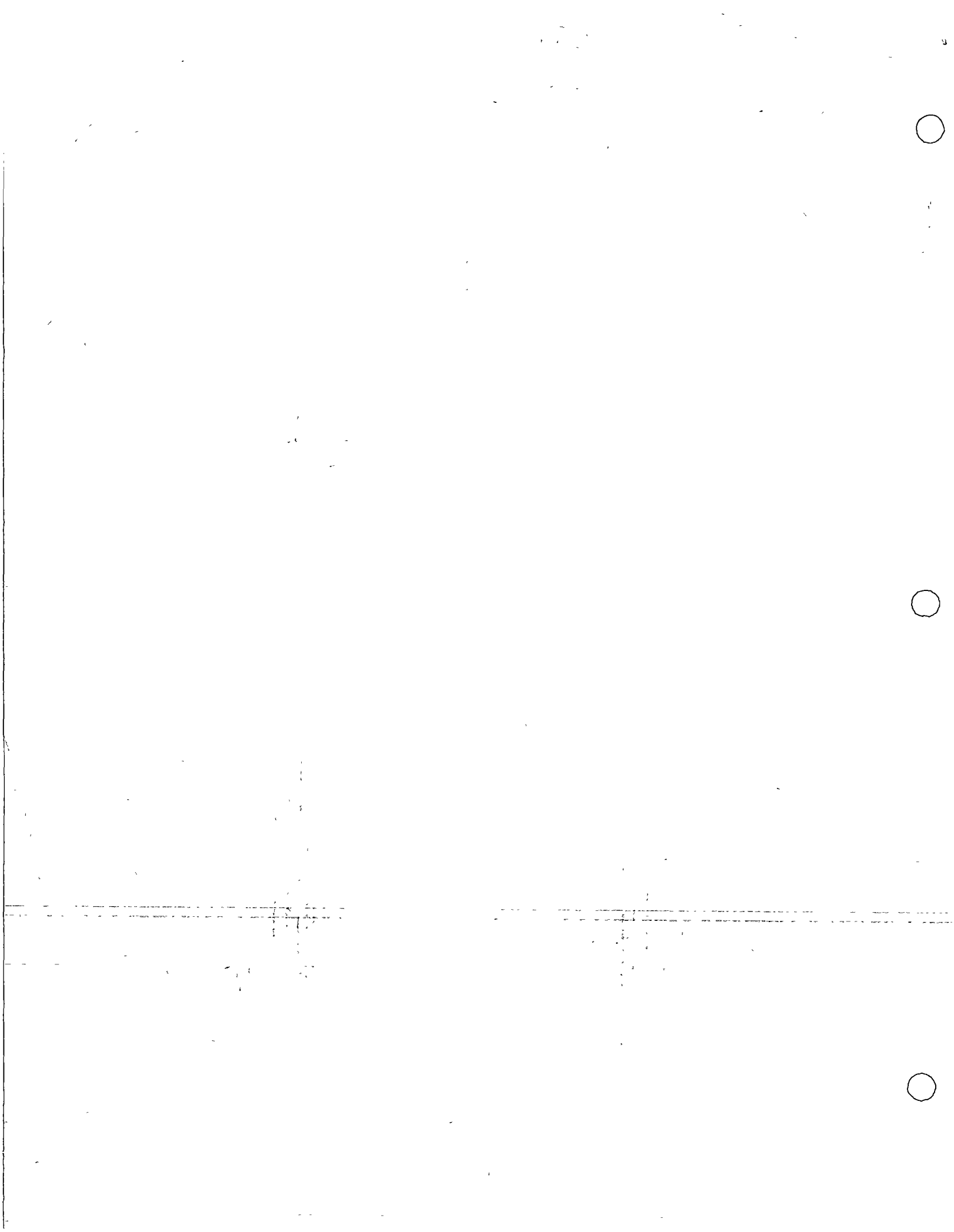


(a)



(b)

Esquema del arreglo de electrodos para el dispositivo lateral. (a) arreglo teórico, (b) arreglo real.



lo que puede resolverse directamente para porosidad, dando

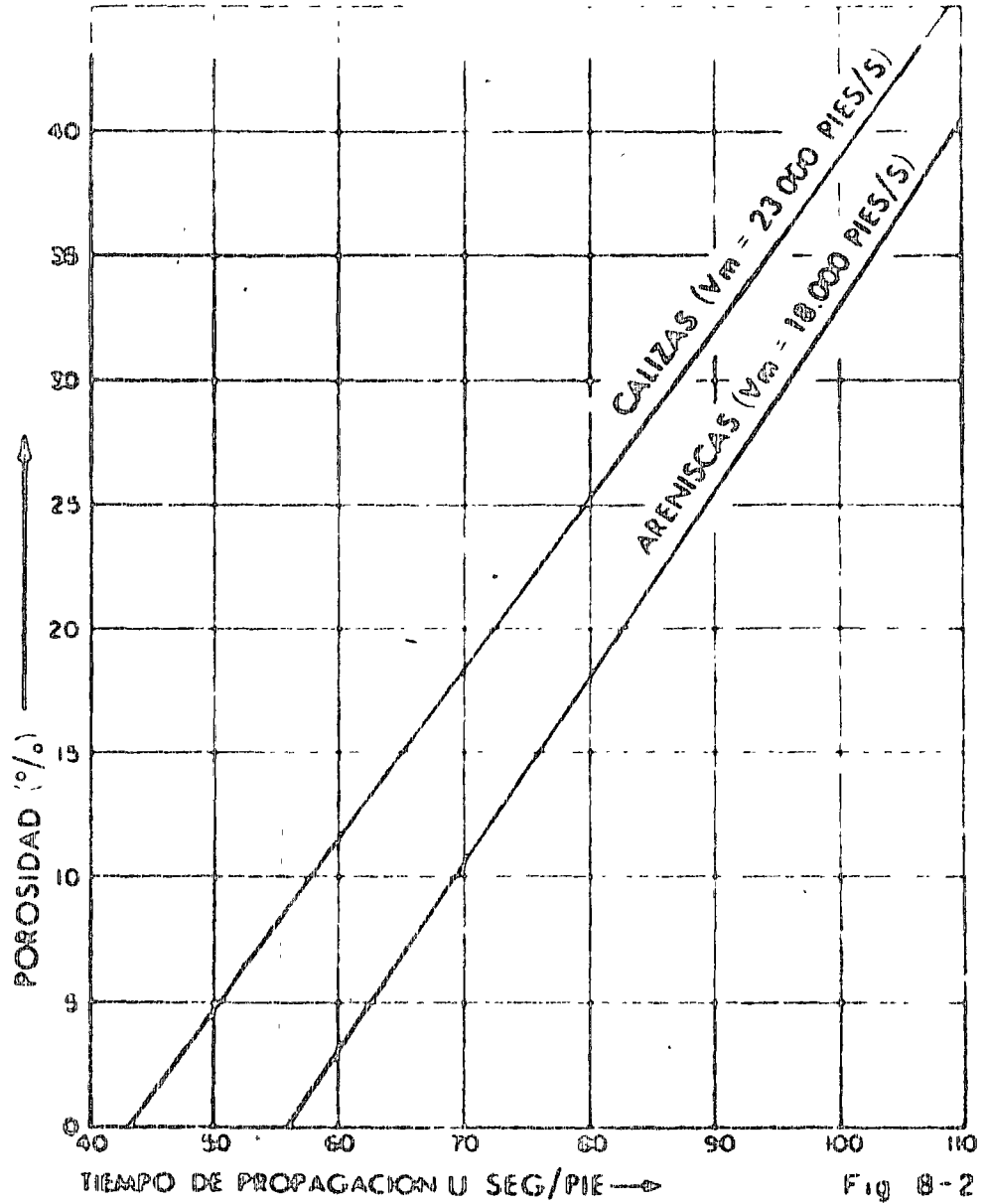


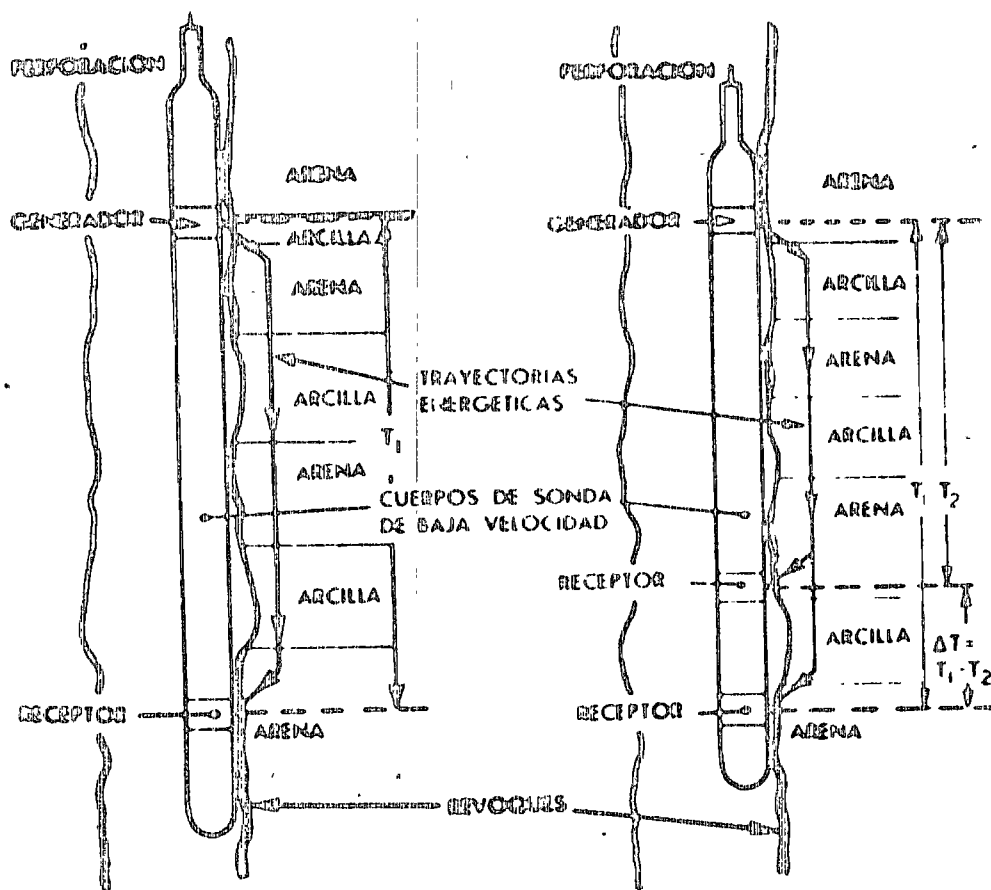
Fig 8-2

Figura 8-2. Relación entre Porosidad y Tiempos de Propagación en Co-



TABLA I

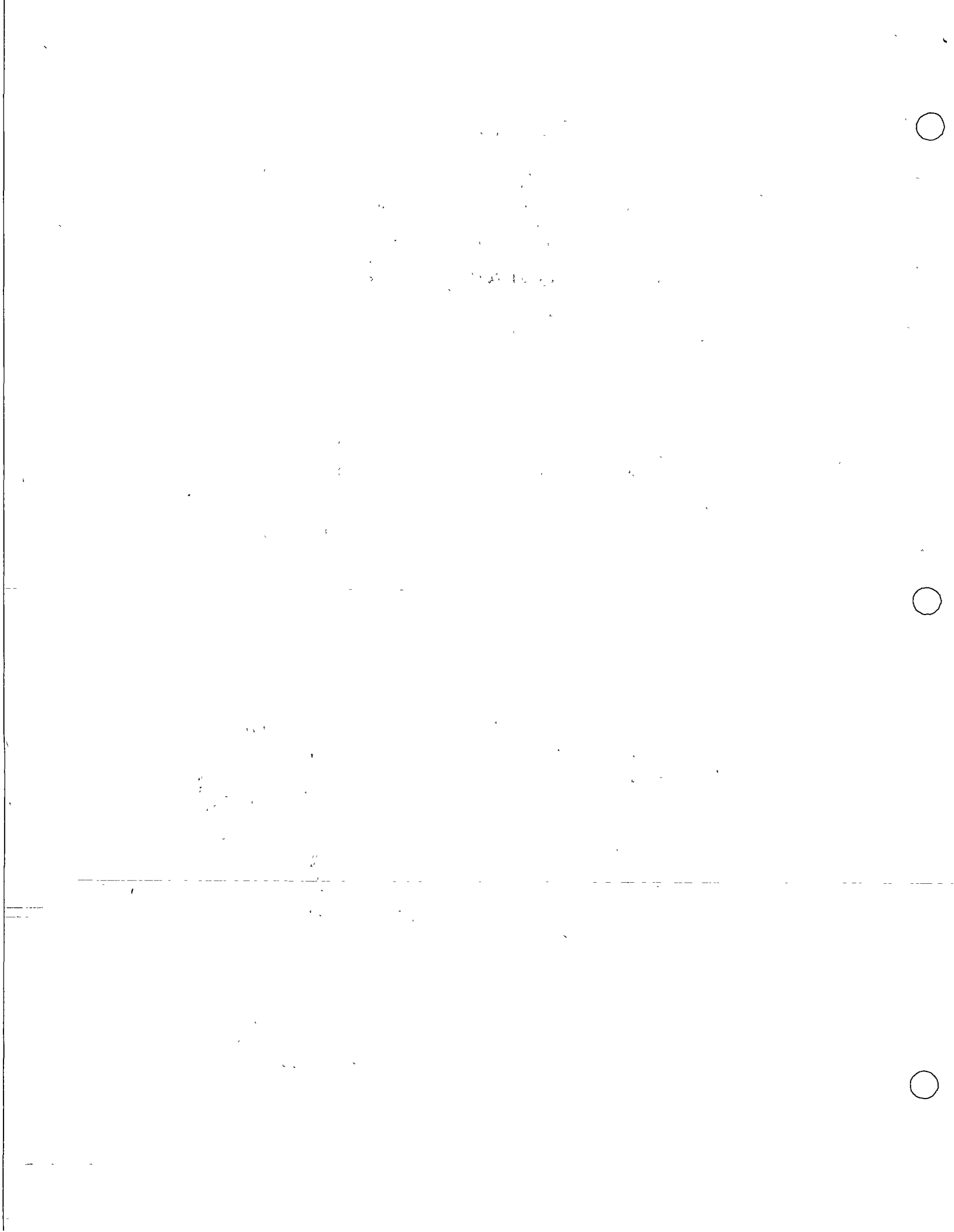
Materia	Cantidad de muestra V (litros/seg.)	Temperatura de muestra, $\Delta T$ (en $^{\circ}C$ , p. seg./litro)
Aire (S. T. P)	1000	919
Asturno (S. T. P)	1417	706
Petr6leo	4300	232
Agua (Barro)	5000 5700	200
Neoprene (Tnico)	5300	189
Arcillas	6000 16 000	167 62 5
Sul de floco	15.000	66 7
Areniscos	hasta 18.000	55 6
Arquidrita	20.000	50 0
Calizas	hasta 23 000	43 5
Dolomita	24.500	40 0



TPO DE UN RECEPTOR

TPO DE DOS RECEPTORES

... ..



**TABLA I**

Rayos Gamma Energía (MeV)	NVT (pulgadas)			
	Agua	Piedra Caliza Carpentería o Arena	Hierro	Plomo
0.2	20	0.83	.26	.055
1.0	40	1.8	.61	.34
5.0	91	3.9	1.1	.58

**TABLA II**

Elemento	Vida media (10 <sup>9</sup> años)
Uranio - 238	4.5
Thorio - 232	14.
Potasio - 40 *	14

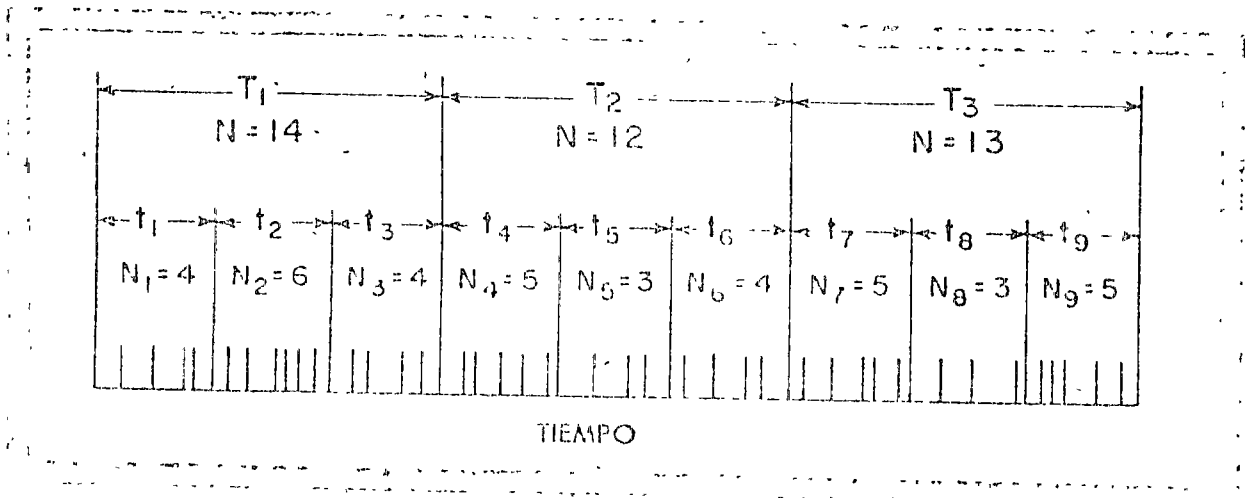
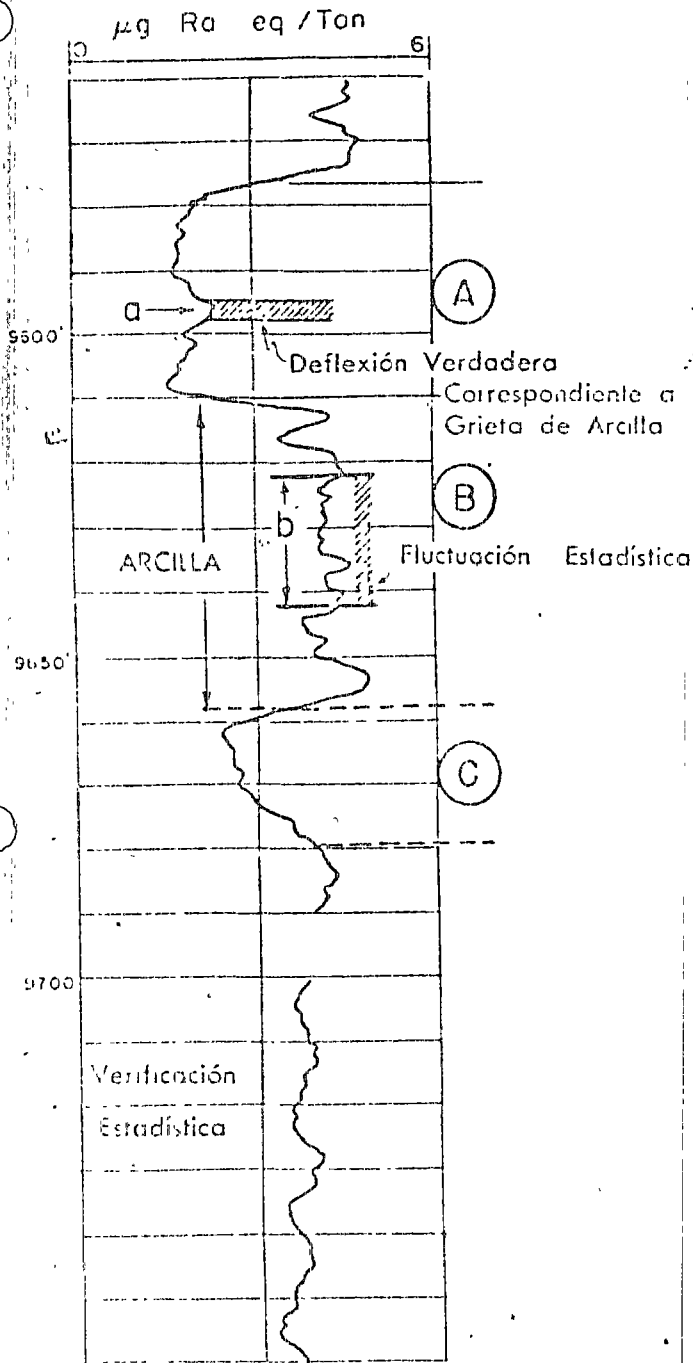


Figura 7-1. Sucesión Casual de los Fenómenos de Radioactividad, Cada Línea Vertical Corta representa una Desintegración





RAYOS GAMMA



a 7-2. Diferenciación entre Deflexiones verdaderas y Variaciones Estadísticas

CUENTAS POR SEGUNDO

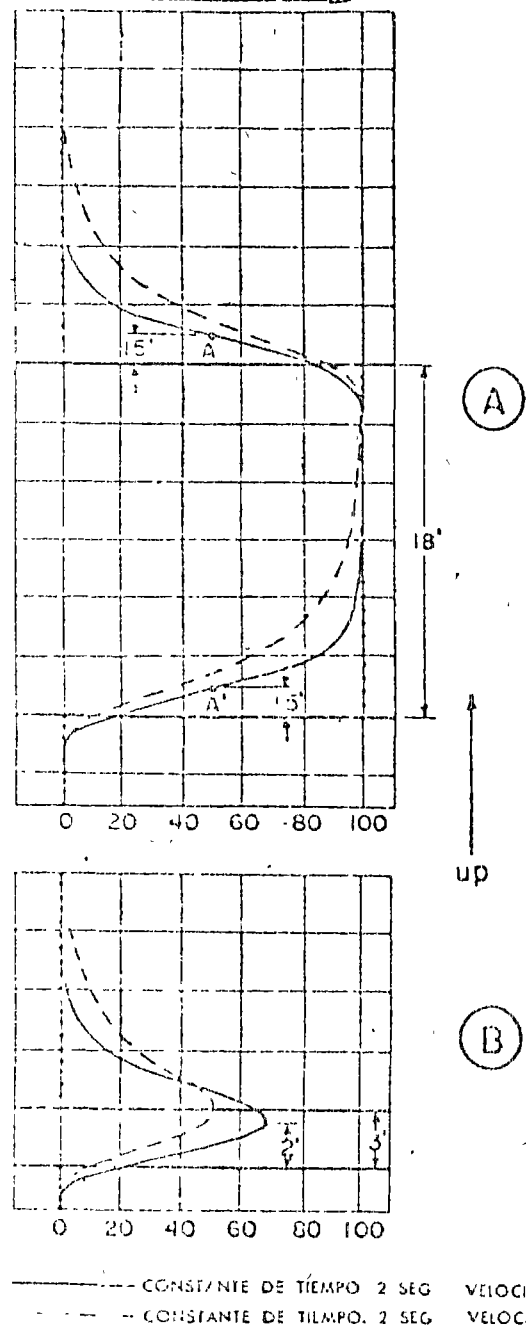
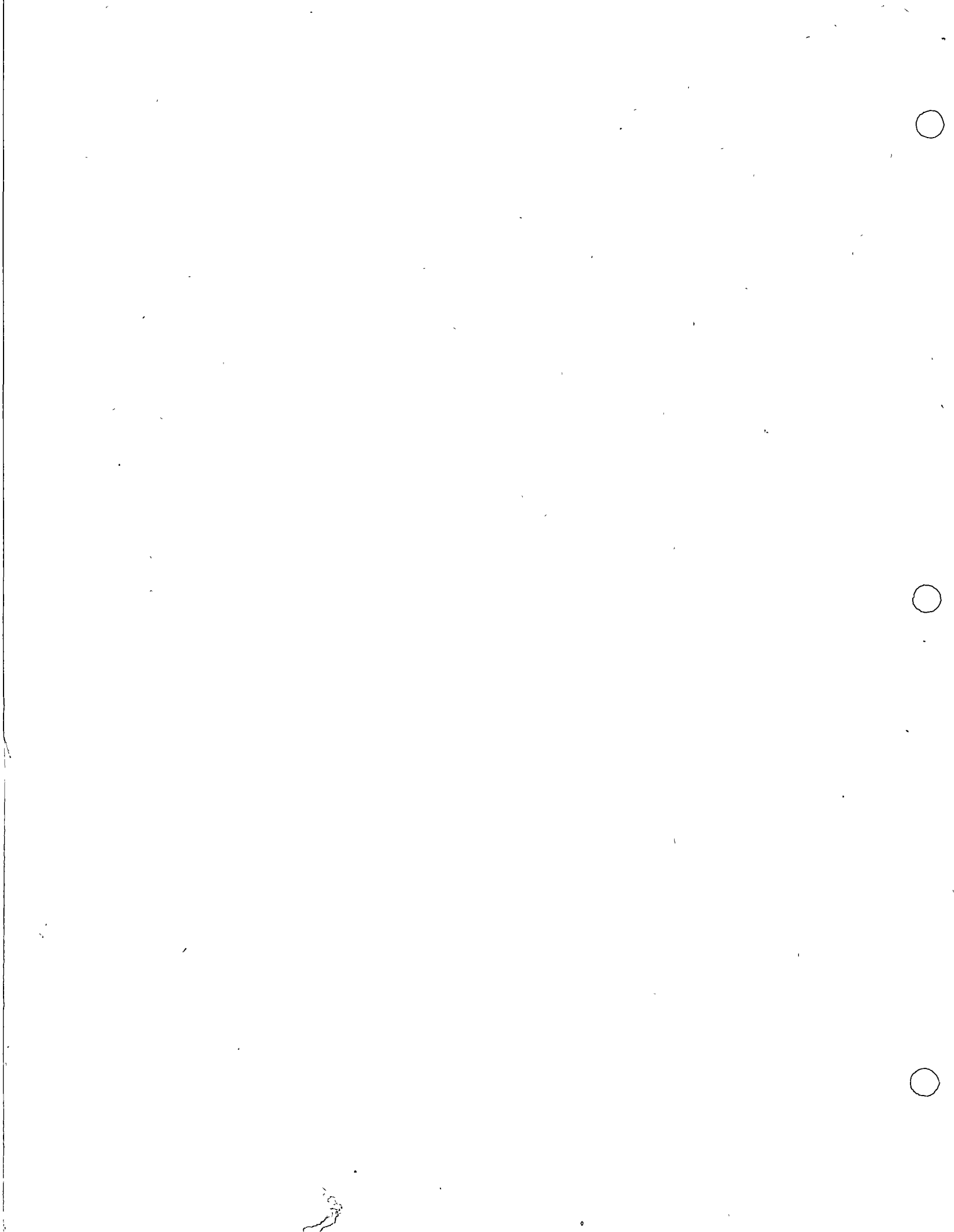


Figura 7-3. Curvas aproximadas de Rayos Gamma en el caso de Capa Gruesa (A) y Capa Delgada (B)



G X

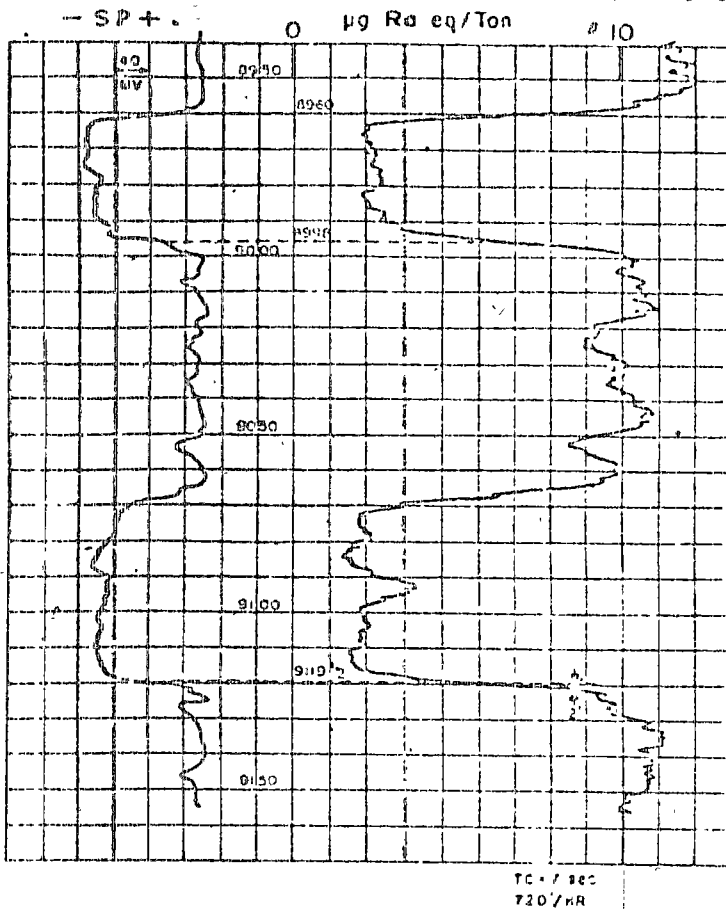


Figura 7-4. Comparación del Perfil de Rayos Gamma y la Curva de S P en Series Arena-Arcilla. (Curva de Rayos Gamma y la diferencia en los Puntos de Medida)

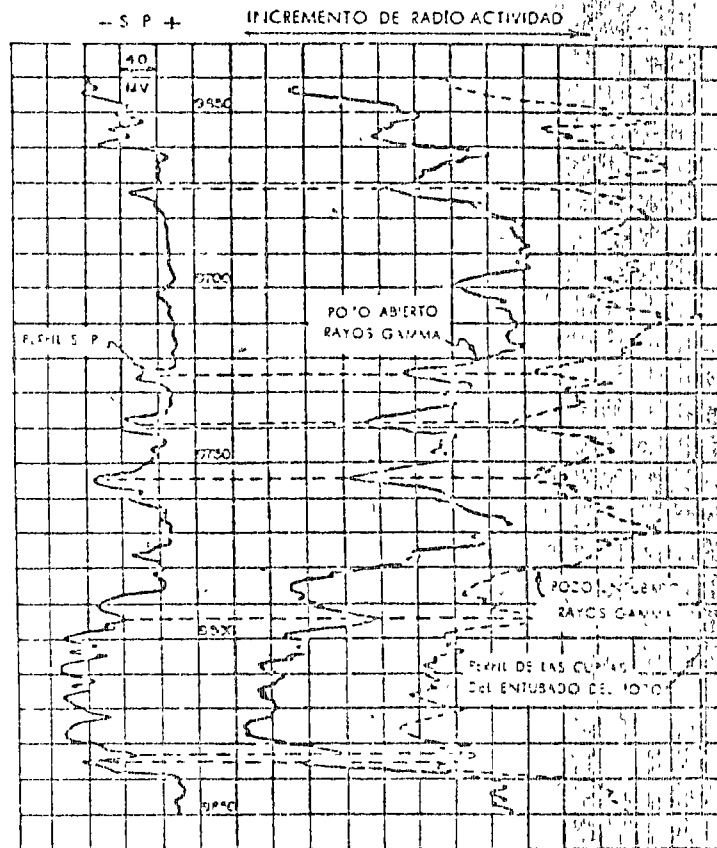


Figura 7-6. Ejemplo del uso del Perfil de Rayos Gamma para Control de Profundidad en Pozos Entubados.



# EL PERFIL SONICO

7

El Perfil Sónico es un registro de la profundidad versus  $\Delta t$ , el tiempo requerido por una onda compresional de sentido contrario en un pozo de formación. Conocido también como "tiempo de tránsito",  $\Delta t$  es el valor recíproco de la velocidad de una onda compresional de sonido. El tiempo de tránsito en una formación dada depende de su litología y porosidad. La dependencia de la porosidad, conocida la litología, hace que el Perfil Sónico sirva mucho como registro de porosidad. El tiempo de tránsito Sónico Integrado es muy útil en la interpretación de registros sísmicos.

## EL SISTEMA SONICO COMPENSADO (BHC)

Los instrumentos actualmente usados para obtener Perfiles Sónicos son del tipo BHC (Bore Hole Compensated) es decir, el BHC elimina substancialmente los efectos debidos al cambio en el diámetro del pozo<sup>(1)</sup> como también los errores debidos por la inclinación de la sonda.

Como podemos ver en la Fig. 7-1 el sistema BHC<sup>(2)</sup> usa un transmisor y un receptor en cada extremo de la sonda. Cuando un transmisor es activado por un pulso, este genera una onda de sonido la cual penetra la formación. Se mide el tiempo transcurrido entre la detección del primer arribo de las ondas de energía correspondientes. Los caminos recorridos por las ondas de arriba de las ondas compresionales de energía acústica, indicados en la Fig. 7-1.

La velocidad del sonido en la sonda Sónica y en el líquido de la formación es menor que en la formación. Consecuentemente los primeros arribos de energía acústica a los receptores corresponden a recorridos del sonido dentro de la formación desde la pared del pozo.

Los transmisores de la sonda del tipo BHC son activados en forma sucesiva y los valores de  $\Delta t$  son leídos en pares alternos por los receptores. Los valores de  $\Delta t$  son promediados y el promedio es leído por un computador en la superficie. El computador también integra los tiempos de tránsito para obtener el tiempo total de tránsito.

Algunas veces el primer arribo, aunque sea suficientemente fuerte para activar el receptor más cercano al transmisor, sin embargo, resulta demasiado débil para activar el receptor más lejano. Esto puede ser activado por un arribo más fuerte del tipo de ondas y como resultado el tiempo de tránsito medido en este ciclo será demasiado largo. Cuando esto ocurre, la curva sónica muestra una deflexión abrupta y se muda hacia valores más grandes de  $\Delta t$ . Este efecto es conocido como "salto de ciclo" (cycle skipping). Estos saltos ocurren solamente cuando la señal es fuertemente atenuada por formaciones no consolidadas, por fracturas, por saturación de gas, o por lodos con aire o gas en suspensión.

## PRESENTACION DEL PERFIL

La velocidad del sonido en las litologías comunes de las formaciones varía alrededor de 18,000 a 26,000 pies/seg. Se registra el valor recíproco de la velocidad en microsegundos/pie (44 seg/pie) para evitar el uso de fracciones decimales pequeñas. La ganancia del registro varía desde una

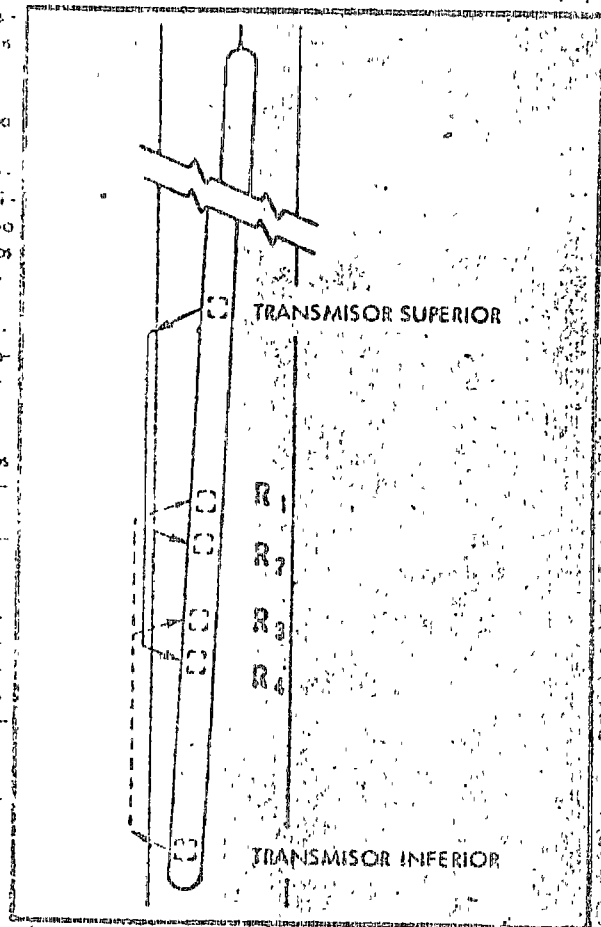


Fig. 7-1 - Esquema de la sonda BHC que muestra los caminos de los rayos para los dos conjuntos de transmisor y receptor. Al promediar las dos mediciones de  $\Delta t$  se cancelan los errores debidos a la inclinación de la sonda y cambios en el diámetro del pozo. (Cortesia AIME, Referencia 3).



TABLA 7-1

	$v_m$ (pies/seg)	$\Delta t_m$ (microseg)	$\Delta t_m$ (pies) (usado comúnmente)
Areniscas	18 000-21 000	55,6-47,6	55,5 or 51,0
Calizas	21 000-23 000	47,6-43,5	47,5
Dolomitas	23 000	43,5	43,5
Argilitas	20 000	50,0	50,0
Esquistos	15 000	67,0	67,0
Granito (hierro)	17 500	57,0	57,0

Las arenas y dolomitas densas de porosidad cero hasta unos 200  $\mu$  seg/pie para agua. El tiempo de tránsito,  $\Delta t$ , es registrado en forma lineal en las pistas 2 y 3 del Perfil (Fig. 7-2). Una curva de Calibrado de 3 trazas y una curva de Rayos Gamma pueden ser registradas simultáneamente en la pista 1. Una curva de SP puede ser registrada en vez de los Rayos Gamma, pero debido a la proximidad del metal de la sonda al electrodo de SP los valores obtenidos solo sirven para correlación. El tiempo de tránsito integrado se lo presenta por una serie de "marcos" (pips) registrados en el margen izquierdo. Los "marcos" pequeños indica un aumento de un milisegundo del tiempo de tránsito total, una "marca" grande indica un paso cada 10 milisegundos. El tiempo de tránsito entre dos profundidades se lo obtiene contando simplemente los "marcos" registrados. Este tiempo de tránsito integrado es útil en estudios sísmicos.

CARACTERÍSTICAS DE INVESTIGACION DE LA CURVA  $\Delta t$

La formación recorrida por el primer arribo penetra apenas unas pocas pulgadas de la pared del pozo. Por lo tanto, el "diámetro de investigación" del Perfil Sónico no es muy grande.

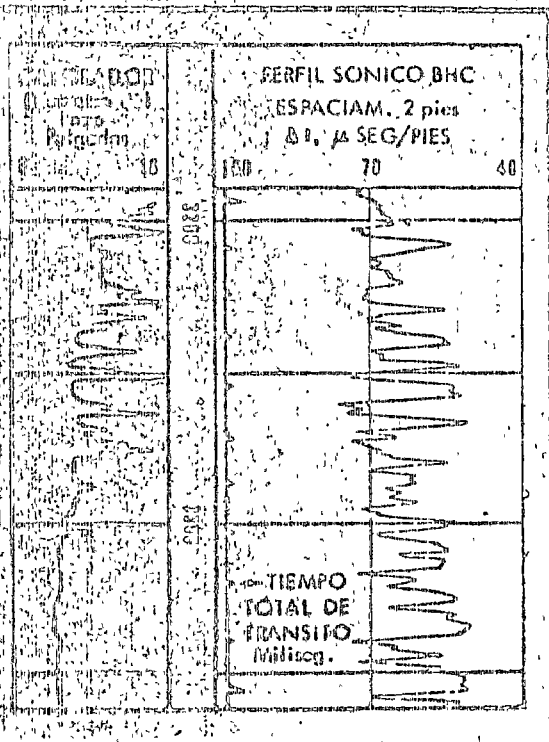


Fig. 7-2. El Perfil Sónico  
Compañía AIMS, Ref. 21

LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN LAS FORMACIONES

En formaciones sedimentarias la velocidad del sonido depende de muchos factores<sup>(1)</sup>, principalmente del material de la roca matriz (arenisca, caliza, dolomita, ...) y de la porosidad distribuida. Las gamas de valores de la velocidad del sonido y tiempo de tránsito para las rocas matrices comunes y tuberías de revestimiento están presentadas en la Tabla 7-1. También están indicados los valores que comúnmente se usan para  $\Delta t_m$  (por ejemplo: 55,5 para areniscas no consolidadas, 51,0 para areniscas compactadas).

Los valores de la Tabla 7-1 están dados para substancias no porosas. La adición de porosidad a las matrices de las rocas de las formaciones disminuye la velocidad del sonido a través de ellas, y por consiguiente aumenta el valor de  $\Delta t$ .

EVALUACION DE POROSIDAD

1. Areniscas Consolidadas y Compactadas

Luego de numerosos experimentos en el laboratorio M.R.J. Wyllie<sup>(2)(3)</sup> ha llegado a la conclusión de que en formaciones limpias y consolidadas con pequeños poros distribuidos uniformemente, existe una relación lineal entre la porosidad y el tiempo de tránsito.

$$\Delta t_{\text{perfil}} = \phi \Delta t_{\text{huevo}} + (1-\phi) \Delta t_{\text{matriz}}$$

$$\phi = \frac{\Delta t_{\text{perfil}} - \Delta t_{\text{mat}}}{\Delta t_{\text{h}} - \Delta t_{\text{mat}}} \quad (7-1)$$

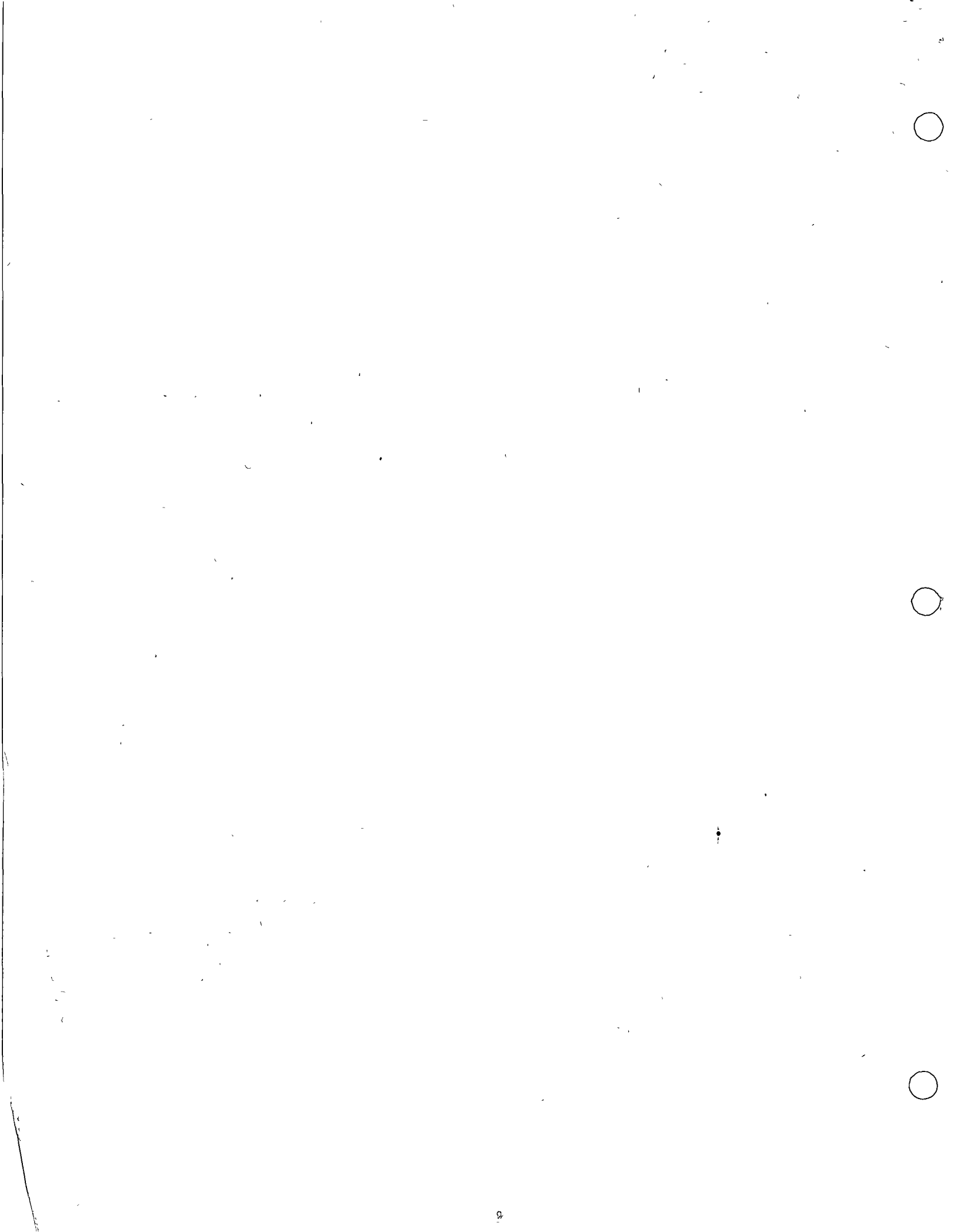




TABLE III  
GAMMA RAY - NEUTRON  
EQUIPMENT SPECIFICATIONS

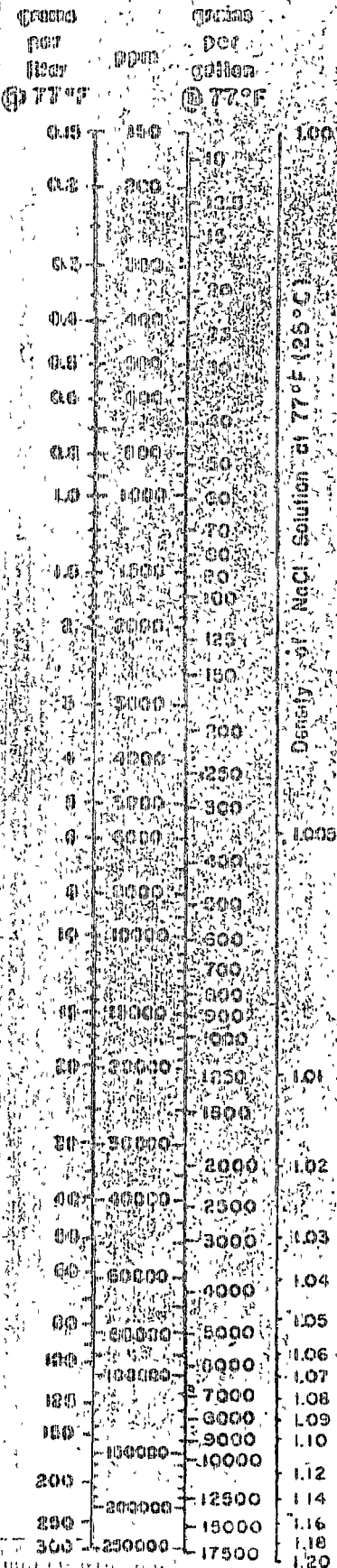
Series Number	Neutron Log Type	Neutron Detector Type	Gamma Ray Detector Type	Max. O. D. Inches <sup>1</sup>	Neutron Source Used	S - D Spacing Inches	N-API with D-368 Calib.	GR-API in C-933 Calib.	Max. Pressure PSI	Max. Temp. °F	Assembled Length Feet
402	N-TN	Scint.	Scint.	3-5/8	S16D5	13.5	500	206	20,000	300	14.7
402	N-TN	Scint.	Scint.	3-5/8	S16D5	18.0	933	206	20,000	300	15.2
402	N-TN	Scint.	Scint.	3-5/8	S10A3	13.5	580	206	20,000	300	14.7
402	N-TN	Scint.	Scint.	3-5/8	S10A3	18.0	*	206	20,000	300	15.2
402	N-TN	Scint.	Scint.	3-5/8	S17N5	18.0	=	206	20,000	300	15.2
414	N-EN	Scint.	Scint.	3-5/8	S16D5	12.5	833	206	20,000	300	15.2
2402	N-EN	Scint.	Scint.	3-5/8	S16D5 or S17N5	12.7	833 *	224	20,000	400 <sup>2</sup>	11.7
1207 <sup>3</sup>	N-TN	Prop.	Scint.	3-5/8	S16D5	13.5	433	206	20,000	300	
2403	N-EN	Scint.	Scint.	3-1/2	S16D5 or S17N5	12.7	833 *	224	15,000	400 <sup>2</sup>	11.7
301	N-GR	G-M	G-M	2-5/8	S16D5	11.0	332	212	18,000	300	12.0
310	N-TN	Prop.	G-M	1-3/4	S16D5	13.0	321	219	18,000	300	11.8
330	N-TN	Prop.	G-M	1-3/8	S17N5	13.0	476	224	12,000	300	11.5

<sup>1</sup> Approx. min. hole size = O.D. + 3/8"  
<sup>2</sup> 1 hour @ 400°F  
<sup>3</sup> Used in combination with Focused Log  
<sup>4</sup> Not presently available

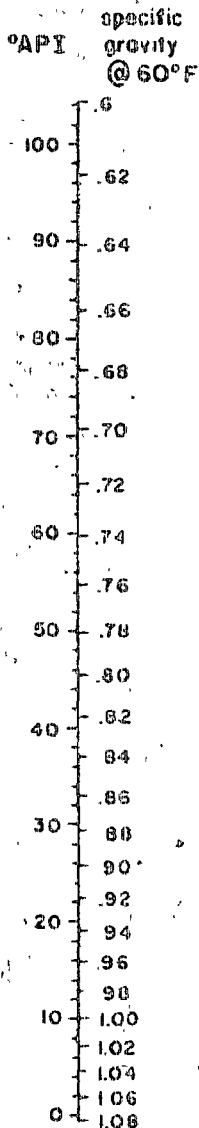


# CONVERSIONS AND EQUIVALENTS

## CONCENTRATION



## OIL GRAVITY



## USEFUL EQUIVALENTS

### LENGTH

1 foot (ft).....	equals...	30.48 cm
1 inch (in.).....	equals...	2.540 cm
1 meter (m).....	equals...	3.281 ft
".....	equals...	39.37 in.

### VOLUME

1 acre-foot.....	equals...	7,757 bbls
".....	equals...	43,560 cu ft
1 barrel (bbl) of oil.....	equals...	42 U.S. gal
".....	equals...	5.6154 cu ft
".....	equals...	158.98 liters
1 cubic foot (cu ft).....	equals...	7.481 U.S. gal
".....	equals...	28.32 liters
1 U.S. gallon (gal).....	equals...	231.00 cu in.
".....	equals...	0.1337 cu ft
".....	equals...	3.785 liters
1 imperial gallon (England, Canada, Australia, etc.).....	equals...	1.2009 U.S. gal
".....	equals...	4.5460 liters
1 liter (1000 cc).....	equals...	0.03532 cu ft
".....	equals...	0.2642 U.S. gal

### MASS

1 grain.....	equals...	0.0001429 (or 1/7000) lb
".....	equals...	0.06480 gm
1 pound (lb) avoirdupois.....	equals...	0.4536 kg
1 metric ton (1000 kg).....	equals...	2205 lb

### DENSITY, SPECIFIC GRAVITY, etc.

1 gram per cubic centimeter (gm/cc).....	equals...	62.43 lb/cu ft
".....	equals...	8.345 lb per U.S. gal
1 U.S. gallon of liquid weighs..... (in pounds avoirdupois)	... @ .125 multiplied by density in gm/cc	
1 imperial gallon of water at 62°F weighs 10 lb	(in pounds avoirdupois)	
1 barrel of oil weighs..... (in pounds avoirdupois)	... @ .350 multiplied by density of oil in gm/cc	

OIL GRAVITY in degrees API is computed as:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{Spec. Grav. } 60/60^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

where Spec. Grav. 60/60F means specific gravity of oil at 60°F referred to water at 60°F

### PRESSURE

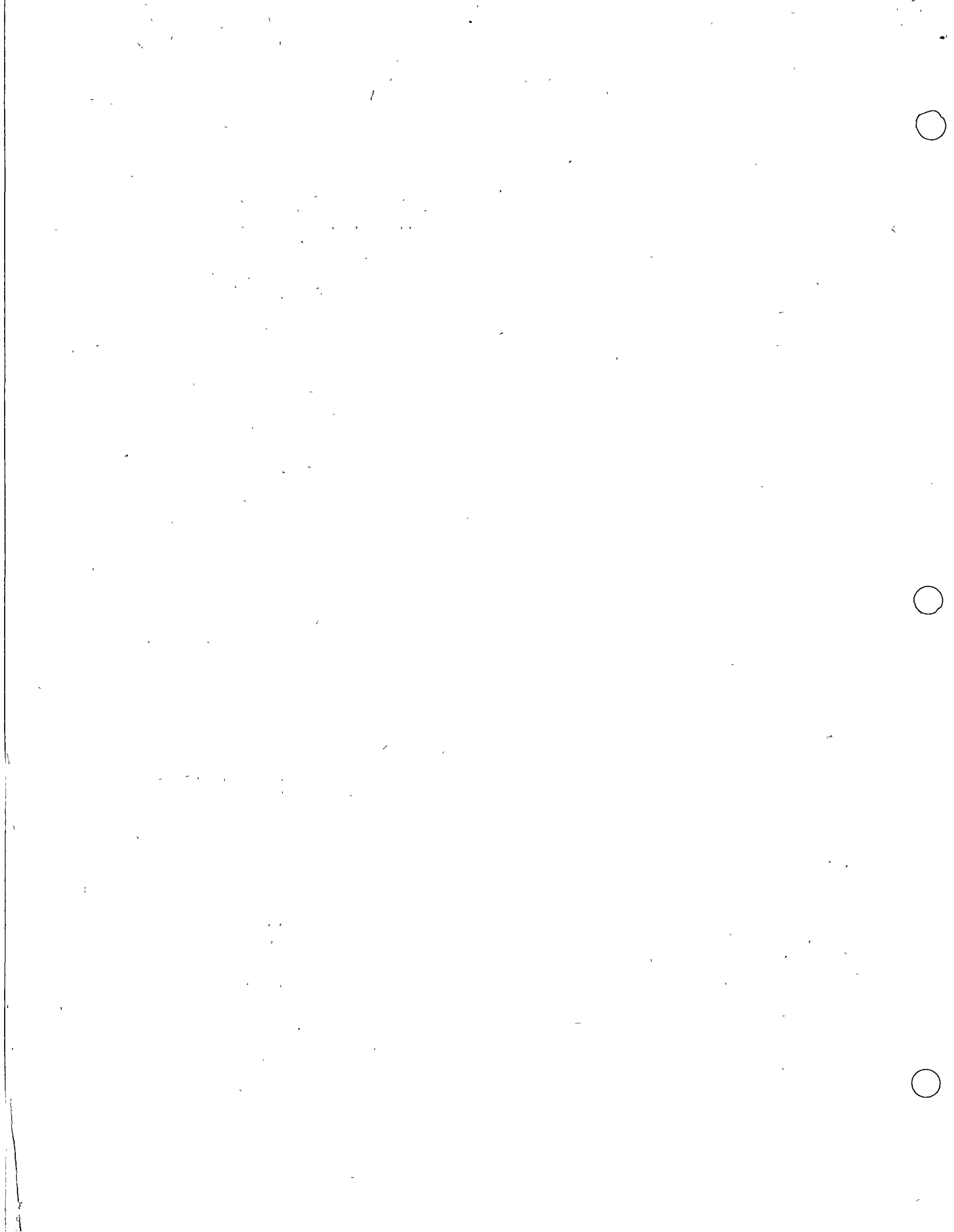
1 atmosphere (atm).....	equals...	14.70 psi
".....	equals...	1.0332 kg/sq cm
1 kilogram per square centimeter pressure (kg/sq cm).....	equals...	14.22 psi
1 pound per square inch (psi).....	equals...	0.07031 kg/sq cm
".....	equals...	0.06805 atm

### TEMPERATURE CONVERSIONS

$^{\circ}\text{F} = 1.8 ^{\circ}\text{C} + 32$	$^{\circ}\text{R (Rankine)} = ^{\circ}\text{F} + 459.69$
$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$	$^{\circ}\text{K (Kelvin)} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$

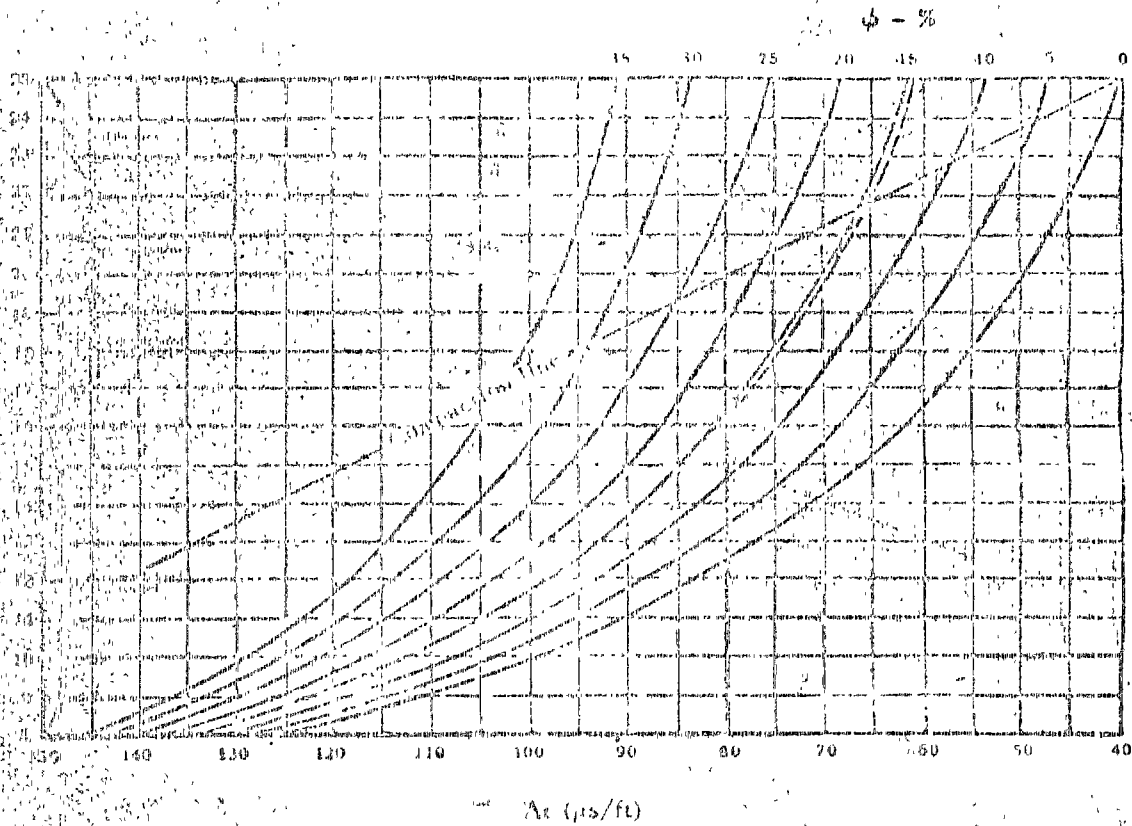
### CONCENTRATION

1 grain/U.S. gallon.....	equals...	0.017118 gms/liter
1 grain/U.S. gallon.....	equals... 17.118 divided by the density in gms/cc	
1 gram/liter.....	equals... 58.417 grains/gal	
1 gram/liter.....	equals... 1000 divided by the density in gms/cc	



# φ from ACOUSTIC LOG

## COMPRESSIONAL WAVES



MATERIAL	TYPICAL $v_{in}$ (ft/s)	TYPICAL $v_{out}$ (ft/s)	TYPICAL $\Delta t$ (μs/ft)
Dolomite	23,000		43.5
Limestone	21,000		47.7
Sandstone	18,000		55.5
Sand (unconsolidated)	12,000		83.3
Shale	9,000		111.0
Calcite	22,000		45.5
Anhydrite	20,000		50.0
Granite	19,700		50.8
Gypsum	15,000		66.7
Quartz	16,000		62.5
Salt	15,000		66.7
Cement	17,000		58.8
Casing	17,500		57.1
Water with 20% NaCl		5,300	189.0
Water with 15% NaCl		5,000	200.0
Water with 10% NaCl		4,800	208.0
Water (pure)		4,600	215.0
Oil		4,200	238.0
Methane		1,600	626.0
Air		1,100	910.0

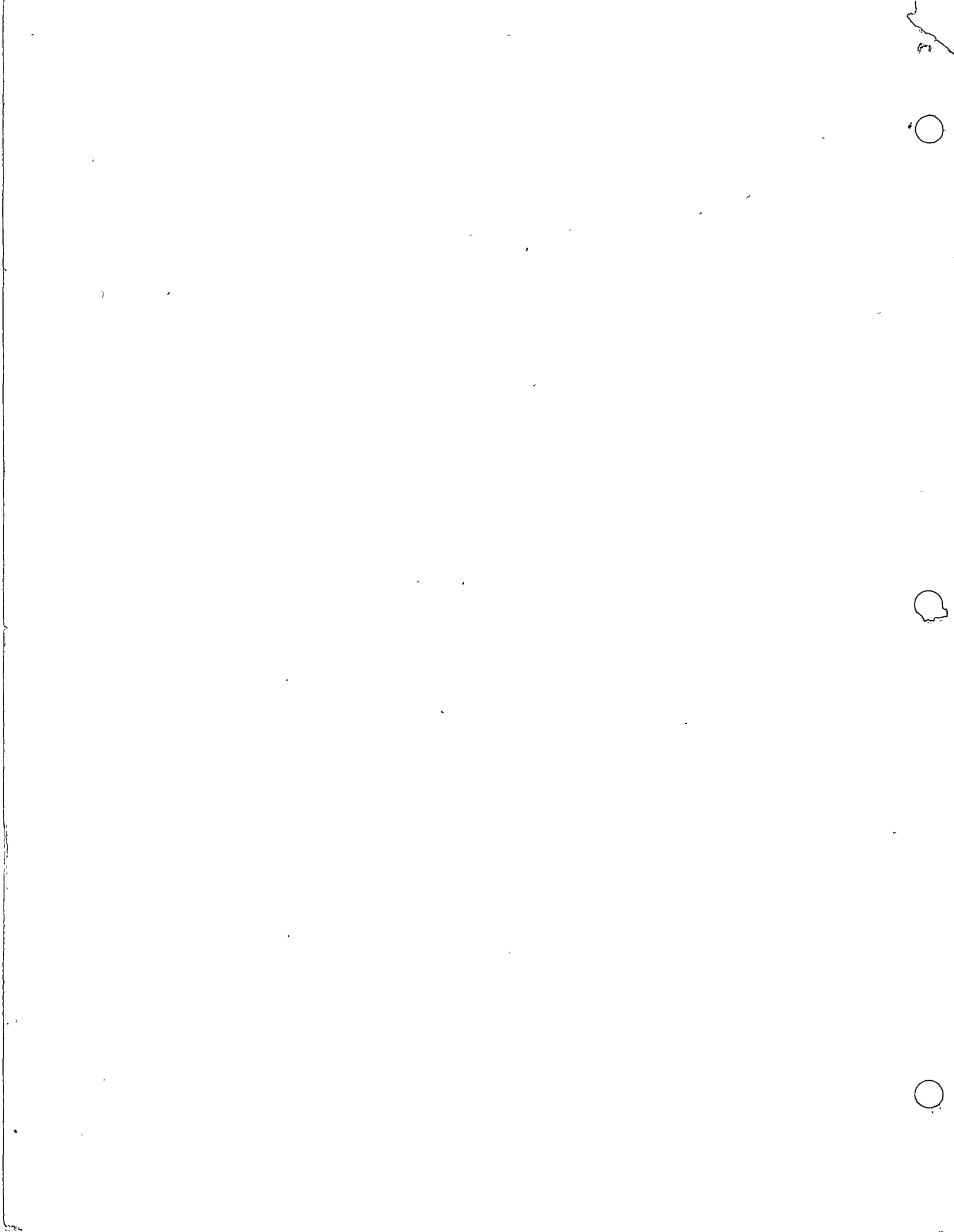


HIDROLOGIA SUBTERRANEA

LAS CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS DEL ANTIPLANO  
MEXICANO

ING. JORGE ANTONIO TRUJILLO CANDELARIA

JULIO DE 1976.





LAS CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS DEL ALTIPLANO MEXICANO.

Por: Ing. 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.

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

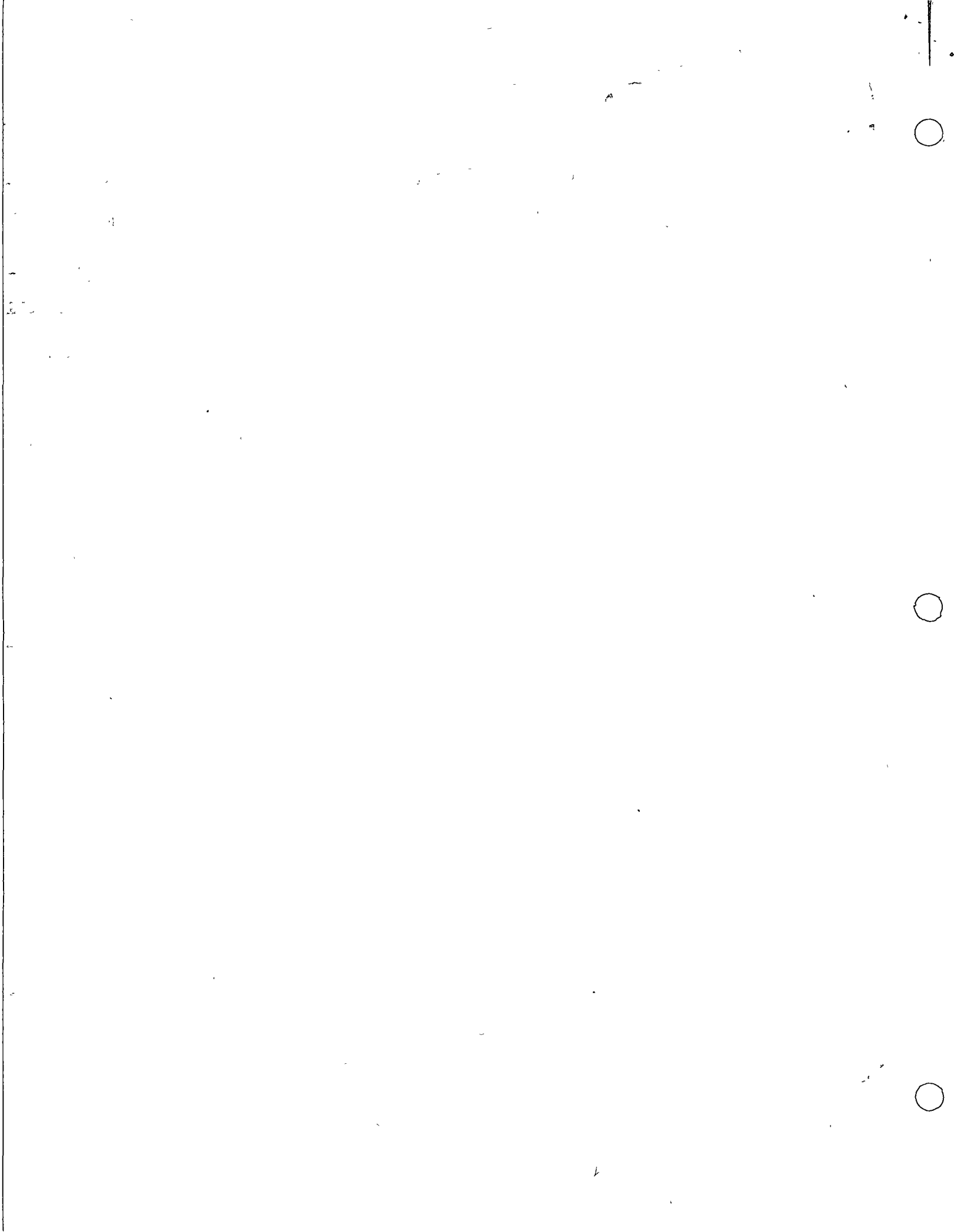
... ..  
... ..  
... ..  
... ..  
... ..  
... ..

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:

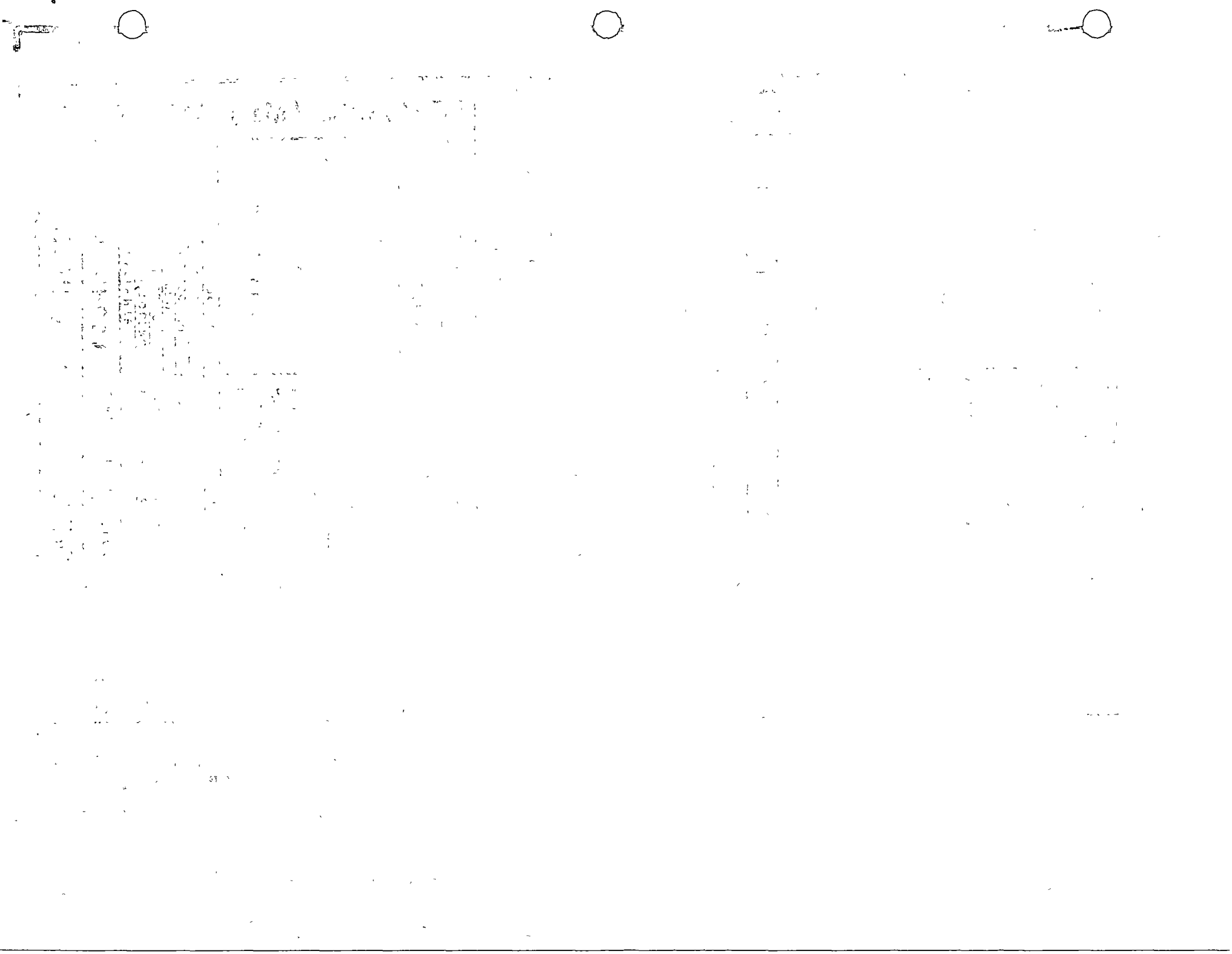
- 1).- Recopilación de información y reinterpretación de la geología regional.
- 2).- Elaboración de secciones geológicas-regionales.



ERA		ESCALA DEL TIEMPO GEOLOGICO.			
		PERIODO	EPOCA	RASGOS CARACTERISTICOS	OROGENIAS
CENOZOICO	CUATERNARIO (Q)	RECIENTE	HOMBRE MODERNO		01
		PLEISTOCENO	HOMBRE PRIMITIVO, GLACIACION	CASACIANA	25 ± 3
		PLIOCENO	GRANES CARNIVOROS		7 ± 1
	TERCIARIO (TERC.)	MIOCENO	ALGUNOS MAMIFEROS APLACENTADOS		25 ± 1
		OLIGOCENO	GRANDES MAMIFEROS CON MODORES	CUENCAS Y CORDILLERAS	28 ± 2
		EOCENO	TIPOS MODERNOS DE MAMIFEROS	LARAMIDE	64 ± 2
MESOZOICO (Més)	CRETACICO (K)	PALEOCENO.	PRIMOS MAMIFEROS PLACENTARIOS		63 ± 2
		JURASICO (J)	PRIMOS PAJAROS, PRIMOS MAMIFEROS VERTEBRADOS, MUCHOS DINOSAURIOS Y AMONITAS	NEVADIANA	135 ± 5
		TRIASICO (R)	PRIMOS DINOSAURIOS. ABUNDANTES CICADEAS Y CONIFERAS.	PALIZADA	180 ± 5
PALEOZOICO (Pz)	PERMICO (Pzp)		EXTINCION DE MUCHAS CLASES DE ANIMALES MARINOS, INCLUYENDO A LOS TRIBOLITAS GLACIACION CONTINENTAL EN EL HEMISFERIO SUR	APALACHIANA	225
					280
	CARBONIFERO (Carb)	PENSLVANICO (P)	GRANDES PANTANOS DE CARBON, CONIFERAS PRIMOS REPTILES FUSULINIDOS		310
		MISISIPICO (Miss)	TIEURONES Y ANFIBIOS ARBOLES. CON GRANDES ESCAMAS Y HELECHOS CON SEMILLAS.		345
	DEVONICO (Dev)	PRIMOS ANFIBIOS. PECES. MUY ABUNDANTES.	ACADIANA	400	
	SILURICO (Sil)	PRIMAS PLANTAS TERRESTRES		435	
	ORDOVICICO (Ord)	PRIMOS PECES. DOMINAN LOS INVERTEBRADOS MARINOS.	TACONICA	500	
CAMBRICO (C)	PRIMER INDICIO ABUNDANTE DE VIDA MARINA DOMINAN LAS TRILOBITAS Y BRAQUILOPODOS.		600		
PRE CAMBRICO	TARDIO	FOSILES GENERALMENTE RAROS	GLACIACION CONTINENTAL FORMACIONES FERRICAS	GREENVILLE KEWEENAWANO ACTIVIDAD IGNEA. PENOKIANO ALGOMANG LAURENTIANO	
MEDIO	GLACIACION CONTINENTAL				
TEMPRANO	ALGAS MAS ANTIGUAS 3200 MILL AÑOS ROCA " " 3500 MILL AÑOS				

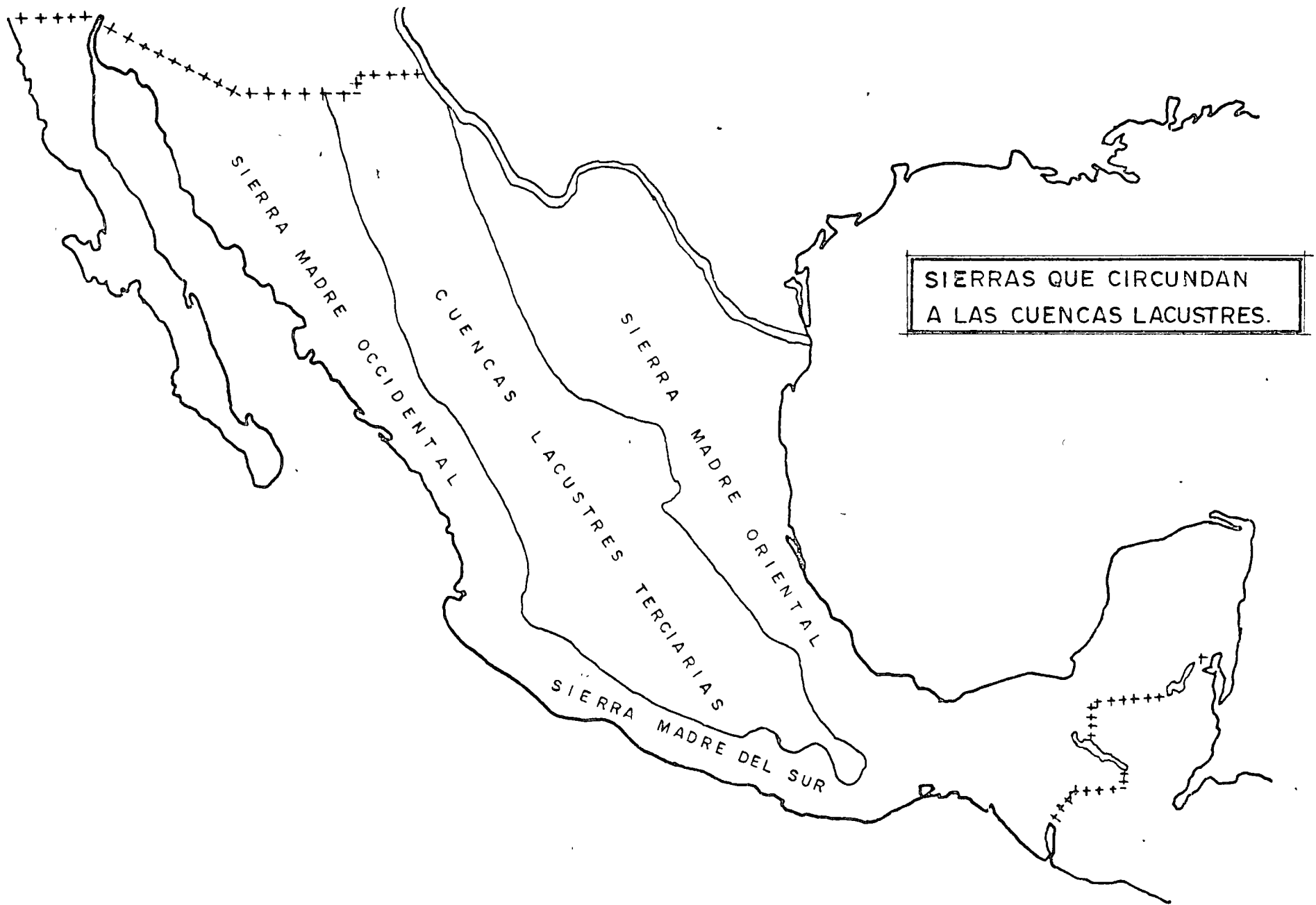
MODIFICADA DE LA ESCALA DEL TIEMPO GEOLOGICO DE J ZUMBERGE Y C.A NELSON 1972.

TABLA No.1





# CUENCAS LACUSTRES Terciarias





1942

1942

1942

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.

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or title.



LAS CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS DEL ALTIPLANO MEXICANO.

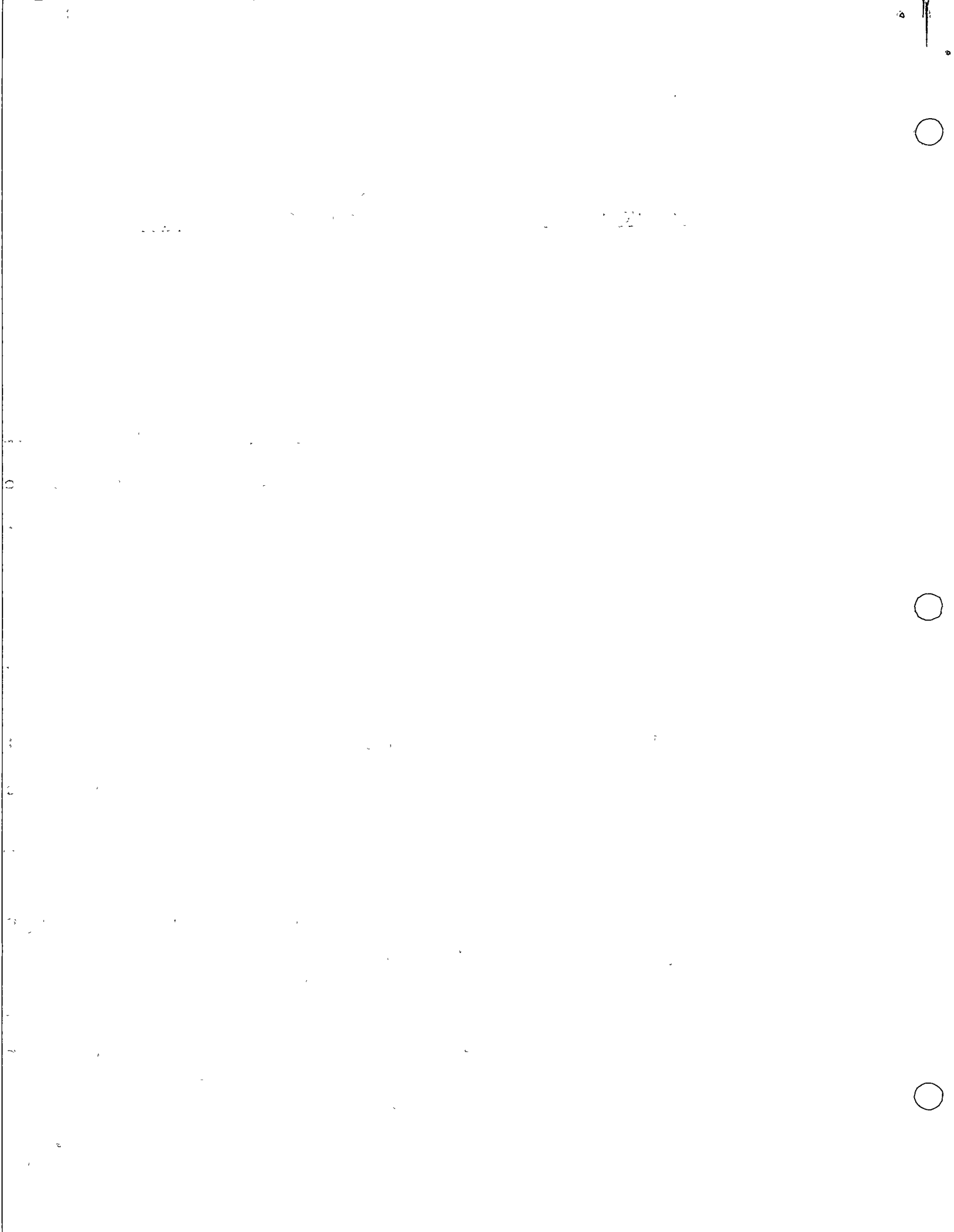
PRIMERA ETAPA DE DEPOSITACION.- CONGLOMERADOS ROJOS.

La existencia de depósitos terciarios aluviales y lacustres en el País, es conocida desde hace tiempo, sin embargo, 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 Occidental, Oriental y del Sur; fijar sus límites precisos es objeto de estudio actual (Fig. 2).

Algunas de las localidades estudiadas se encuentran 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 constituídas 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 selección de tamaños y en otros está mal clasificado.

Su color es preferentemente rojo, aunque puede



THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

RESEARCH REPORT  
NO. 100



BY  
J. H. GOLDSTEIN  
AND  
M. L. HUGGINS





encontrarse en colores verde, morado o café.

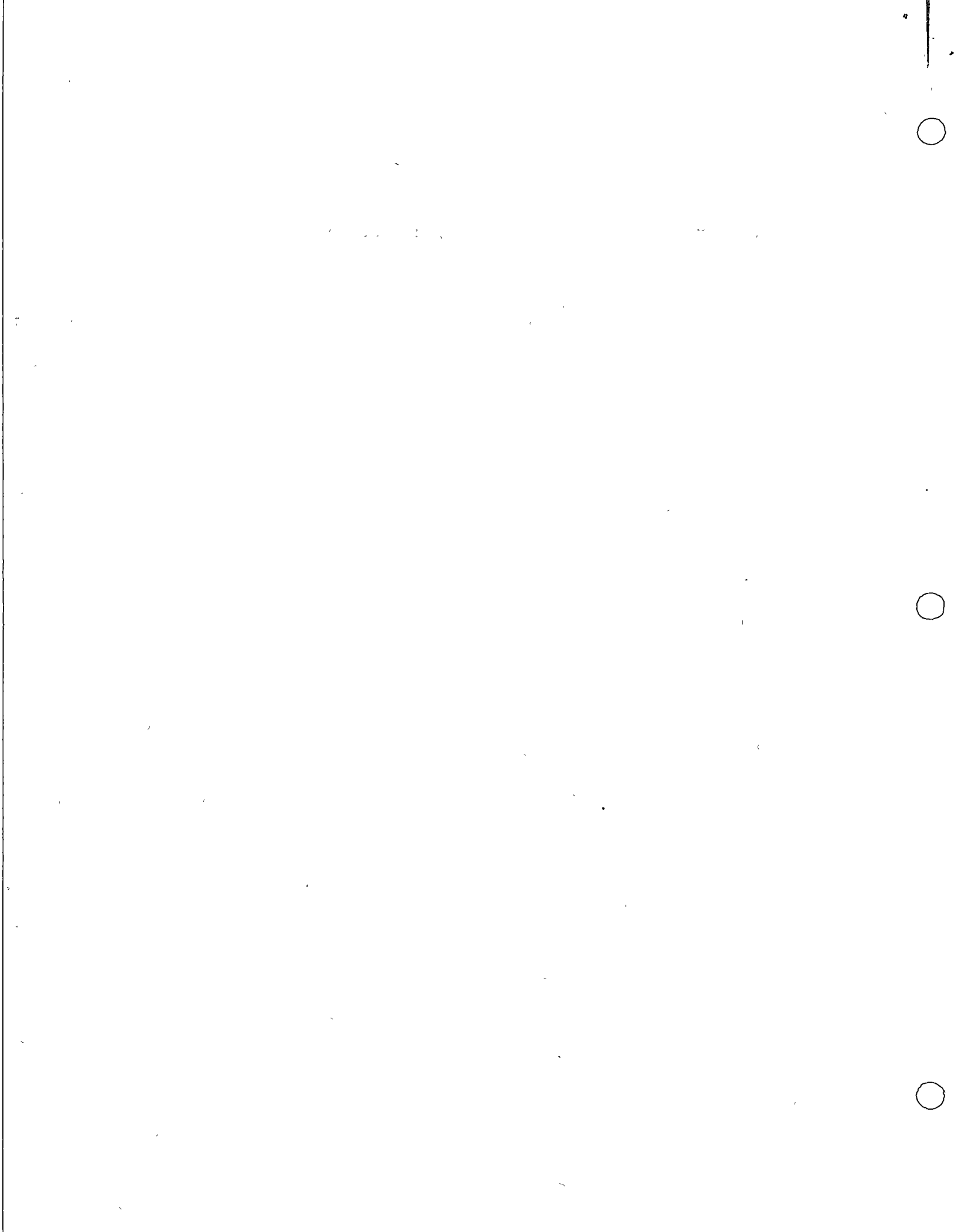
Generalmente, se presentan en capas inclinadas, afectadas por fallas y fracturas, pero es difícil encontrar las plegadas.

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.

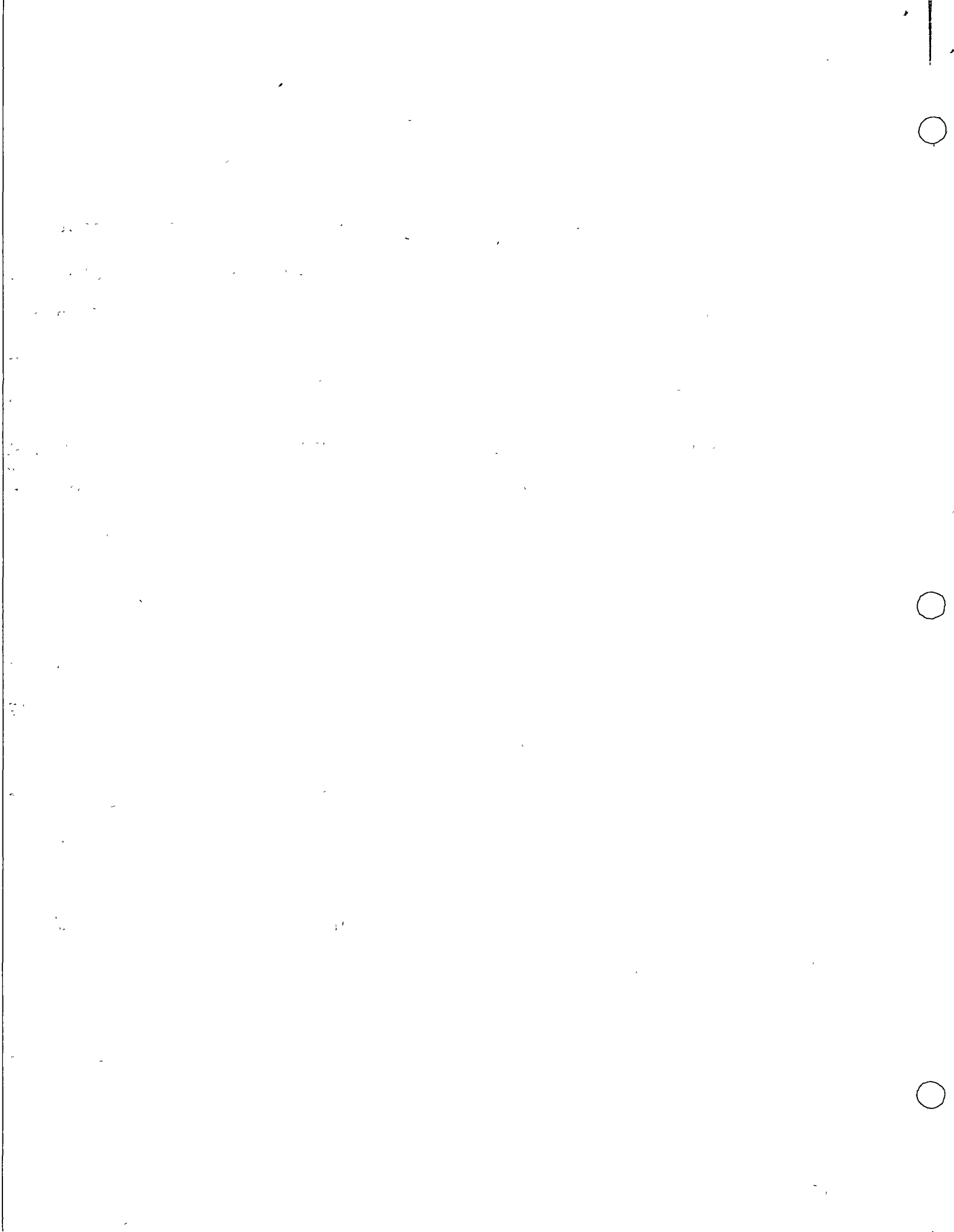
La distribución de sus afloramientos en áreas



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 formaciones, aún en afloramientos separados por grandes distancias, su estratigrafía y sus relaciones con fenómenos ígneos intrusivos y extrusivos, revelan temporaneidad y posiblemente hayan tenido intercomunicación, 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 periodo Cretácico, en ese tiempo, lo que ahora es territorio mexicano, estaba casi totalmente ocupado por mares, permaneciendo emergidas parte de la cordillera que ahora conocemos como Sierra Madre Occidental, constituida principalmente, por rocas ígneas extrusivas e intrusivas. Hacia el sur, en el área actual de los Estados de Guerrero y Oaxaca, constituida por un complejo de rocas metamórficas e intrusivas, permanecía emergida la Sierra Madre 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.

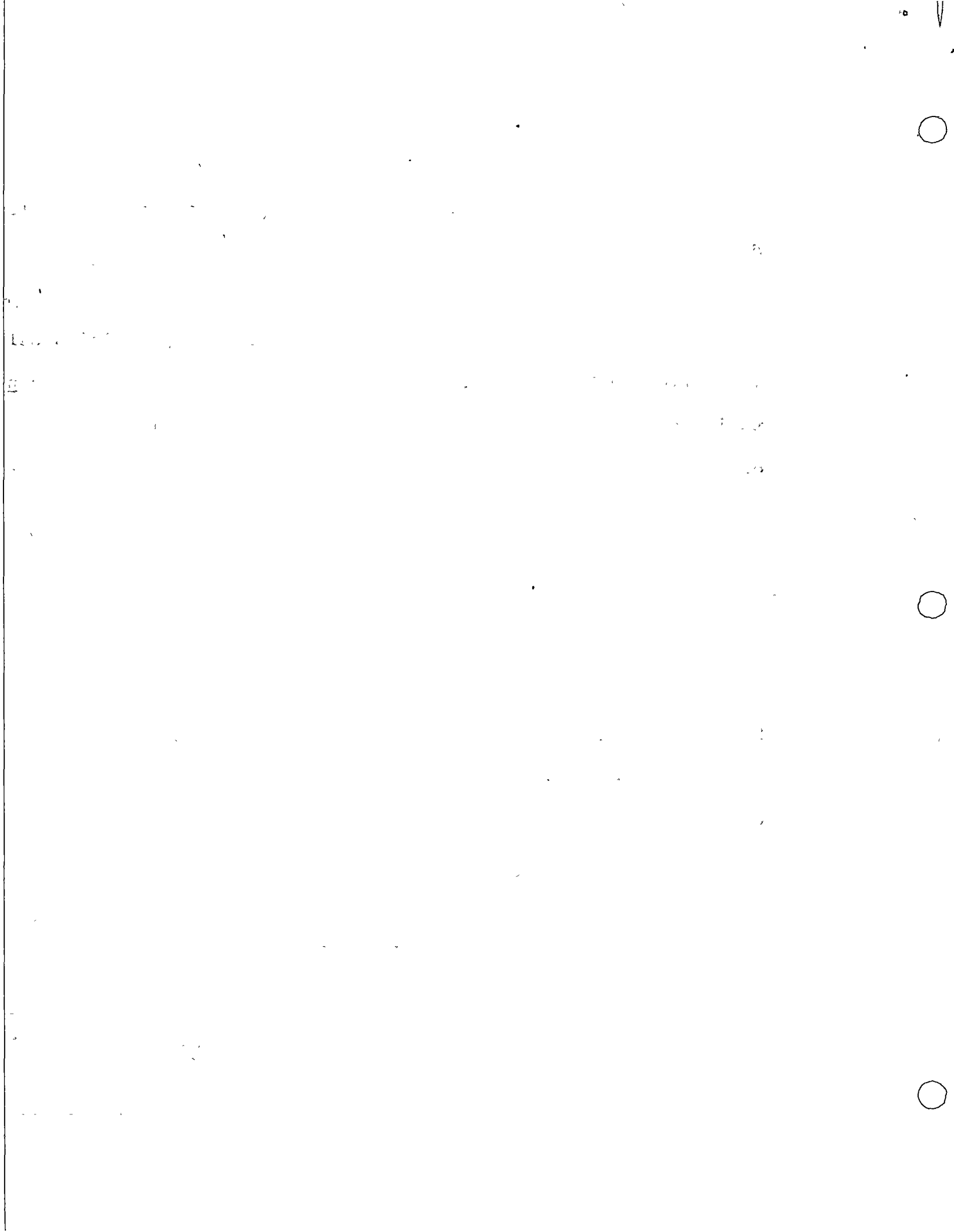
A fines del período Cretácico y principios del Terciario, la Revolución Laramide ocasionó que las capas sedimentarias depositadas en mares localizadas al Este de la Sierra Madre Occidental, se plegaran dando origen a la formación de la Sierra Madre Oriental.

Después de esto, 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

##t.....



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





# CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS

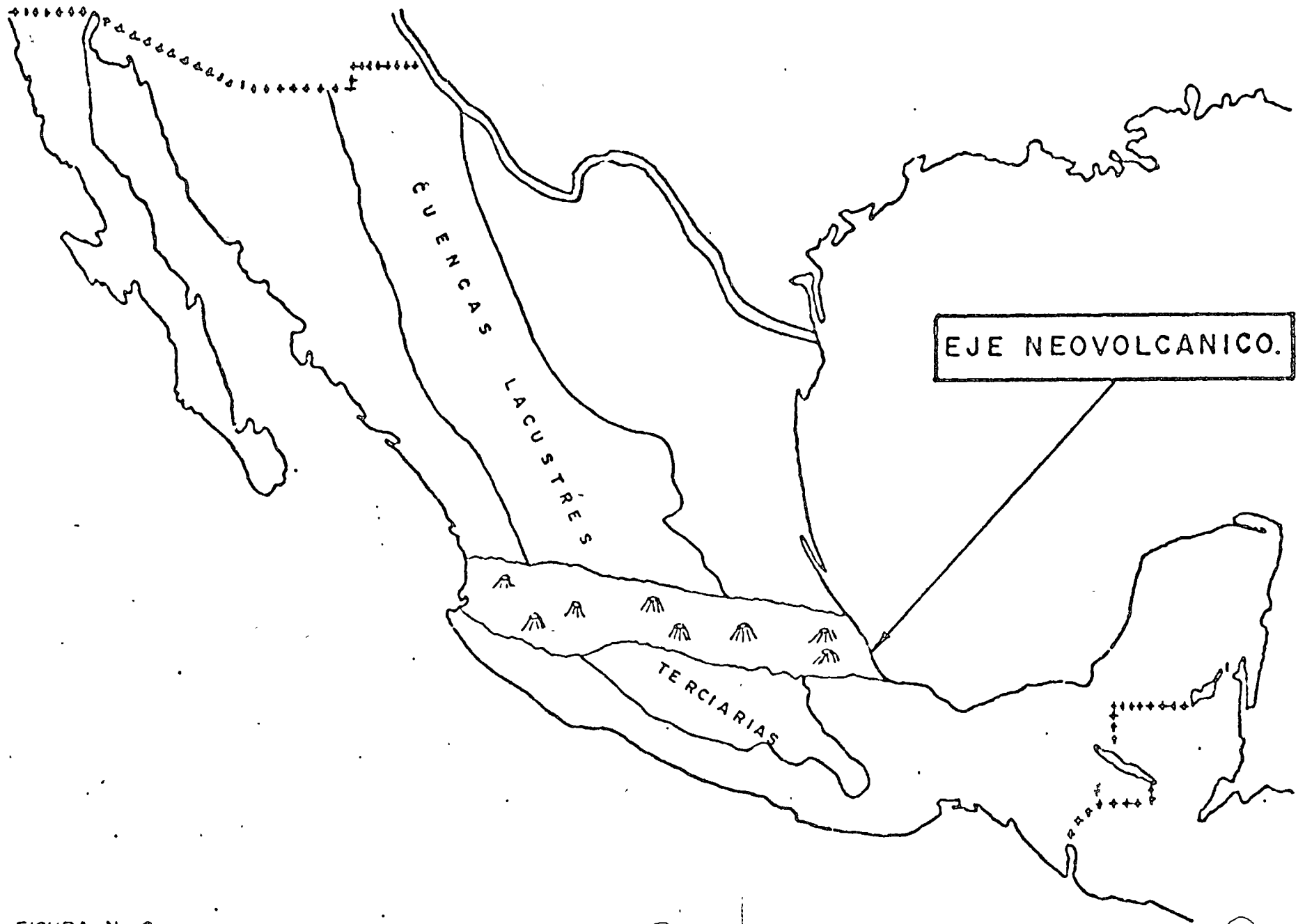
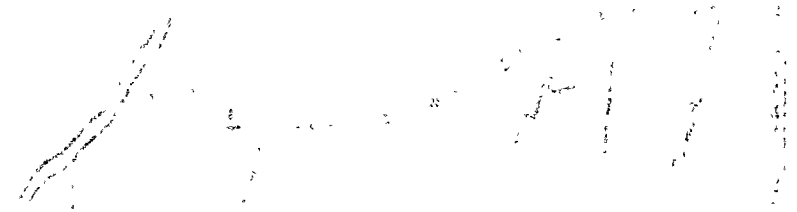


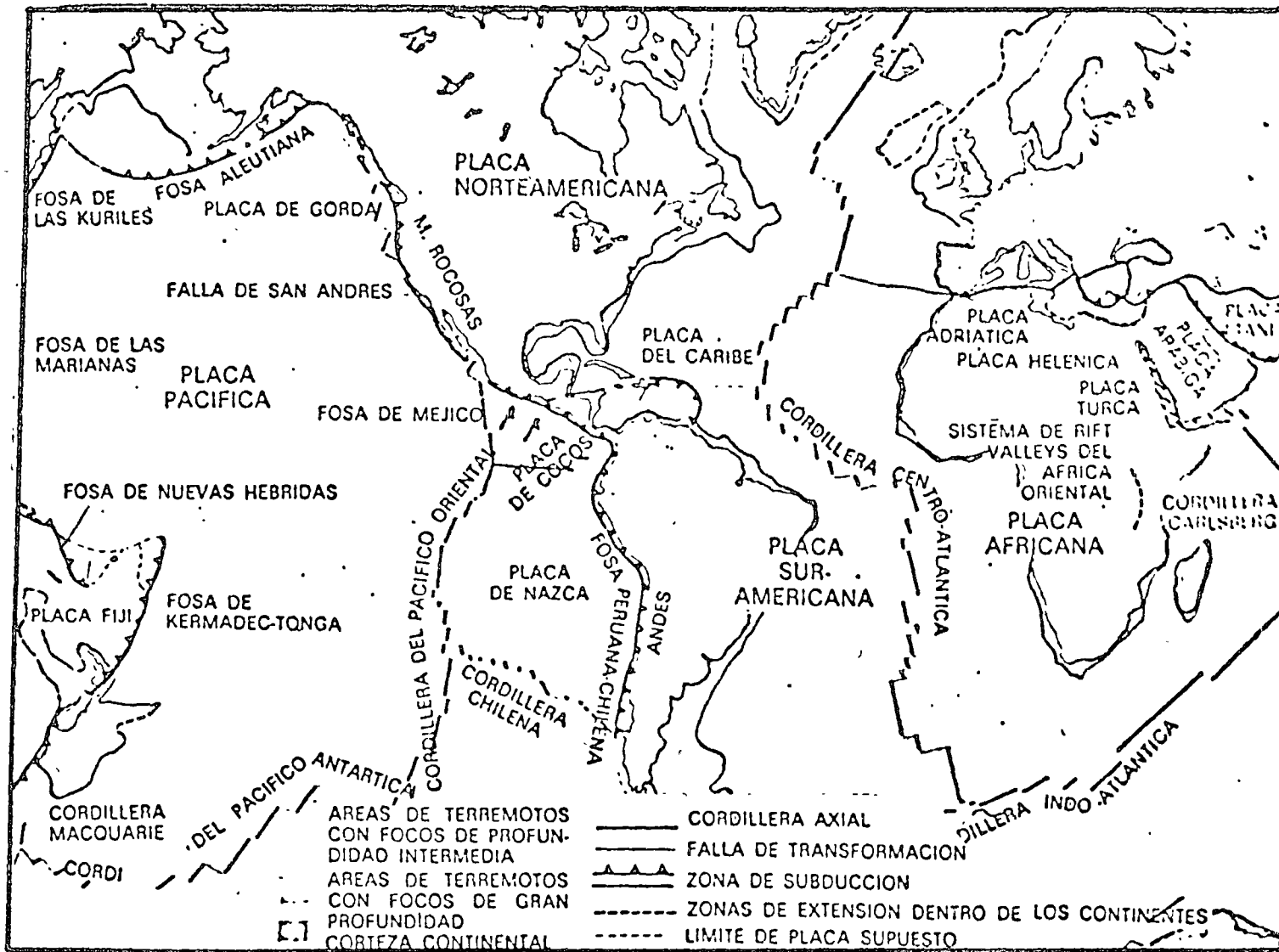
FIGURA No. 6



112

100000





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

Q

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This ensures transparency and allows for easy verification of the data.

Furthermore, it is noted that regular audits are essential to identify any discrepancies or errors early on. By conducting these checks frequently, the organization can prevent small mistakes from escalating into larger financial issues.

In addition, the document highlights the need for clear communication between all departments involved in the financial process. This includes the accounting, sales, and procurement teams. Regular meetings and reports can help ensure that everyone is on the same page and that the financial goals of the organization are being met.

Q

Another key aspect of financial management is the timely payment of bills and invoices. Delaying these payments can lead to strained relationships with suppliers and vendors, which may result in higher prices or even the loss of business opportunities.

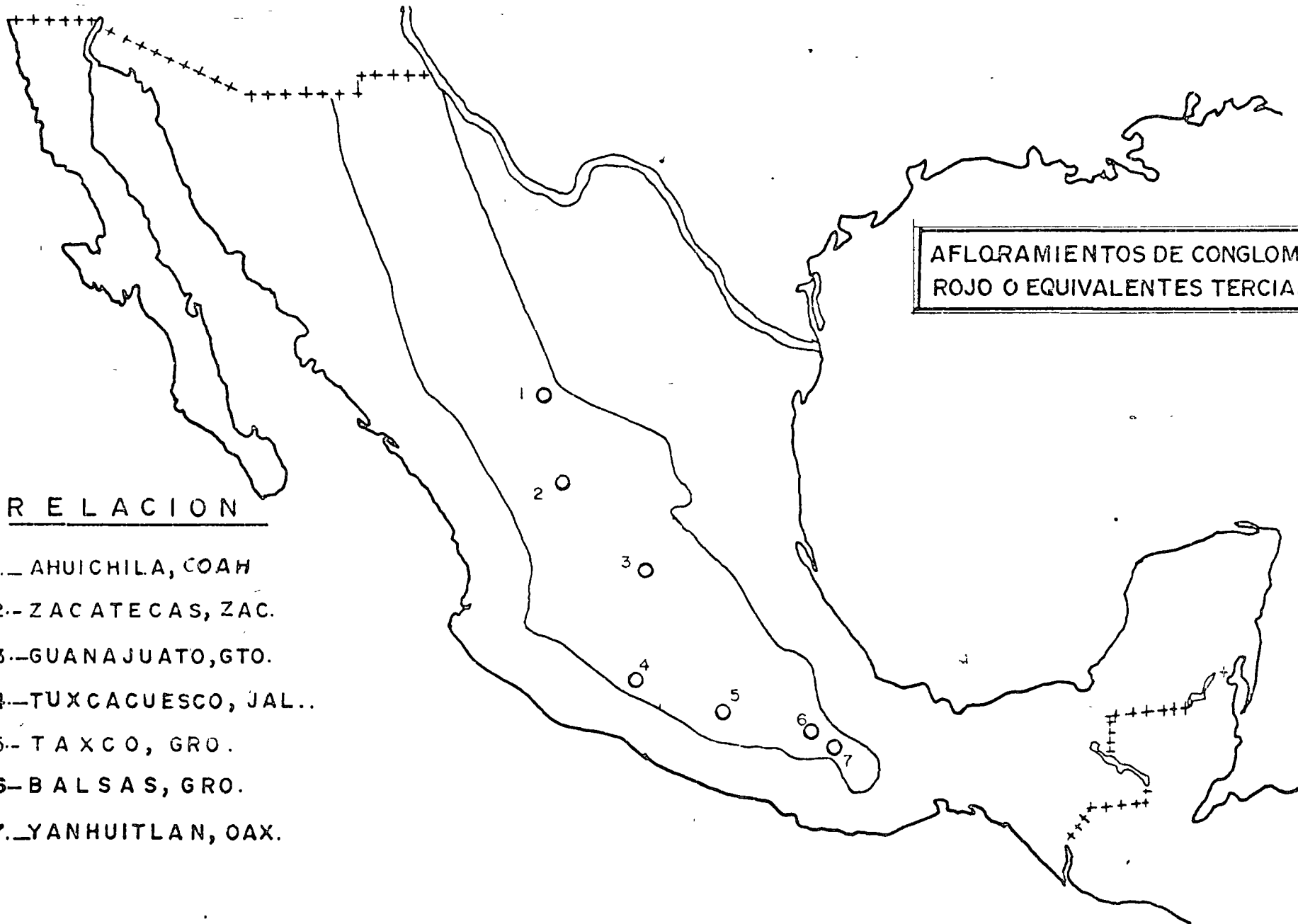
It is also important to maintain a healthy cash flow. This can be achieved by closely monitoring the company's income and expenses. By understanding the flow of money in and out of the organization, management can make informed decisions about investments and operational costs.

Finally, the document stresses the importance of staying up-to-date with the latest financial regulations and tax laws. Failure to comply with these requirements can lead to significant penalties and legal consequences. Regular consultation with a professional accountant can help ensure full compliance.

Q

L

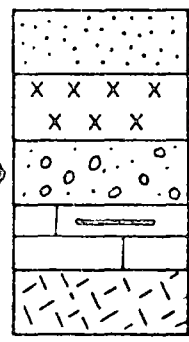
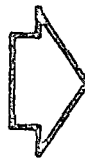
# CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS



1944



SIMBOLOGIA



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

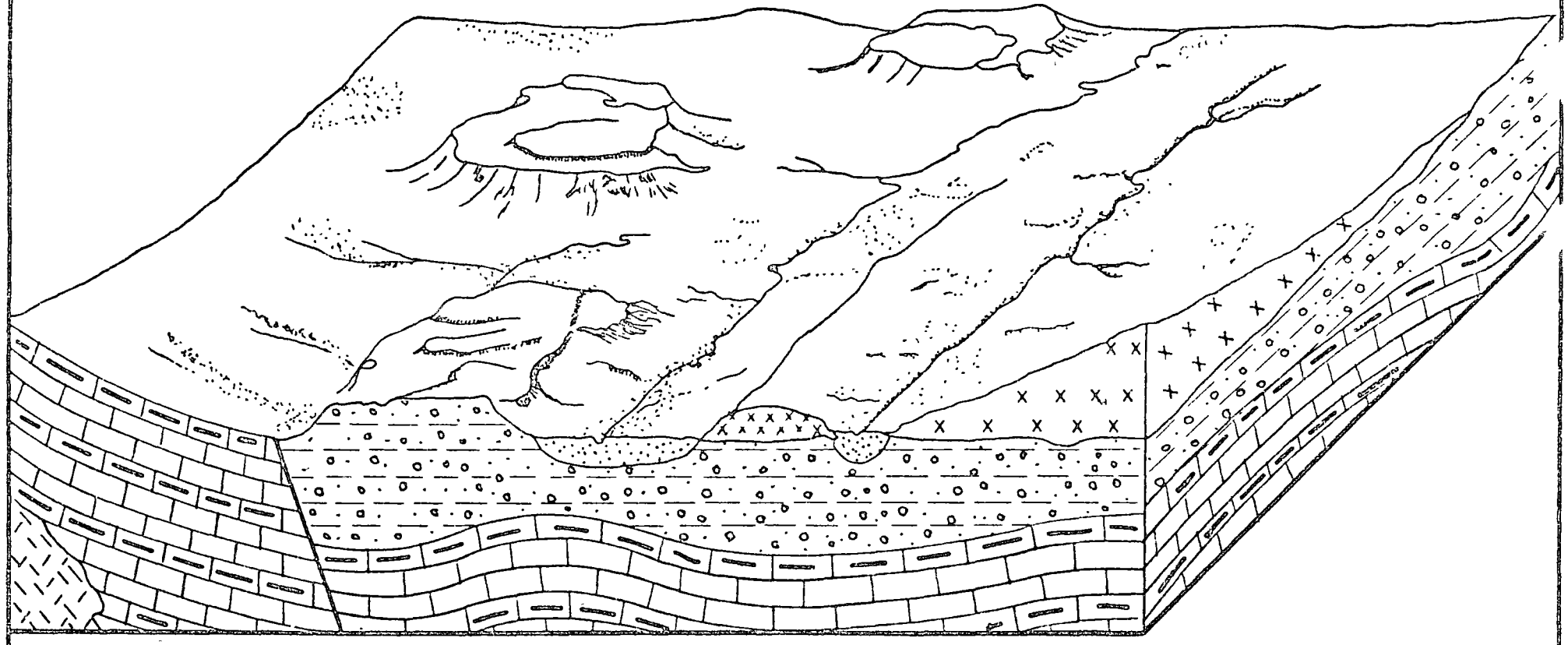






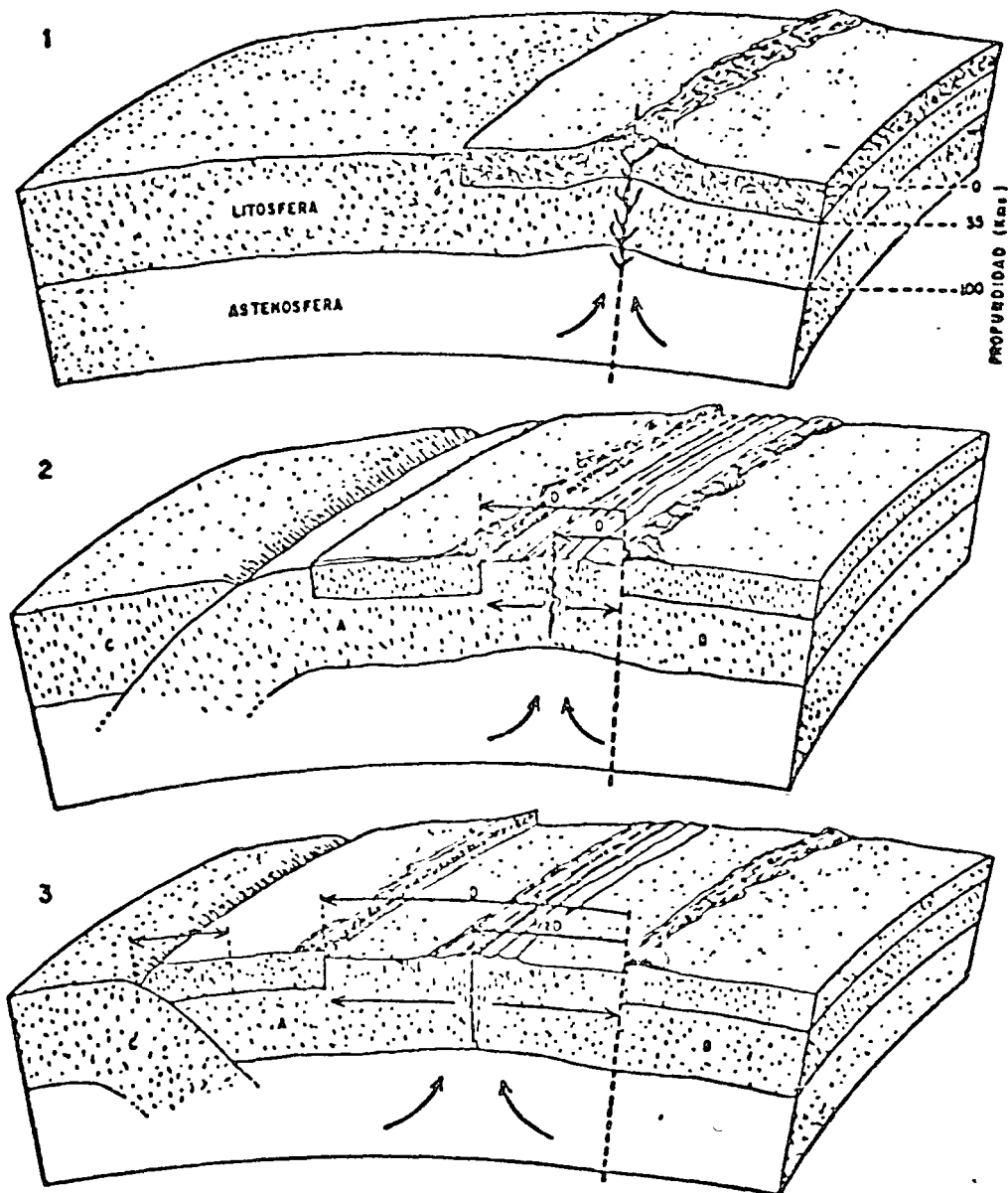
FIGURA No. 3



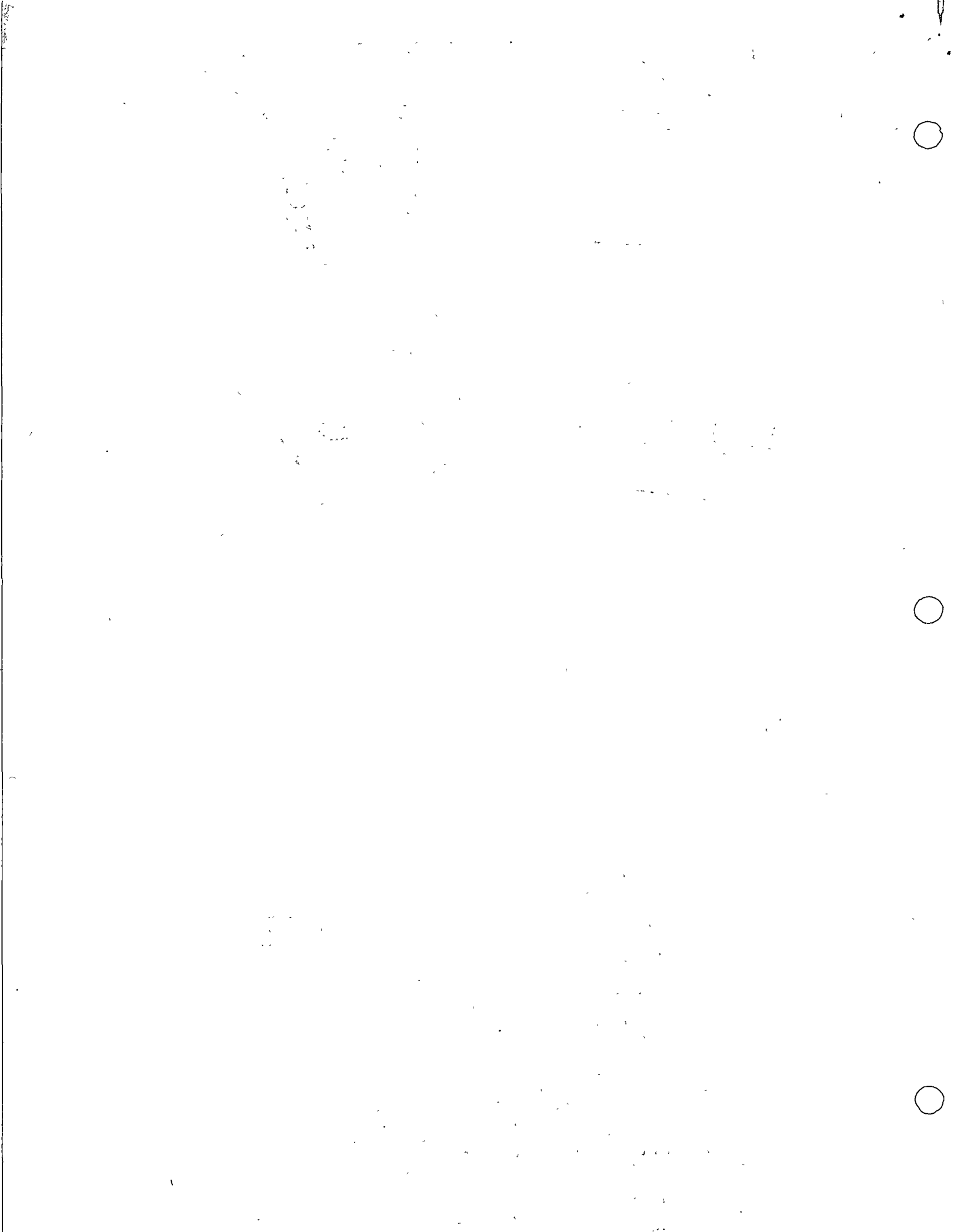
EN UNA PRIMERA ETAPA de la deriva continental, el Atlántico era un mar con una circulación restringida por los continentes que le rodeaban. Al igual que el actual mar Rojo, las condiciones en el mar Atlántico favorecieron la preservación de la materia orgánica y la deposición de rocas evaporíticas, dando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



Very faint text, possibly a title or description, located below the map. The text is illegible due to the low contrast and high noise of the scan.



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 de 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 oceanica en expansion. El cual tiene



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 acarros 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

#.#.....



The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by proper documentation and that the books should be kept up-to-date at all times.

In addition, it is noted that the accounting system should be designed to provide clear and concise information to management. This includes the preparation of financial statements that are both accurate and timely, as well as the use of budgeting and variance analysis to control costs and improve efficiency.



Furthermore, the document highlights the need for a strong internal control system. This involves the implementation of policies and procedures that are designed to prevent and detect errors and fraud. Key elements of such a system include the separation of duties, the use of authorization, and the regular reconciliation of accounts.

Finally, it is stressed that the accounting department should maintain a high level of integrity and objectivity. Accountants should adhere to the highest standards of professional conduct and should not be influenced by external pressures when making their judgments. This is essential for the credibility of the financial information they provide.





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.



1944

1945

1946

1947



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, formando 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 algunos lugares de la Región de La Gran Cuenca en los Estados Unidos de Norteamérica, se presentan condiciones de sedimentación de edad terciaria (W.R. Lowell, 1956), semejantes a las observadas en el Altiplano Mexicano, considerándose que deben estar relacionados.

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that this is essential for ensuring the integrity and reliability of the financial data. The text also mentions that proper record-keeping is a key component of good financial management.

2. The second part of the document focuses on the role of the accounting department in providing accurate and timely financial information. It highlights the need for the accounting team to work closely with other departments to ensure that all transactions are properly recorded and reported. The text also notes that the accounting department is responsible for monitoring the company's financial performance and identifying areas for improvement.

3. The third part of the document discusses the importance of budgeting and financial planning. It explains that a well-defined budget is essential for setting financial goals and measuring performance. The text also mentions that financial planning is a key component of strategic management and helps the company to anticipate and respond to future challenges. The text also notes that budgeting and financial planning are essential for ensuring the company's long-term success.

4. The fourth part of the document discusses the importance of risk management. It explains that risk management is the process of identifying, assessing, and mitigating potential risks to the company's financial health. The text also mentions that risk management is a key component of good financial management and helps the company to avoid or minimize potential losses. The text also notes that risk management is essential for ensuring the company's long-term success.

T E R M A L I S M O

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.

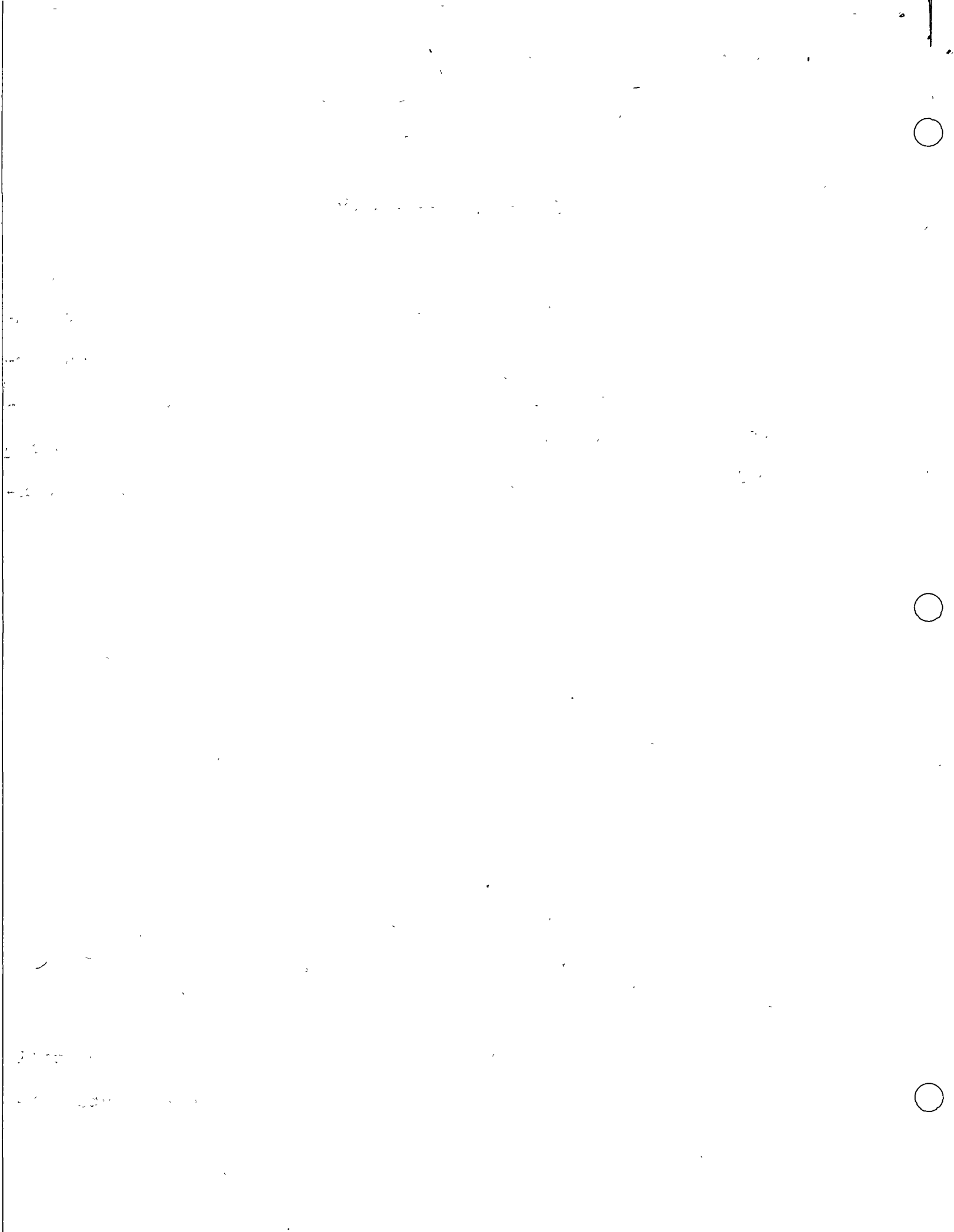
Aguascalientes, Ags.

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 riolita, 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

##.....

... ..

... ..

... ..

... ..

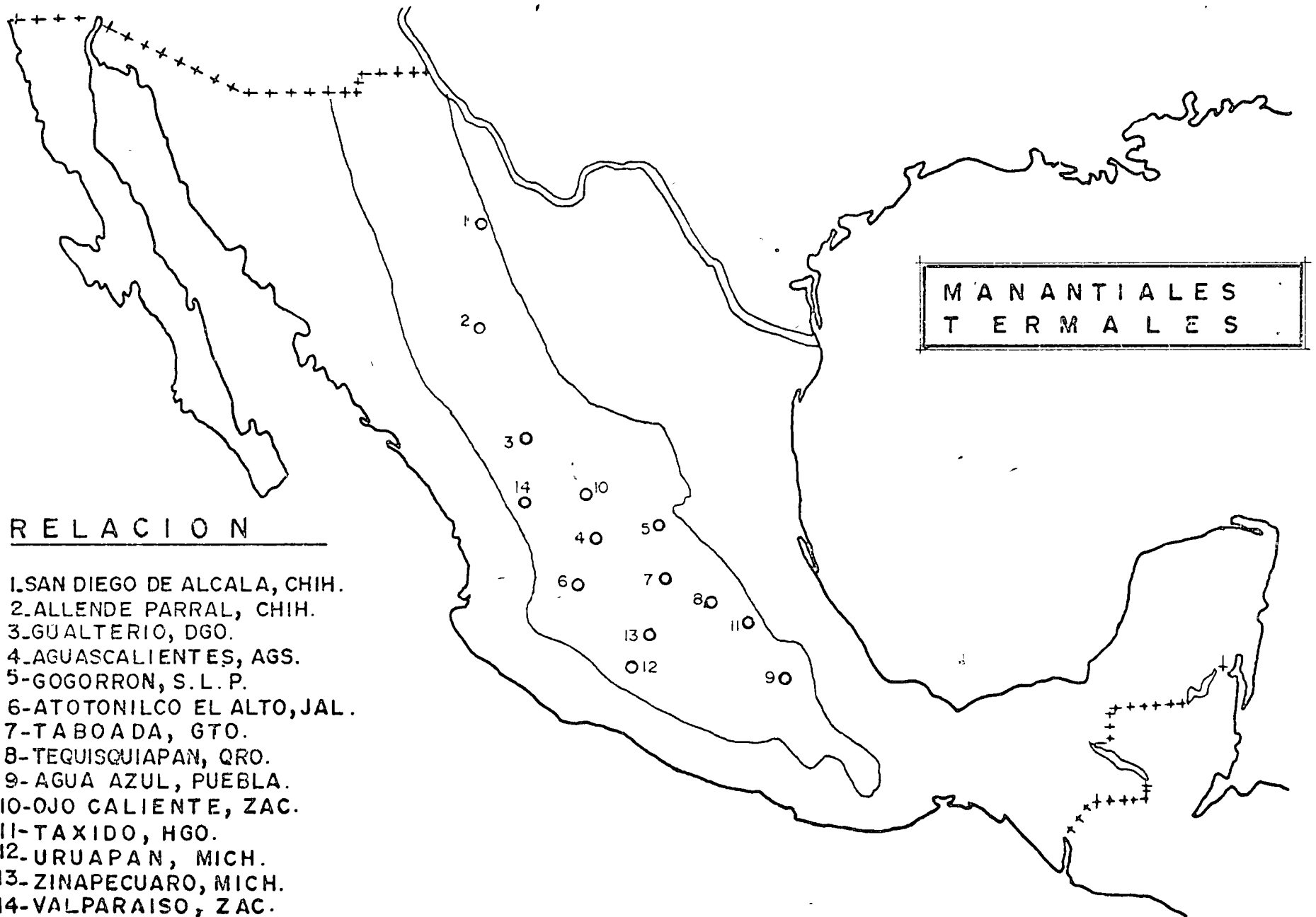
... ..

... ..

... ..



# CUENCAS LACUSTRES TERCIARIAS





vea la posibilidad de encontrar subyacentes conglomerados permeables.

2<sup>o</sup> 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.

3<sup>o</sup> 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.

4<sup>o</sup> 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

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that this is crucial for the company's financial health and for providing reliable information to stakeholders.

2. The second part of the document outlines the specific procedures for recording transactions. It details the steps from initial entry to final review, ensuring that all necessary information is captured and verified.

3. The third part of the document addresses the role of the accounting department in this process. It highlights the need for clear communication and collaboration between different departments to ensure the accuracy and timeliness of the records.

4. The fourth part of the document discusses the importance of regular audits and reviews. It explains how these processes help to identify any discrepancies or errors and ensure that the records are up-to-date and accurate.

5. The fifth part of the document provides a summary of the key points discussed and offers recommendations for improving the record-keeping process. It suggests implementing new technologies and training staff to ensure the highest standards of accuracy and efficiency.

Eje Neovolcánico en los Estados de Morelos y Guerrero.

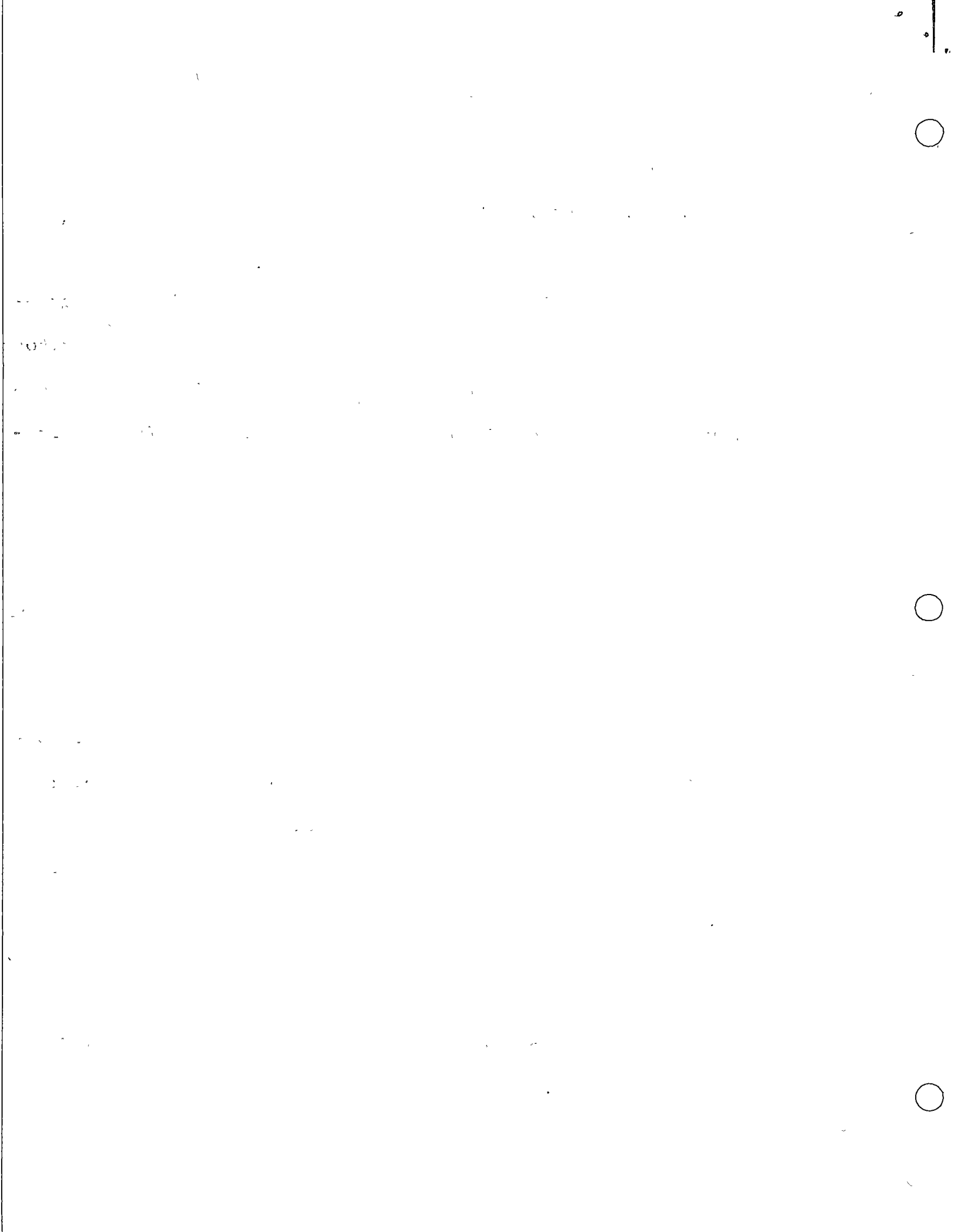
5<sup>o</sup> Deberá considerarse esta posible disposición de las rocas volcánicas impermeables, cubriendo a depósitos conglomeráticos permeables, cuando se pretenda la construcción de presas de almacenamiento, pues podrían presentar fugas verticales.

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

7<sup>o</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.

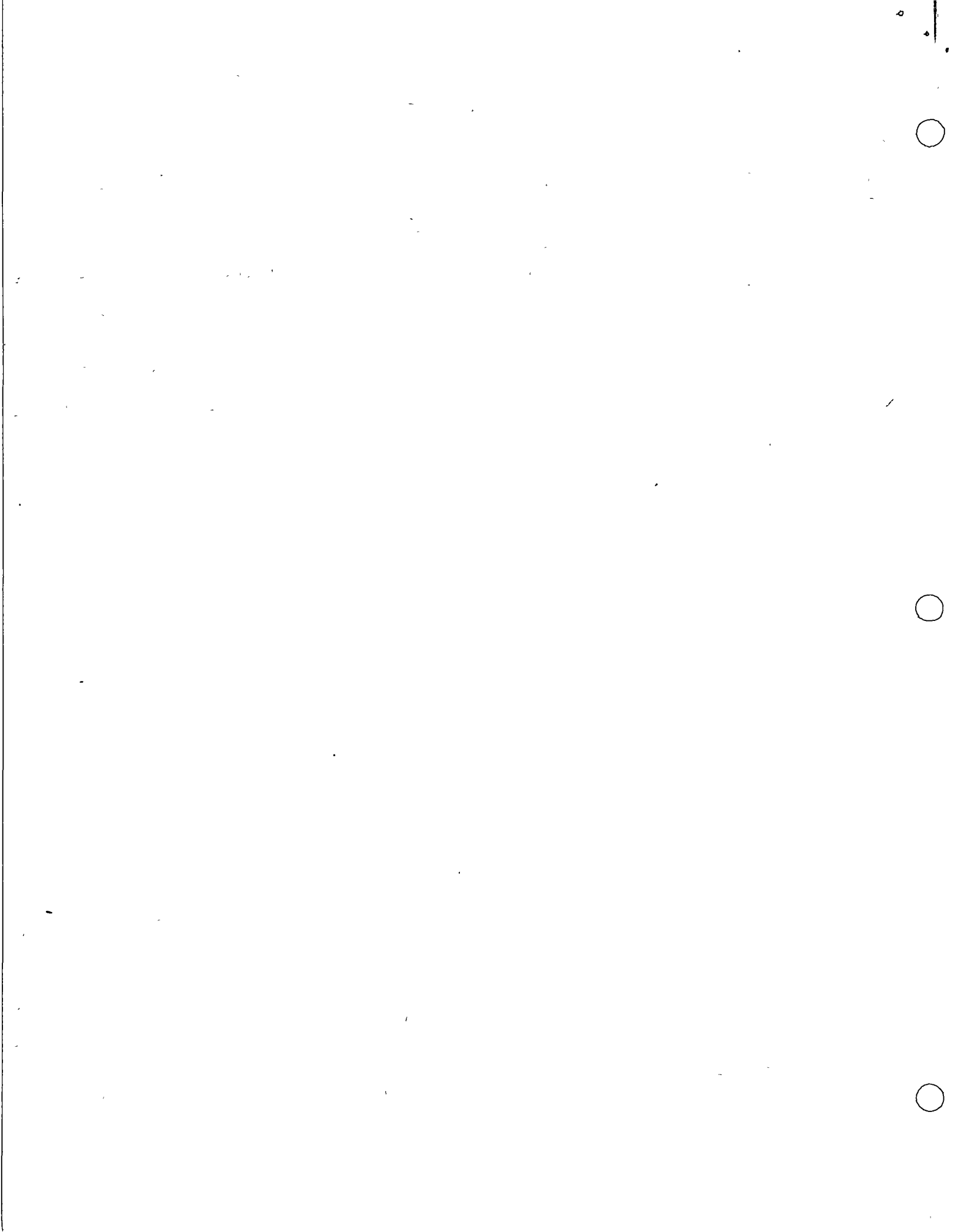
Considerando que las riolitas y andesitas relacionadas con este tipo de depósitos, cuyos análisis hemos tenido oportunidad de conocer, han sido determinadas de edad terciaria, los sedimentos que encontramos subyaciéndolas, los consideramos de ese período o anteriores.

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 ígneas 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).

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is scattered across the page and is mostly illegible due to low contrast and blurring.

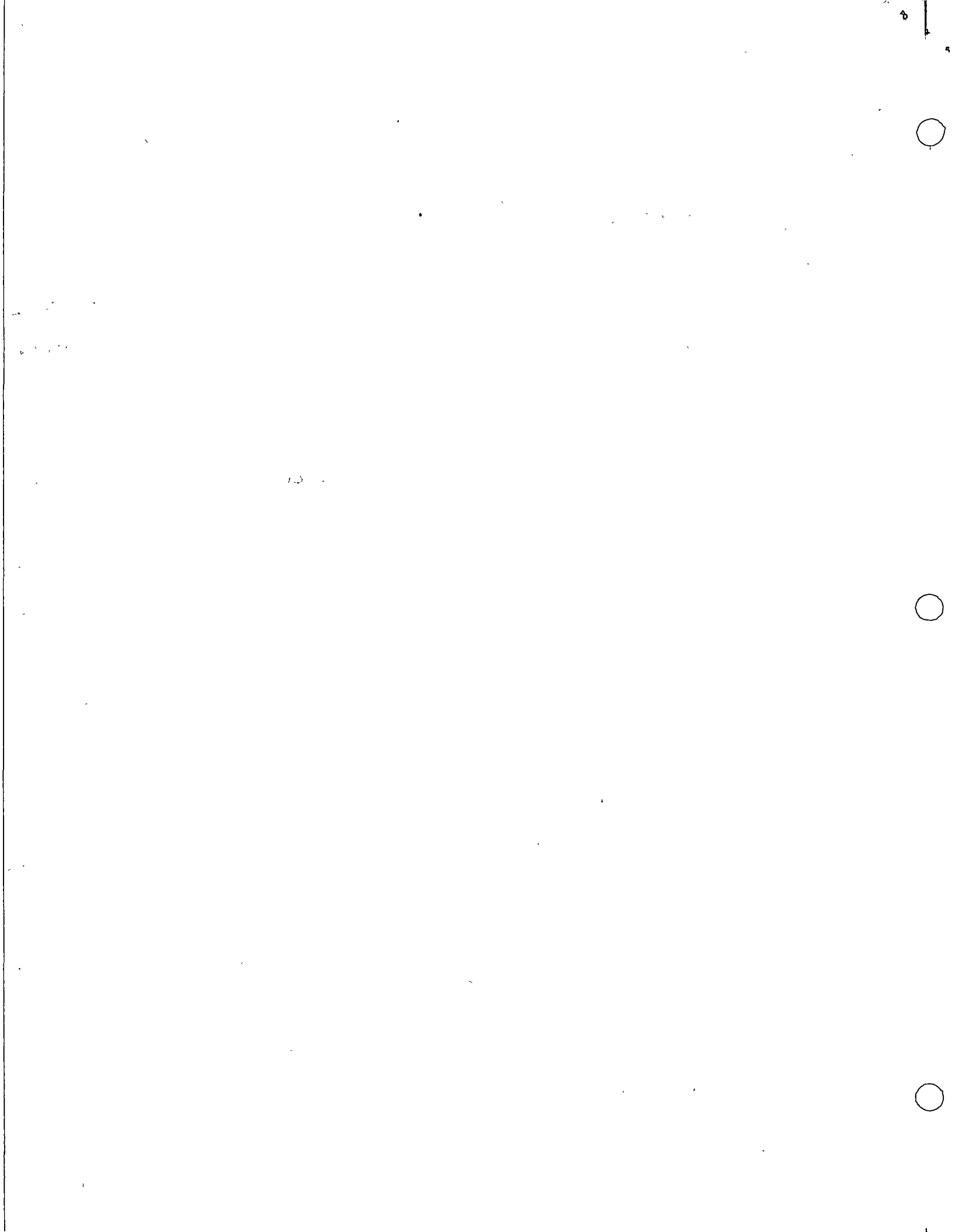
ZACATECAS. -

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 (Medina, 1962; Villalobos, 1969).

#### GUANAJUATO.-

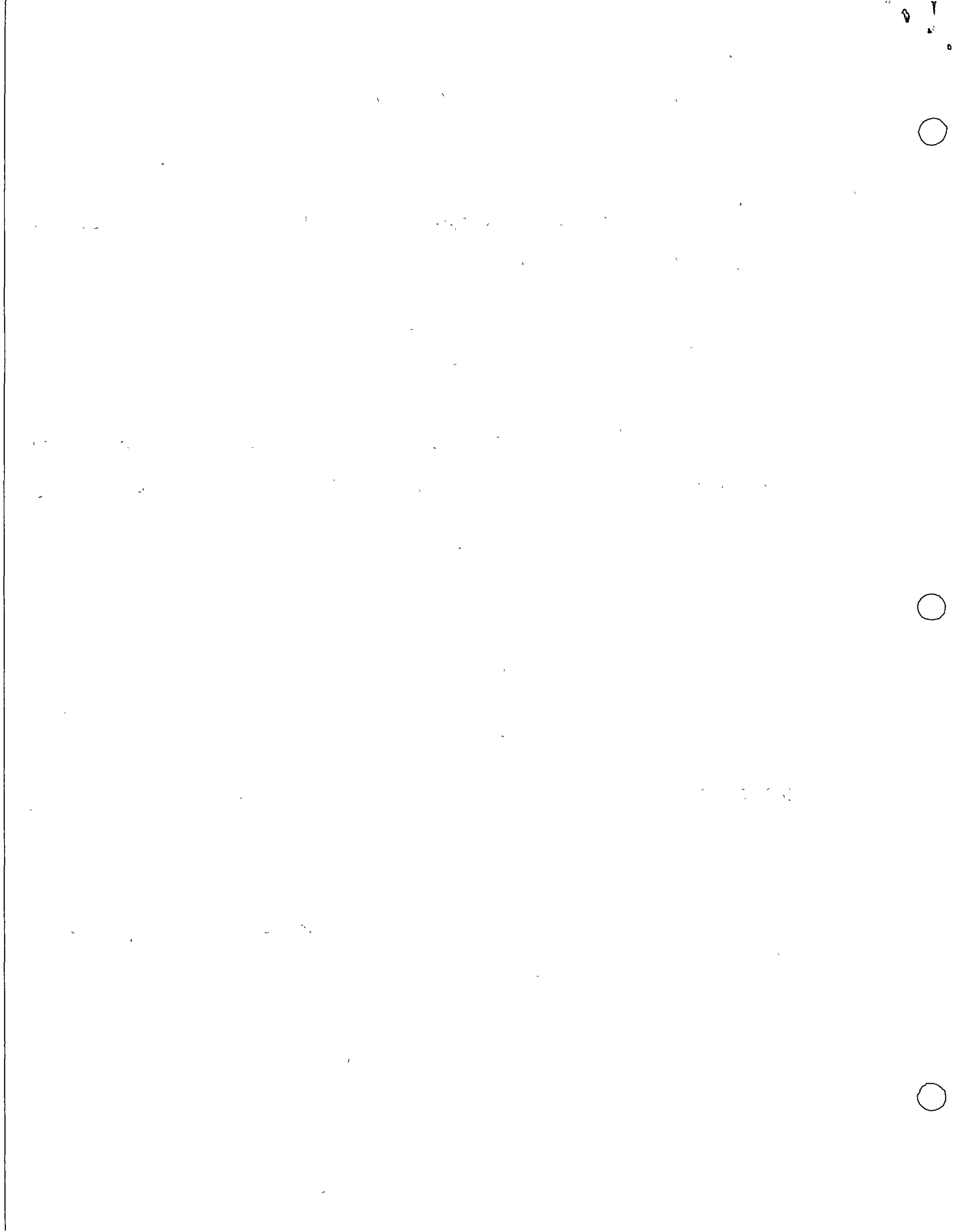
En la Capital del Estado existe un gran afloramiento de Conglomerado Rojo, determinado como Eoceno-Oligoceno. (Edwards, 1956).

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 Tuxcacuesco, 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).

1. The first part of the document  
describes the general situation  
of the country.

2. The second part of the document  
describes the specific situation  
of the country.

3. The third part of the document  
describes the specific situation  
of the country.

4. The fourth part of the document  
describes the specific situation  
of the country.



PUEBLA. -

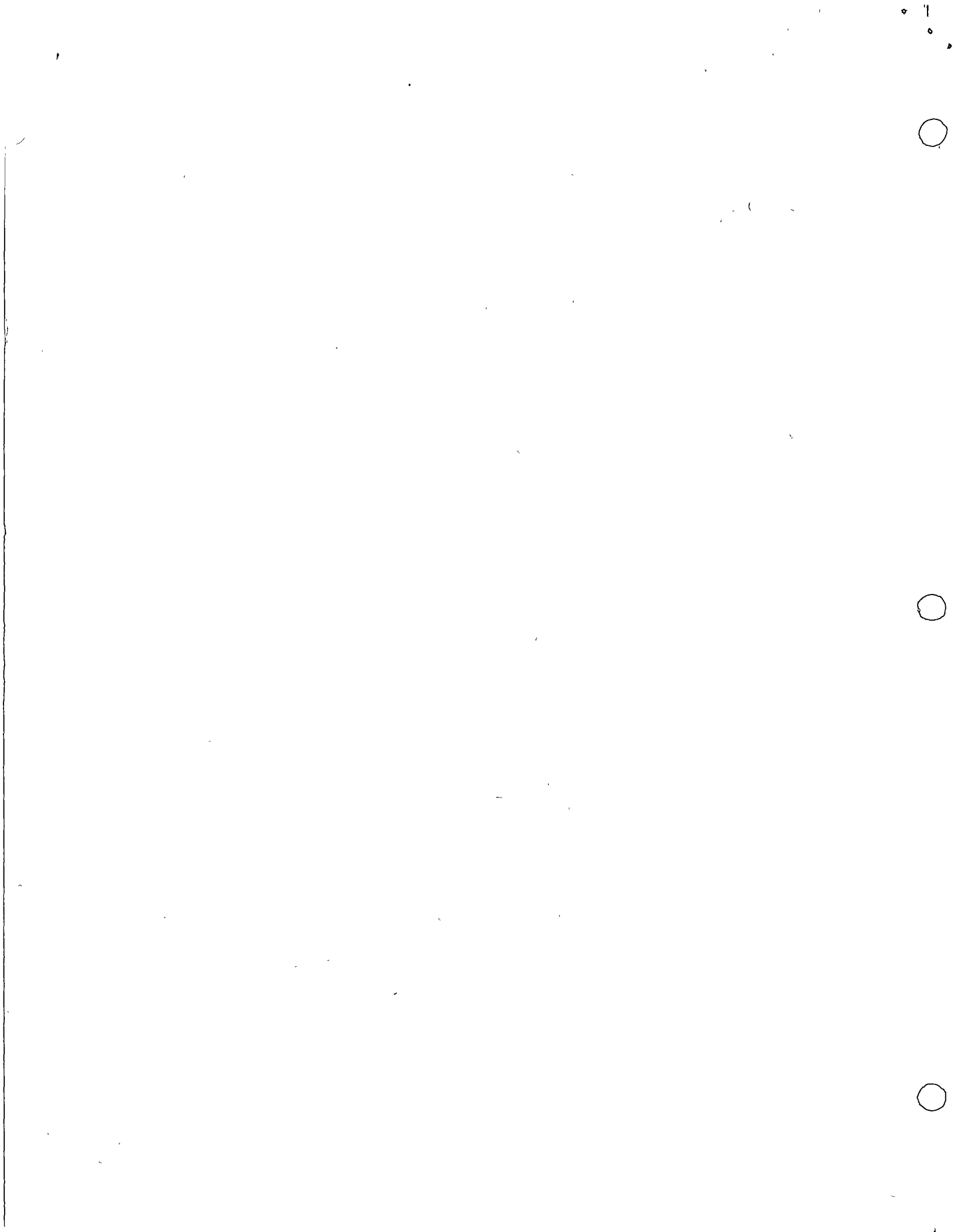
En Tecamachalco hacia el Oriente del Estado, - aflora la Formación Huajuapán, determinada Eoceno-Oligoceno. Es-  
tos mismos conglomerados afloran en la zona de Chiautla, al Sur  
de Izúcar de Matamoros.

Conglomerados del Terciario Superior se encuen-  
tran en el Valle de Tehuacán.

MORELOS. -

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

Sobre ella descansan otras formaciones terciaria-  
rias de origen volcánico y lacustre, como la Tilzapotla, Tepoz--  
tlán, y Zempoala.



## GUERRERO.-

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

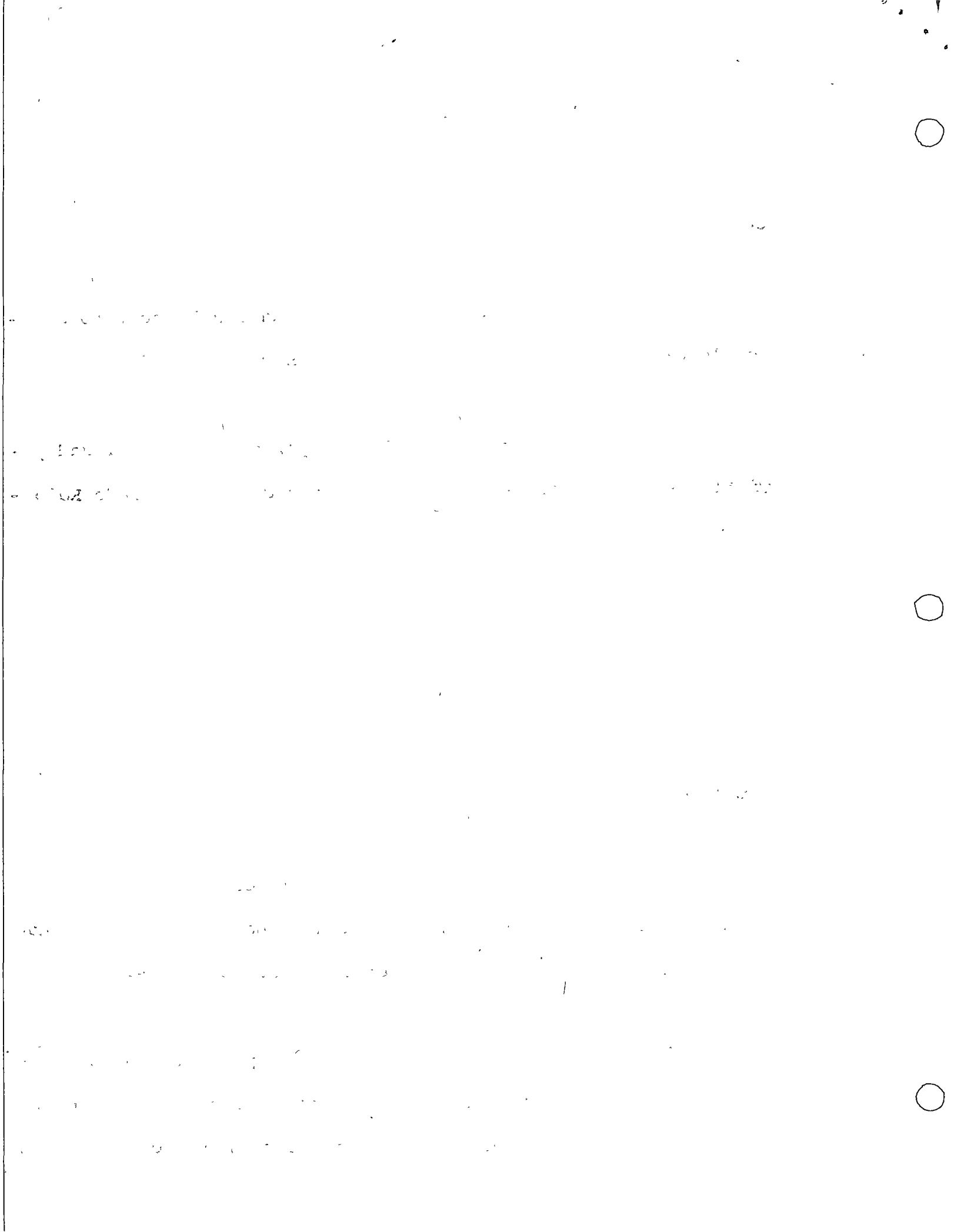
Al este de Chilpancingo, entre esta Ciudad y Tixtla, se presentan buenos afloramientos de Conglomerado Rojo del Grupo Balsas (Fries, 1957).

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 Yanhuitlán, 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 Altiplanicie 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.
- 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.
- Medina R., F. 1962.- Estudios Geohidrológico e Hidrodinámico en las -- Corrientes Subterráneas de la Cuenca de San Luis Potosí, S.L.P. Tesis Profesional, Fac. de Ingeniería, UNAM.
- De la Vega, Enciso. 1963.- Hoja Cuencamé 13 R-1(7) Instituto de Geología. UNAM.

RECEIVED  
OFFICE

DATE: 10/10/1980  
TIME: 10:30 AM  
BY: J. J. [unclear]

TO: [unclear]  
FROM: [unclear]  
SUBJECT: [unclear]

RE: [unclear]

DATE: [unclear]  
TIME: [unclear]  
BY: [unclear]

[unclear]

[unclear]

[unclear]

[unclear]

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.

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or title.

Second block of faint, illegible text, possibly a list or table of contents.

Third block of faint, illegible text, possibly a section header.

Fourth block of faint, illegible text, possibly a section header.

Fifth block of faint, illegible text, possibly a section header.

Sixth block of faint, illegible text, possibly a section header.

Seventh block of faint, illegible text, possibly a section header.



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.



Handwritten text, possibly a date or initials, located in the upper left quadrant.

Handwritten text, possibly a name or title, located in the upper middle section.

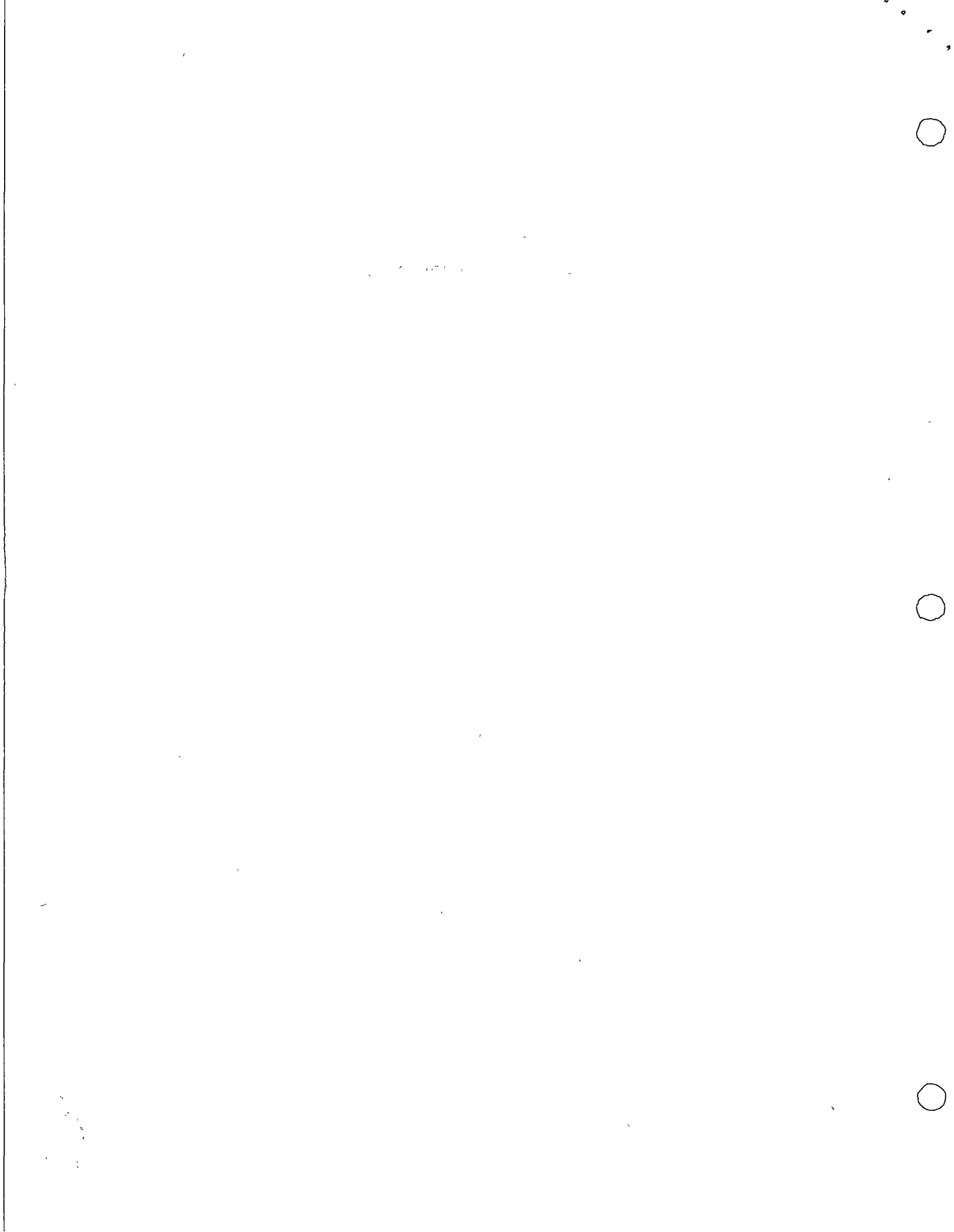


HIDROLOGIA SUBTERRANEA

TEORIA DEL FLUJO EN MEDIOS POROSOS

ING. JOAQUIN MARIO MENDEZ SALDAÑA

JULIO DE 1976.



## VI.- TEORIA DEL FLUJO EN MEDIOS POROSOS

### INTRODUCCION

Medios Porosos.- Es aquel que contiene numerosos espacios abiertos, llamados intersticios, en los cuales el agua se puede almacenar y mover.

Un medio poroso puede contener materia heterogénea en proporción pequeña, cuando cada fase por sí misma es homogénea, o en proporción grande cada parte consiste de materiales no homogéneos.

Es común oír hablar del agua subterránea, como grandes depósitos o lagos subterráneos ó bien como de grandes corrientes localizadas o ríos, sin embargo aunque esto puede presentarse, en acuíferos constituídos por rocas volcánicas o por calizas, en una gran mayoría de casos el agua circula a través de los espacios ó oros que dejan entre sí las particulares de material de los depósitos aluviales. Por lo que el estudio y conocimiento de las leyes que rigen su movimiento reviste especial interes, para determinar la disponibilidad de agua subterránea en una zona.

#### 6.1- LEY DE DARCY

Aunque Hagen y Poiseuille fueron los primeros en proponer que la velocidad de flujo del agua subterránea a través de conductos capilares, es proporcional a la primera potencia del gradiente - -

...

...

...

...

...

...

...

hidráulico, el crédito para la verificación de esta proposición y su aplicación al flujo del agua a través de suelos, o más específicamente a su filtración a través de filtros de arena, se debe a Henry Darcy. Esta relación es conocida como Ley de Darcy, constituye una de las bases de la teoría del flujo en medios porosos y su expresión matemática es:

$$v = c i = K i$$

$v$  es la velocidad del fluido, o caudal instantáneo que pasa a través de un área transversal unitaria de roca.

$i$  es el gradiente hidráulico, o pérdida de carga por unidad de longitud.

$c$  es una característica del medio y del fluido y se le denomina; coeficiente de permeabilidad, permeabilidad efectiva, coeficiente de escurrimiento y conductividad hidráulica.

El coeficiente de permeabilidad se define como el caudal de agua que circula a través de un área unitaria de roca, bajo un gradiente hidráulico unitario.

$$Q = A v = A K i = R$$

El coeficiente  $R$  incluye las características del medio poroso y las propiedades del fluido por lo que  $R$  depende de: peso específico del fluido  $\gamma$ , de su viscosidad dinámica  $\mu$ , del tamaño medio de los poros "d" y de un factor de forma C, que toma en cuenta el arreglo de granos, distribución granulométrica, porosidad, tamaño de los granos, estratificación y compactación del material. Puede -

1000

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18





demostrarse por análisis dimensional que:

$$k = cd^2 \frac{\gamma}{\mu}$$

puesto que C y d son características del medio, al producto  $cd^2$  se le llama permeabilidad intrínseca del medio y se representa por  $k_i$ , por lo que:

$$k = k_i \frac{\gamma}{\mu}$$

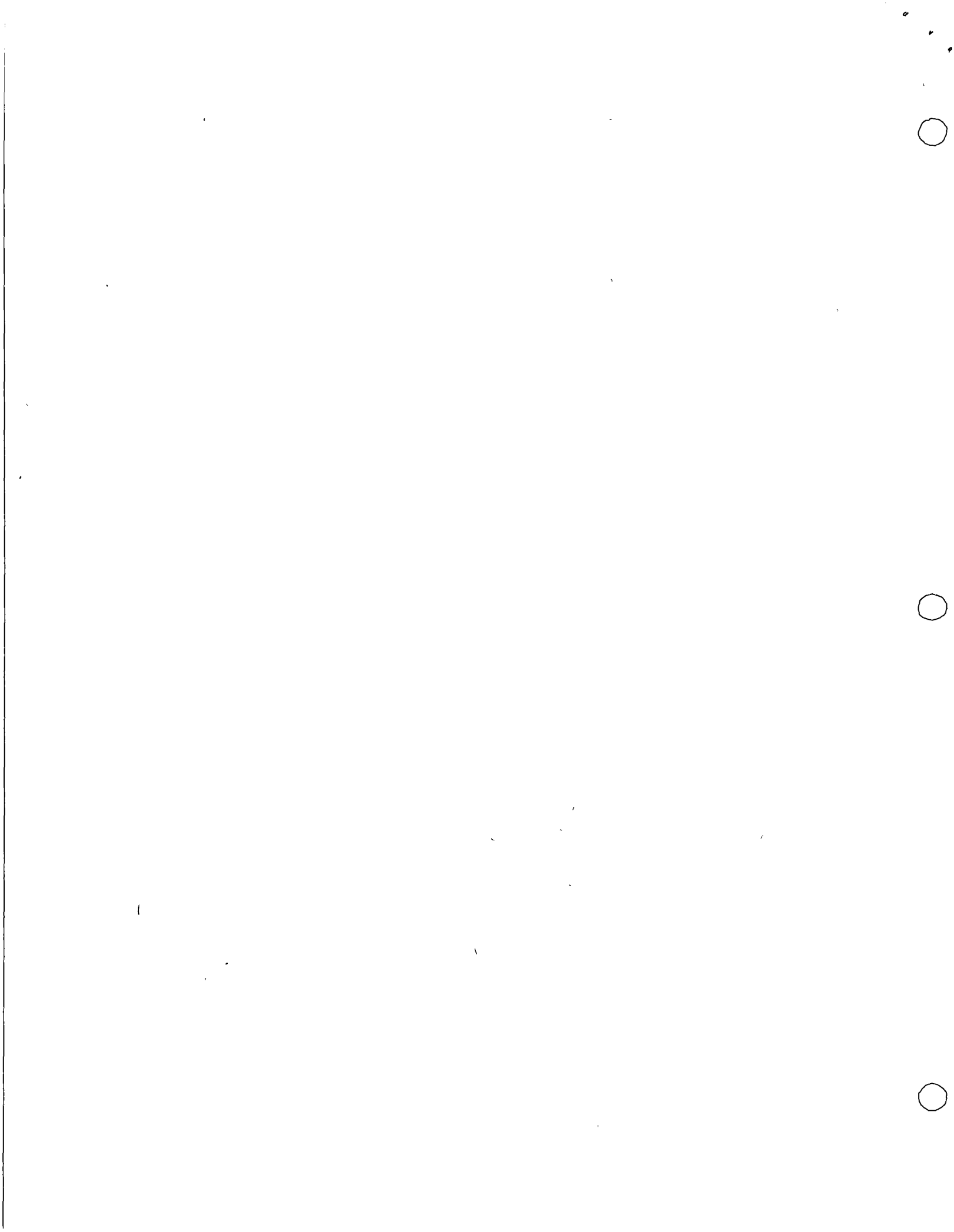
La permeabilidad tiene las unidades de una velocidad, por lo que puede expresarse en cualquier sistema de unidades consistente. Generalmente se expresa en cm/seg.

Promedio de valores del coeficiente de permeabilidad para diferentes materiales.

MATERIAL	$k$ (cm./seg)	
ARCILLA	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-3}$
ARENA LIMPIA	$1 \times 10^{-2}$	1.0
ARENA CON ARCILLA	$5 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-2}$

Rango de Validez de la Ley de Darcy:

La transición de régimen laminar a régimen turbulento en el movimiento del agua a través de tuberías está definida por el número de Reynolds, que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de viscosidad. Para la circulación de agua en tubería



existe un número alrededor de 2100 abajo del cual el flujo es - - - siempre laminar, para el flujo en medios porosos se ha definido este número en la forma siguiente.

$$R = \rho v \frac{dm}{\mu} = v \frac{dm}{\nu}$$

$\rho$  = densidad del fluido,  $v$  = velocidad;  $dm$  diámetro medio de partículas,  $\mu$  = viscosidad dinámica.

Experimentalmente se ha determinado que en arenas naturales y artificiales para valores de  $R$  entre 1 y 10 el flujo se vuelve turbulento. Así mismo se ha demostrado que en los casos reales el flujo del agua subterránea es laminar, siendo aplicable la Ley de Darcy.

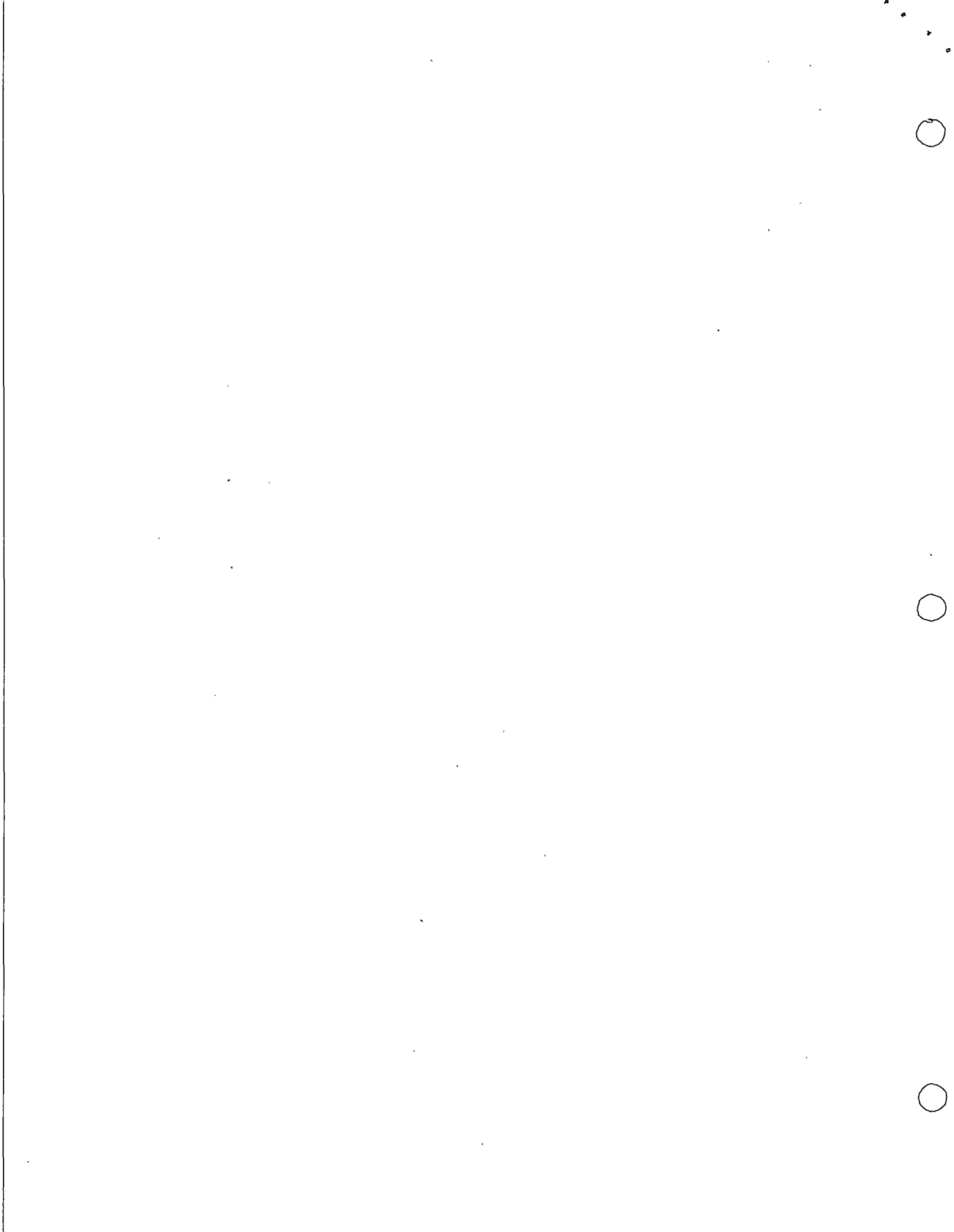
En flujo a través de fracturas canales y conductos de disolución La Ley de Darcy generalmente no es aplicable.

Si el flujo ocurre en el espacio y  $\vec{V}$  es el vector de velocidad de componentes  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ , en forma diferencial la Ley de Darcy se expresa:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$



el signo menos indica que el movimiento del fluido ocurre en la -- dirección en que decrece la carga piezométrica. Si  $k_x = k_y = k_z$ , es decir si el medio es isótropo y si  $h$  únicamente depende las coordenadas  $(x, y, z)$  se tiene que

$$\vec{v} = -k \vec{\nabla} h$$

$\vec{\nabla} h$  es un vector normal a la superficie  $h$  o superficie determinada por las equipotenciales, por lo tanto las líneas de flujo son normales a estas.

## 6.2 Ecuación Diferencial de flujo:

La ecuación que rige el movimiento del agua a través de un medio poroso, se basa en el principio de conservación de la masa, en Hidrodinámica recibe el nombre de Ley de Continuidad, para su deducción se considera que el medio es homogéneo e isótropo.

La ecuación de continuidad se establece en la forma siguiente:

Entradas - Salidas = Cambio de Almacenamiento

Consideremos un paralelepipedo elemental de un medio poroso, saturado de fluido de densidad  $\rho$  y sea  $V$  el vector de velocidad de circulación del fluido, situado en el punto  $P$  del elemento diferencial, y sean  $v_x, v_y, v_z$  sus componentes según las direcciones de los ejes  $x, y, z$  del sistema de referencia mostrado.

Faint header text at the top of the page, possibly a title or page number.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

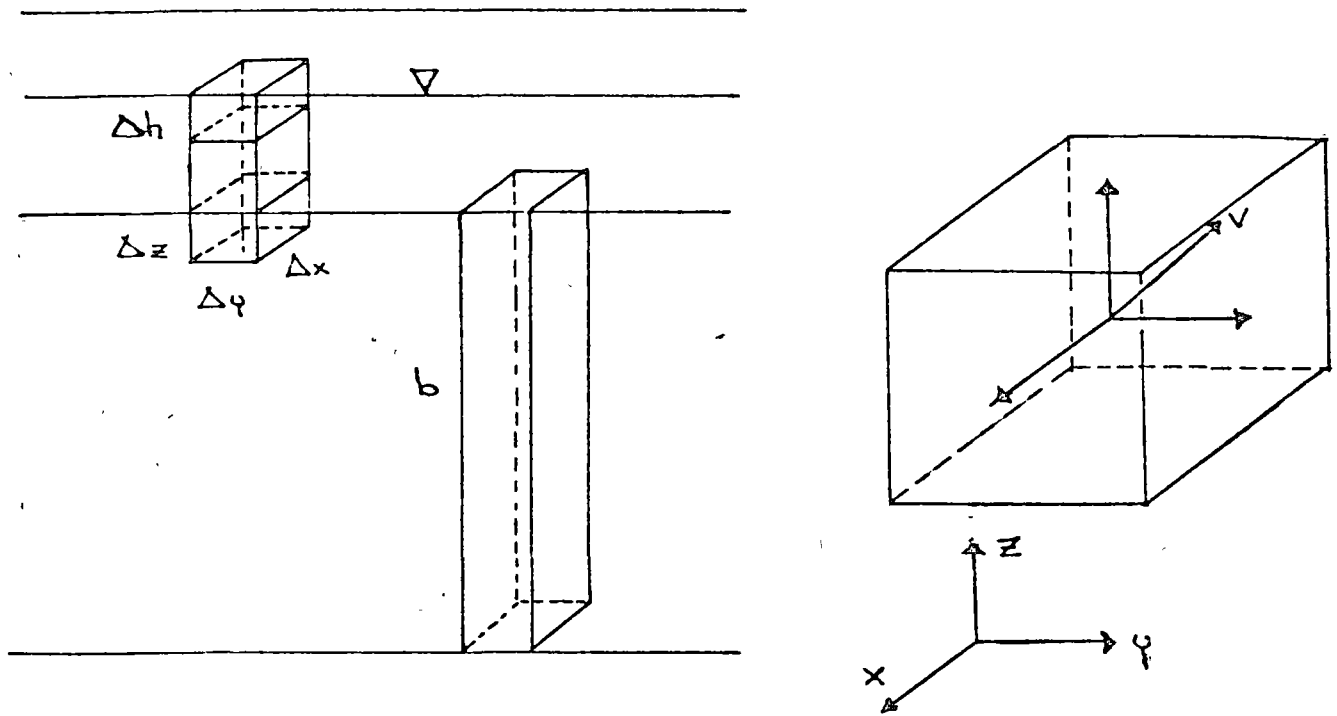
Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.

Faint line of text, likely a subtitle or section header.



Sí  $V_n$  es la velocidad normal a cada cara del elemento diferencial de volumen, el caudal que circula a través de cada cara vale .

$$Q = V_n \Delta A$$

Para determinar el caudal de masa que pasa a través de cada área del elemento es necesario conocer las componentes de velocidad en cada cara referidas a las del centro del elemento de volumen, esto se logra mediante un desarrollo en serie de Taylor de la función  $V$ , se tiene:

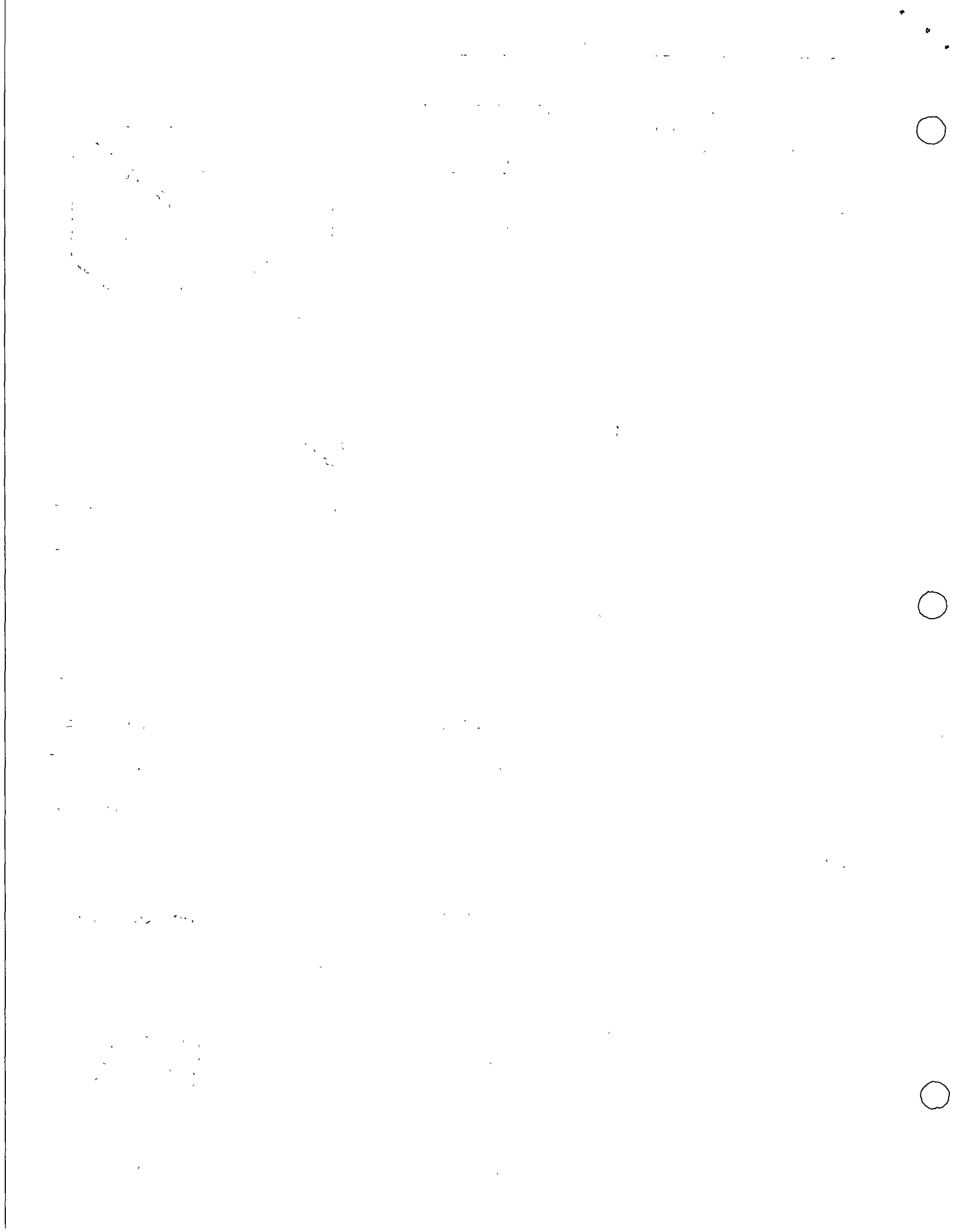
Para las caras  $(y, z)$  es decir, velocidad paralela al eje de las  $X$ .

Para la cara anterior.

$$V_x \left( x + \frac{\Delta x}{2}, y, z \right) = V_x (x, y, z) + \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\left( \frac{\Delta x}{2} \right)^2}{2!} \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \dots$$

Todas las derivadas valuadas en p.

Para la cara posterior





$$V_x \left( x - \frac{\Delta x}{2}, y, z \right) = V_x(x, y, z) - \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2}{2!} \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \dots$$

Valuando la masa que entra menos la que sale, se tiene:

$$\begin{aligned} (M_e - M_s)_x &= \left[ V_x - \frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta y \Delta z \rho - \left[ V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta y \Delta z \rho \\ &= - \left[ \frac{\partial V_x}{\partial x} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \rho \end{aligned}$$

en forma similar se obtiene.

$$(M_e - M_s)_y = - \left[ \frac{\partial V_y}{\partial y} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \rho$$

$$(M_e - M_s)_z = - \left[ \frac{\partial V_z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \rho$$

Sumando las expresiones anteriores para determinar la diferencia

de entradas menos salidas totales se tiene:

$$\underline{E} - \underline{S} = - \left[ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \rho \quad 6.2.1$$

$$= - (\nabla \cdot \vec{V}) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{CAMBIO DE ALM.}$$

y si consideramos esta variación en un instante de tiempo

$$\delta t: \quad \underline{E} - \underline{S} = - (\nabla \cdot \vec{V}) \Delta x \Delta y \Delta z \delta t$$

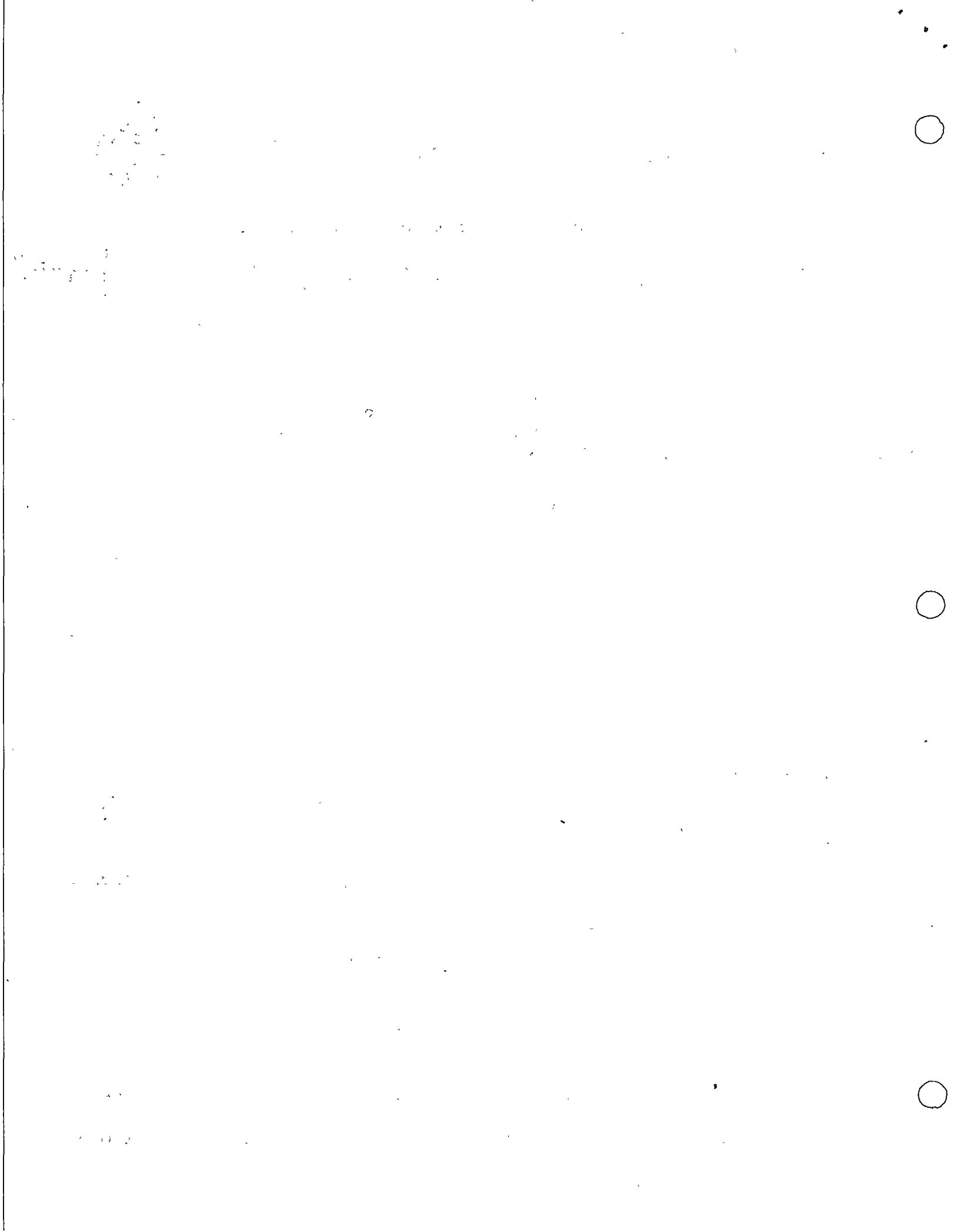
La masa de fluido almacenado en el elemento diferencial de volumen

es:

$$\Delta M = \eta \rho \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$\eta \text{ es la porosidad del material} = \frac{\Delta V_v}{\Delta V}$$

Para calcular la variación con el tiempo de AM, se debe considerar que  $\eta$  puede variar debido a la compresión vertical o a



la expresión del medio y que  $\rho$  puede ser función tanto del tiempo - como del espacio, admitimos que no hay cambio en las dimensiones - -  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  del volumen considerado.

$$\frac{\partial(\Delta M)}{\partial t} = \left[ \rho \frac{\partial \eta}{\partial t} + \eta \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] \quad 6.2.2$$

1ª Los cambios de la porosidad se deben esencialmente a la - compresión o a la expansión vertical.

Así el cambio de porosidad  $\eta$  del elemento diferencial, pue - de calcularse en la forma siguiente.

$$\text{El volumen de sólidos es: } \Delta V_s = (1 - \eta) \Delta x \Delta y \Delta z$$

puede admitirse constante debido a que la compresibilidad de cada - grano es inferior a la de la estructura del volumen de material y - a la del agua. Esto implica que la derivada total de esta cantidad es cero.

$$\frac{d}{dt} (\Delta V_s) = d \left[ (1 - \eta) \Delta x \Delta y \Delta z \right] = 0$$

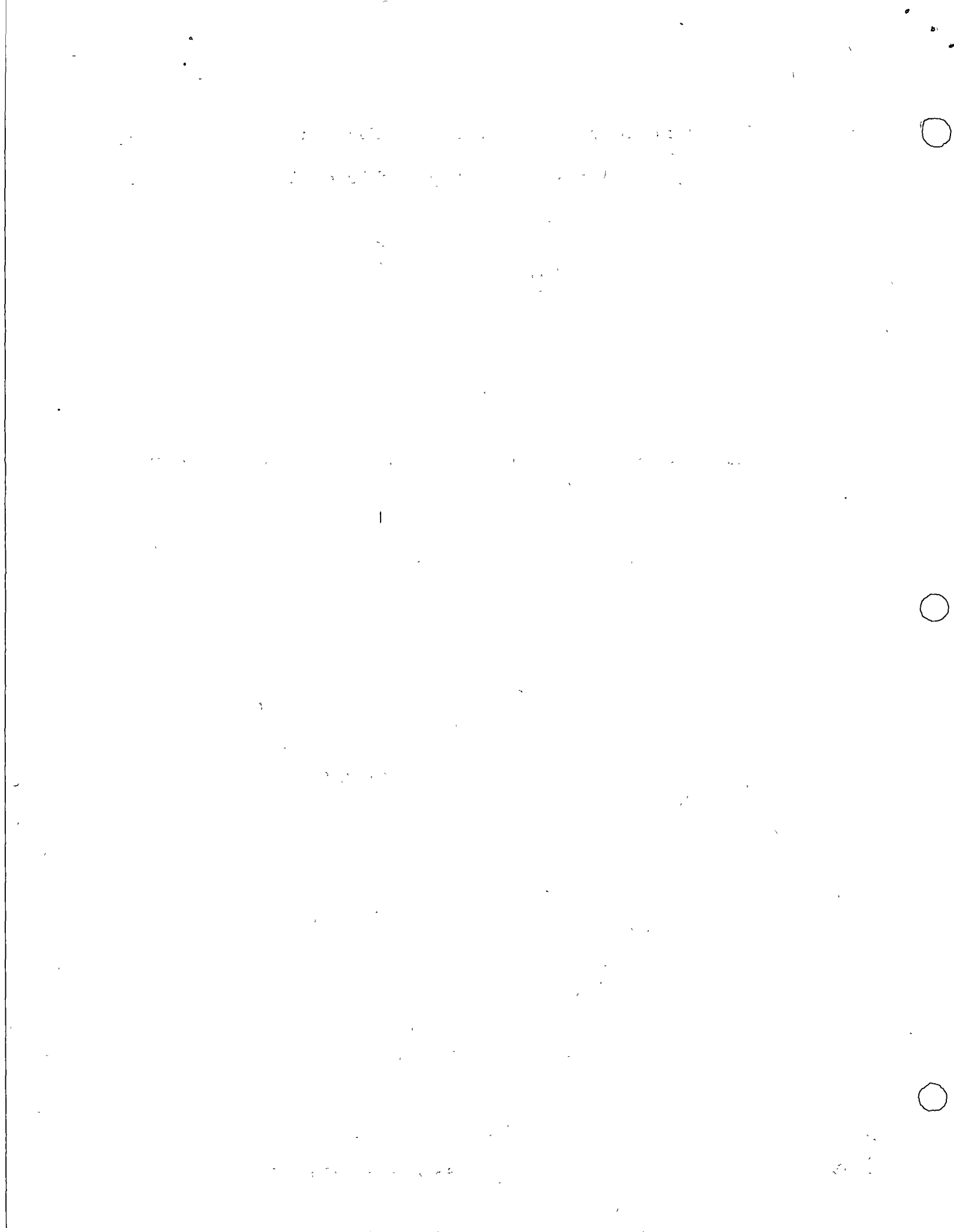
puesto que  $\Delta x, \Delta y$  no varían en comparación con  $\Delta z$ , el producto es constante y queda:

$$\Delta z d(1 - \eta) + (1 - \eta) d(\Delta z) = 0$$

$$d\eta = \frac{(1 - \eta)}{\Delta z} d(\Delta z)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{(1 - \eta)}{\Delta z} \frac{d(\Delta z)}{\partial t} \quad 6.2.3$$

para calcular la variación de  $\Delta z$  con respecto al tiempo, esto es -  $\frac{\partial \Delta z}{\partial t}$ , introduciremos el concepto de compresibilidad vertical



de la estructura del medio.

$$\alpha = \frac{1}{E_s} \quad ; \text{ Es el modulo de la elasticidad volumetrico .}$$

Sí  $\sigma_z$  es la tensión sobre el esqueleto intergranular en la dirección z :

$$E_s = - \frac{d\sigma_z}{\frac{d(\Delta z)}{\Delta z}} = \frac{1}{\alpha}$$

$$d\sigma_z = - \frac{1}{\alpha} \frac{d(\Delta z)}{\Delta z}$$

$$d(\Delta z) = -\alpha d\sigma_z \Delta z$$

$$\Rightarrow \frac{d(\Delta z)}{\delta t} = -\alpha \Delta z \frac{d\sigma_z}{\delta t} \quad 6.2.4$$

llevando este valor a la ecuación . 6.2.3

$$\frac{d\eta}{\delta t} = - \frac{(1-\eta)}{\Delta z} \alpha \Delta z \frac{d\sigma_z}{\delta t} = - (1-\eta) \alpha \frac{d\sigma_z}{\delta t} \quad 6.2.5$$

Al considerar la compresibilidad B del fluido, que es el recíproco de su modulo de elasticidad volumetrica.

$$B = - \frac{\frac{d(\Delta V)}{\Delta V}}{dp} \quad 6.2.6$$

donde dp es la diferencial de la presión de poro.

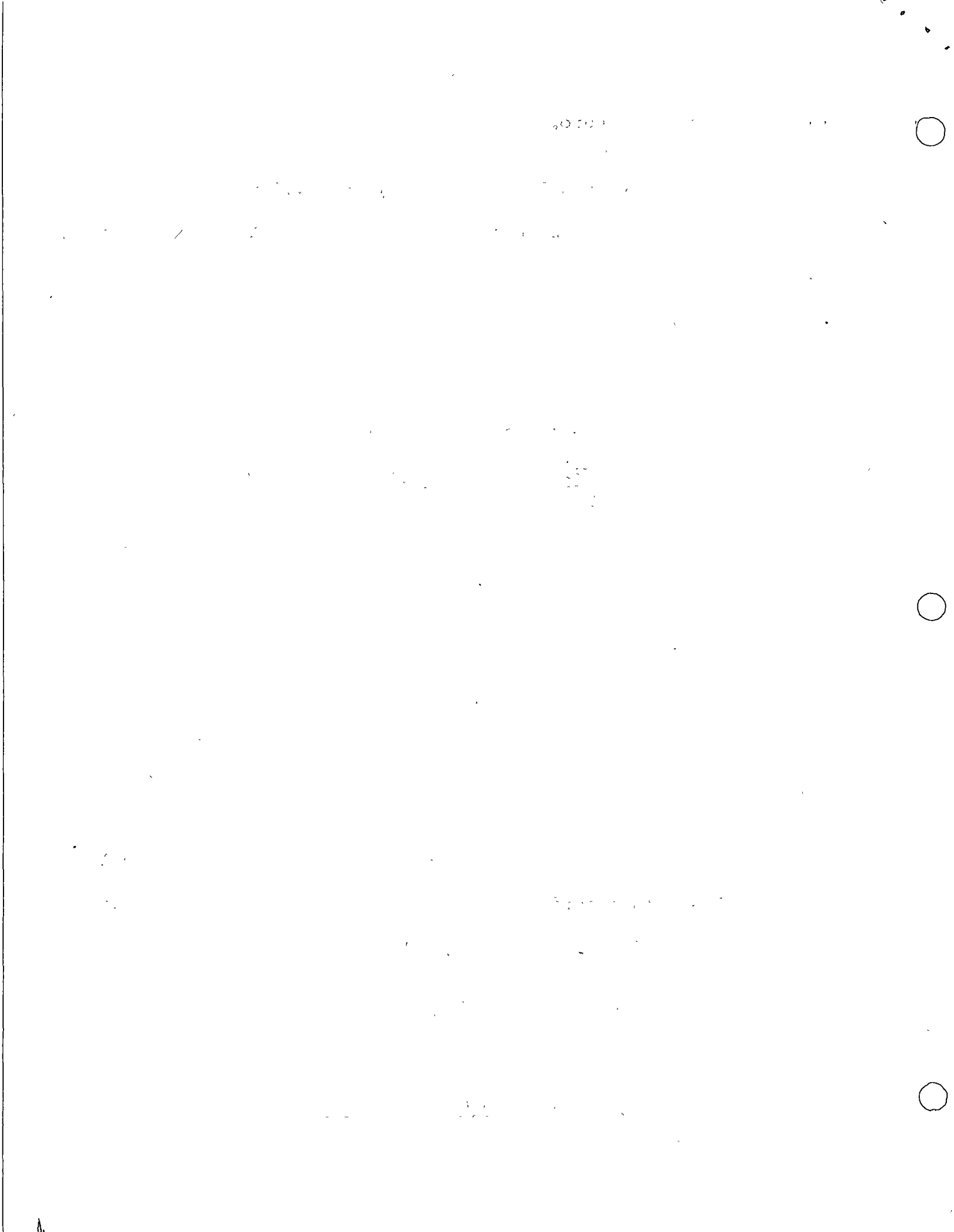
En cualquier punto del elemento diferencial de volumen la presión total = a la presión intergranular + presión de poro = cte.

$$\Rightarrow \sigma_z + p = \text{CONSTANTE}$$

$$d\sigma_z = - dp \quad 6.2.7$$

Por la ecuación de conservación de masa puede escribirse:

$$\rho \Delta V = \rho_0 \Delta V_0 = \text{cte.}$$



donde  $\rho_0 \Delta V_0$  son valores de referencia constantes de la densidad y del volumen elemental. La diferenciación total de esta ecuación -- da:

$$\rho d(\Delta V) + (\Delta V) d\rho = 0$$

tomando en consideración: 6.2.6

$$d(\Delta V) = -B dp(\Delta V)$$

$$-\rho B dp(\Delta V) + (\Delta V) d\rho = 0$$

$$\Rightarrow \rho B \frac{d\rho}{\rho} = \frac{d\rho}{\rho} \quad 6.2.7$$

Sustituyendo las ecuaciones: 6.2.3, 6.2.4, 6.2.7 en 6.2.2

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \left[ -(1-\eta)\alpha \rho \frac{d\sigma_z}{dt} + \rho B \frac{d\rho}{dt} \right] \Delta x \Delta y \Delta z$$

y se tiene en cuenta que:

$$d\sigma_z = -dp$$

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \left[ (1-\eta)\rho\alpha + \eta\rho B \right] \Delta x \Delta y \Delta z \frac{d\rho}{dt} \quad 6.2.8$$

Por la ecuación de continuidad se tiene

$$-\left[ \frac{d(\rho v_x)}{dx} + \frac{d(\rho v_y)}{dy} + \frac{d(\rho v_z)}{dz} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{d(\Delta M)}{dt}$$

$$= \rho \left[ (1-\eta)\alpha + \eta B \right] \frac{d\rho}{dt} \Delta x \Delta y \Delta z \quad 6.2.9$$

Expandiendo el primer termino

$$-\rho \left( \frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} \right) - \left( v_x \frac{d\rho}{dx} + v_y \frac{d\rho}{dy} + v_z \frac{d\rho}{dz} \right) \quad 6.2.10$$

el segundo término de la expresión anterior es muy pequeño, puesto que  $\rho$ , es prácticamente constante, y se puede despreciar.

La carga piezométrica en cualquier punto del medio vale:

1912

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...



$$h = z + \frac{1}{g} \int \frac{dp}{\rho} + \text{cte.} \quad 6.2.11$$

$$\rho g = \gamma ;$$

$$\frac{dp}{\gamma} = d\eta$$

Calculamos las derivadas parciales

$$\frac{dh}{dx} = \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{dh}{dy} = \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dy}$$

$$\frac{dh}{dz} = 1 + \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dz}$$

$$\Rightarrow \frac{dp}{dx} = \rho g \frac{dh}{dx} \quad 6.2.12$$

$$\frac{dp}{dy} = \rho g \frac{dh}{dy} \quad 6.2.13$$

$$\frac{dp}{dz} = \rho g \left( 1 - \frac{dh}{dz} \right) \quad 6.2.14$$

de la ecuación 6.2.7

se tiene que:  $dp = \rho B dp$

$$\frac{dp}{dx} = \rho B \frac{dp}{dx}$$

$$\gamma \frac{dp}{dx} = \rho B \cdot \rho g \frac{dh}{dx} = B \rho^2 g \frac{dh}{dx} \quad 6.2.15$$

$$\frac{dp}{dy} = \rho B \cdot \rho g \frac{dh}{dy} = B \rho^2 g \frac{dh}{dy} \quad 6.2.16$$

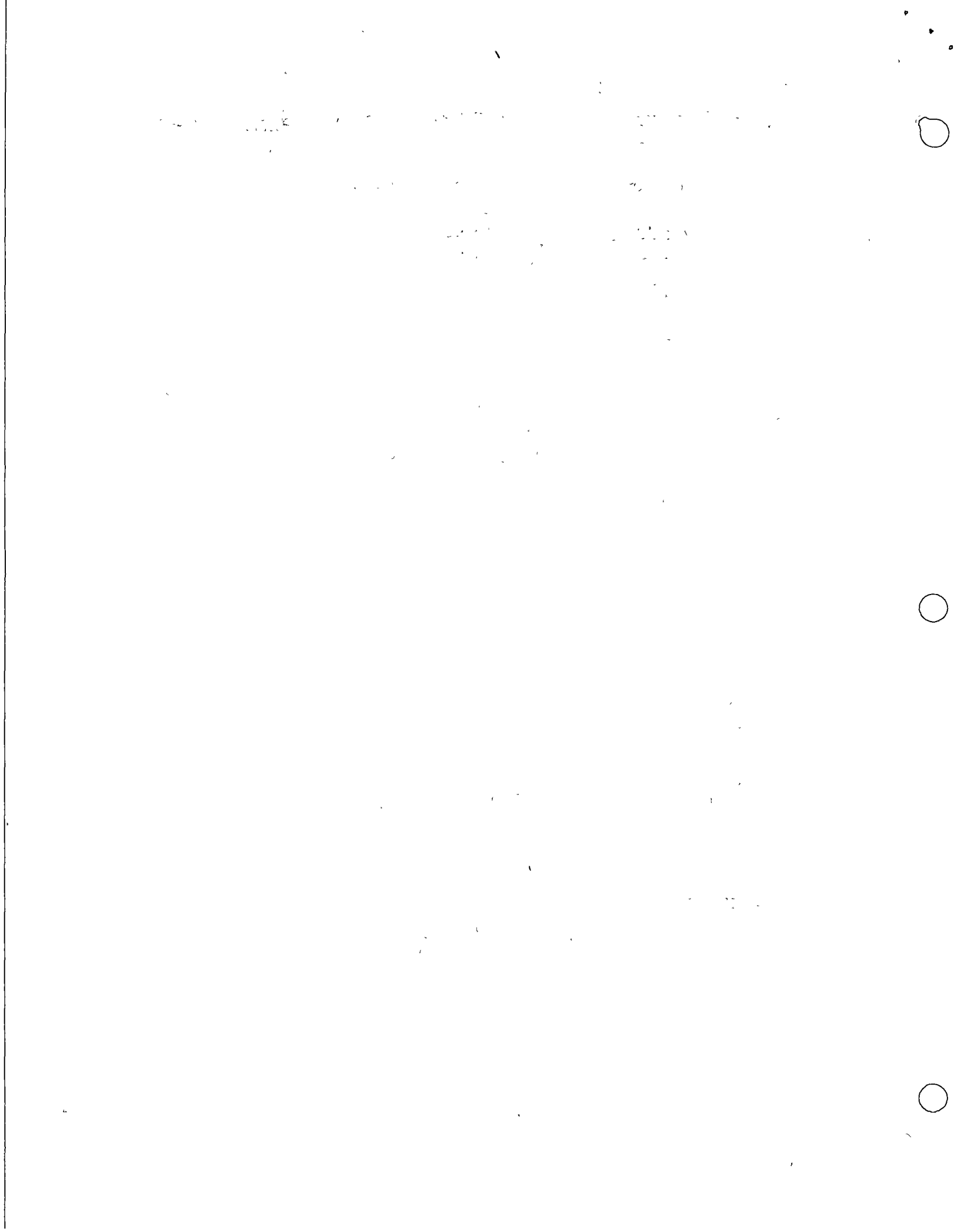
$$\frac{dp}{dz} = \rho B \cdot \rho g \left( 1 - \frac{dh}{dz} \right) = B \rho^2 g \left( \frac{dh}{dz} - 1 \right) \quad 6.2.17$$

y como antes se había visto la Ley de Darcy se puede expresar en la forma siguiente:

$$V_x = -K \frac{dh}{dx}$$

$$V_y = -K \frac{dh}{dy}$$

$$V_z = -K \frac{dh}{dz}$$



derivando la ecuación 6.2.11

con respecto al tiempo se

tiene:

$$\frac{\delta h}{\delta t} = \frac{1}{\rho g} \frac{d\rho}{\delta t}$$
$$\Rightarrow \frac{d\rho}{\delta t} = \rho g \frac{\delta h}{\delta t} \quad 6.2.17$$

Por la ecuación 6.2.10 se puede escribir:

$$K\rho \left( \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} \right) + 2KB\rho^2 g \left[ \left( \frac{\delta h}{\delta x} \right)^2 + \left( \frac{\delta h}{\delta y} \right)^2 + \left( \frac{\delta h}{\delta z} \right)^2 - \frac{dh}{\delta z} \right] =$$
$$= \rho^2 g \left[ (1-h)\alpha + hB \right] \frac{dh}{\delta t} \quad 6.2.18$$

Los terminos cuadráticos del primer miembro pueden despreciarse, la ecuación anterior simplificando terminos resulta:

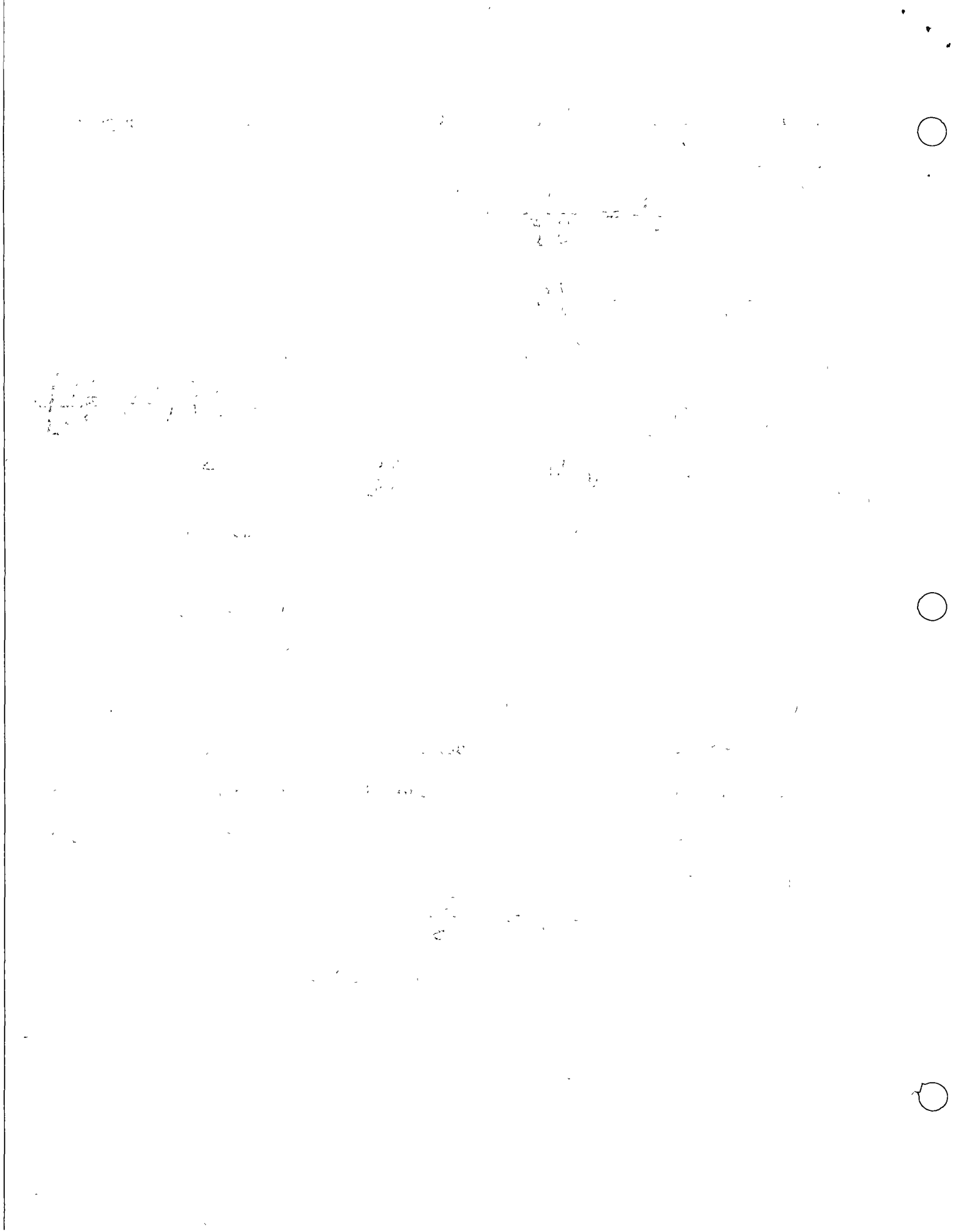
$$\nabla^2 h - 2gB\rho \frac{dh}{\delta z} = \frac{\rho g}{K} \left[ (1-h)\alpha + hB \right] \frac{dh}{\delta t} \quad 6.2.19$$

al termino  $\rho g \left[ (1-h)\alpha + hB \right]$  se le denomina coeficiente de almacenamiento específico y se le representa por  $S_s$ , y se le define como el volumen de agua que el acuífero puede liberar o agregar a su almacenamiento, por unidad de volumen y por unidad de variación de la carga piezométrica.

$$S_s = \frac{S}{b}$$

Para un acuífero confinado  $s = \rho g (\alpha + hB)$

sus unidades son:  $\frac{L}{L}$



$(1-h)\rho g \alpha$  = nos representa el volumen de agua que libera o agrega a su almacenamiento el acuífero, debido a la compresión del esqueleto intergranular, cuando la variación del nivel piezométrico es unitaria.

$\rho g h B$  = nos representa el agua liberada por unidad de volumen, debido a la reducción de la presión de poro o descompresión del agua cuando el nivel piezométrico varía en una unidad.

$\alpha$  = recíproco del modulo de elasticidad del esqueleto intergranular del medio poroso.

$B$  = recíproco del modulo de la elasticidad del agua  
 $= 4.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{kg}$ . (A 20°C y A LA P.A.T.)

$\rho$  = densidad del agua

$S_s = \rho g h B = 4 \times 10^{-6} h/1/m$  ] PARA ACUÍFEROS NO COMPRESIBLES (ROCA)

$g = 9.81 \text{ m/seg}$ ;  $\gamma = \text{PESO ESPECÍFICO DEL AGUA (1TON./m}^3\text{)}$   
 $\gamma = \rho g$

Por lo que la ecuación queda:

$$\nabla^2 h - 2gB\rho \frac{dh}{dx} = \frac{S_s}{K} \frac{dh}{dt}$$

Para el caso en que  $\frac{dh}{dx}$  es muy pequeño; flujo con gradientes

hidráulicos bajos, la ecuación queda

$$\nabla^2 h = \frac{S_s}{K} \frac{dh}{dt}$$

puesto que  $S_s = \frac{S}{r} \gamma$

ST. JOHN'S COLLEGE  
NEW BRUNSWICK, N. J.  
1900

THE UNIVERSITY OF THE STATE OF NEW YORK  
THE STATE EDUCATION DEPARTMENT  
ALBANY, N. Y.

que el coeficiente de transmisibilidad del acuífero  $T$  se define como el producto de la permeabilidad por su espesor  $b$ ; esto es:

$$T = Kb$$

Finalmente la ecuación diferencial aproximada que gobierna el movimiento del flujo en un medio poroso, cuando el régimen del flujo es transitorio y en un medio poroso confinado, resulta:

$$\nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{dh}{dt} \quad 6.2.20$$

a  $\frac{S}{T}$  se le llama también coeficiente de difusión, si el flujo es estable, la velocidad y por tanto la distribución de presiones no cambia con el tiempo,

$$\Rightarrow \frac{dh}{dt} = 0 \quad \text{quedando la ecuación}$$

$$\nabla^2 h = 0 \quad 6.2.21$$

conocida como ecuación de Laplace.

En un acuífero libre o no confinado se tiene que

$$S = S_y + \rho g (\alpha + \beta)$$

donde  $S_y$  es el rendimiento específico del acuífero, que se define como el volumen de agua que una roca puede liberar o almacenar, por unidad de área horizontal, cuando el nivel freático se mueve verticalmente una unidad.

Hipotesis de Dupuit para el caso del flujo en un medio poroso no confinado.

La resolución de la ecuación 6.2.21 para el caso de un

1. The first part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee.

2. The second part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

3. The third part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

4. The fourth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

5. The fifth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

6. The sixth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

7. The seventh part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

8. The eighth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

9. The ninth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

10. The tenth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

11. The eleventh part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

12. The twelfth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.

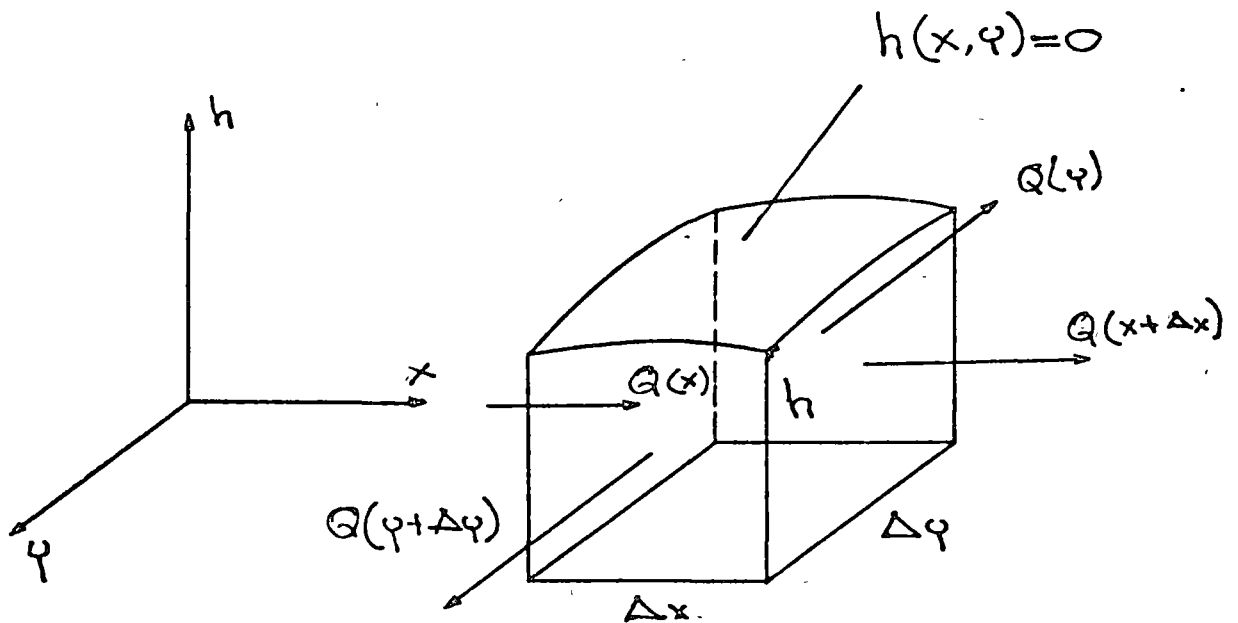
13. The thirteenth part of the document is a list of the names and addresses of the members of the committee.



movimiento en un acuífero libre es difícil, por que generalmente no se conoce la posición de la superficie libre.

Las hipótesis simplificativas de Dupuit son:

- 1.- El movimiento es horizontal
- 2.- La velocidad es uniforme en todo el espesor del acuífero.
- 3.- La velocidad en la superficie libre se puede expresar de acuerdo a la Ley de Darcy como  $v = -K \frac{dh}{dx}$ , para pendientes suaves de la superficie libre.



$h(x, y)$ , representa la altura de la superficie libre por encima del plano de referencia y la carga hidráulica en cada punto de la vertical trazada desde la superficie libre.

Si el movimiento tiene lugar en dirección del eje de las X ; el caudal que entra al elemento es:

1948

...

...

...

...

...

...

...



...

...

...

...

...

$$Q_e(x) = -K \frac{dh}{dx} h \Delta y$$

y el caudal que sale es:

$$Q_s(x) = -K \frac{dh}{dx} h \Delta y + \Delta x \frac{d}{dx} \left[ -K \frac{dh}{dx} h \Delta y \right] + \dots$$

si  $K = \text{cte.}$

$$Q_e(x) - Q_s(x) = K \Delta x \Delta y \frac{d}{dx} \left( h \frac{dh}{dx} \right) = \Delta x \Delta y K \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} \frac{dh^2}{dx} \right)$$

en forma similar en dirección del eje de los  $y$ , vale

$$K \Delta x \Delta y \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{2} \frac{dh^2}{dy} \right)$$

y por hipótesis se admite que no existe movimiento de la dirección vertical.

Por el principio de continuidad.

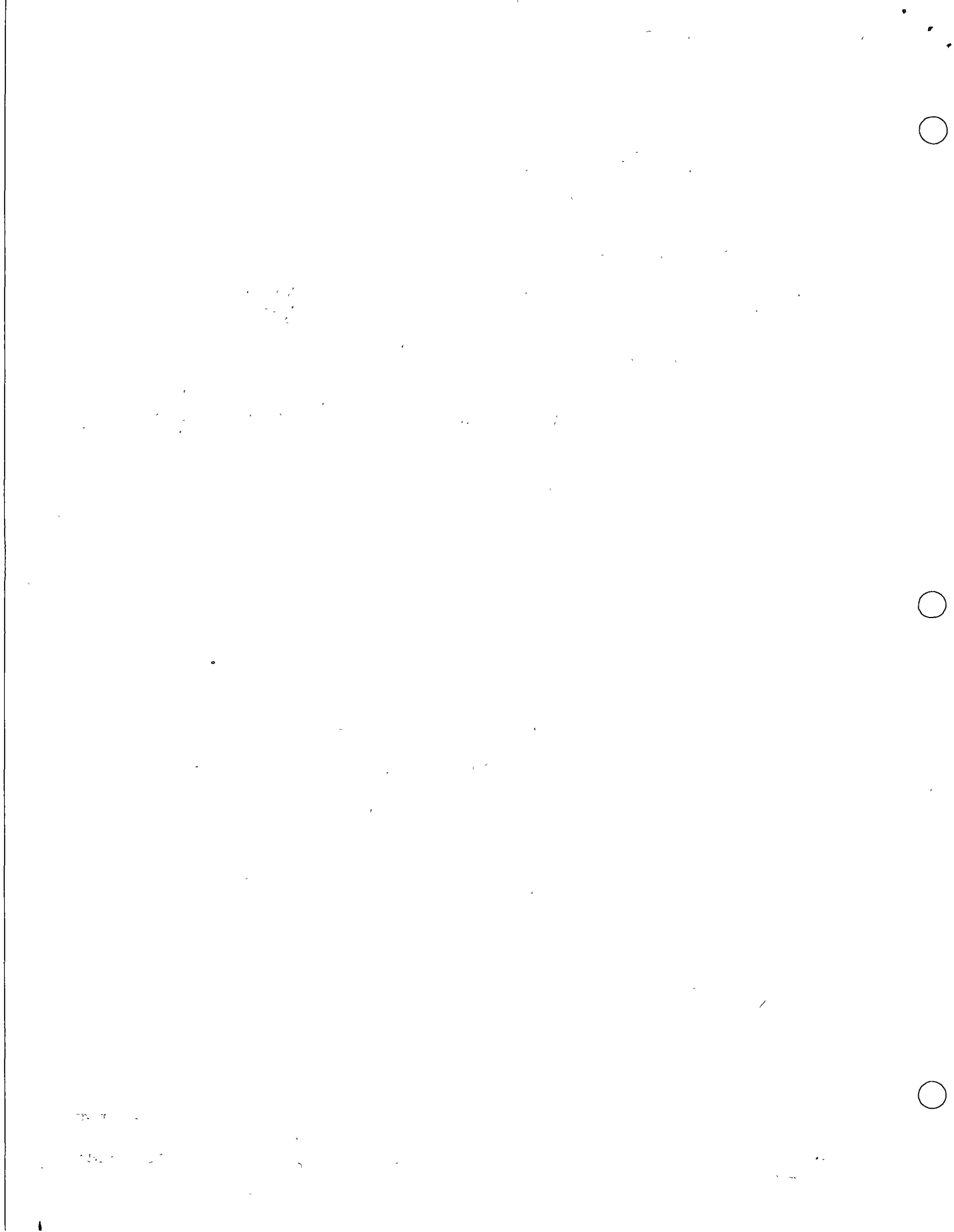
$Q_e - Q_s =$  Variación en el Almacenamiento, pero la variación en este caso es nula, si en el interior del elemento de volumen considerado no existe ninguna fuente o resumidero ; la ecuación queda:

$$\Delta x \Delta y \frac{K}{2} \left( \frac{d^2 h^2}{dx^2} + \frac{d^2 h^2}{dy^2} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \nabla^2 h^2 = 0$$

6.2.22

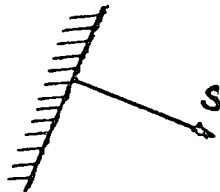
Si se tiene una infiltración que produzca recarga; y modifique la superficie libre, si  $W$  es el valor de la recarga por unidad de superficie, la recarga total que experimenta el elemento diferencial



6.3.- Condiciones de Frontera:

Las fronteras a un sistema de flujo y las condiciones prevalecen en ellas, más comunes que se presenten en el movimiento del agua subterránea son las siguientes:

a).- Fronteras Impermeables. Funcionan como límites al movimiento del agua. La velocidad normal del flujo a estas fronteras es nula y por tanto se cumple que  $\frac{\partial h}{\partial s} = 0$



b).- Fronteras de carga constante

$$h = cte$$

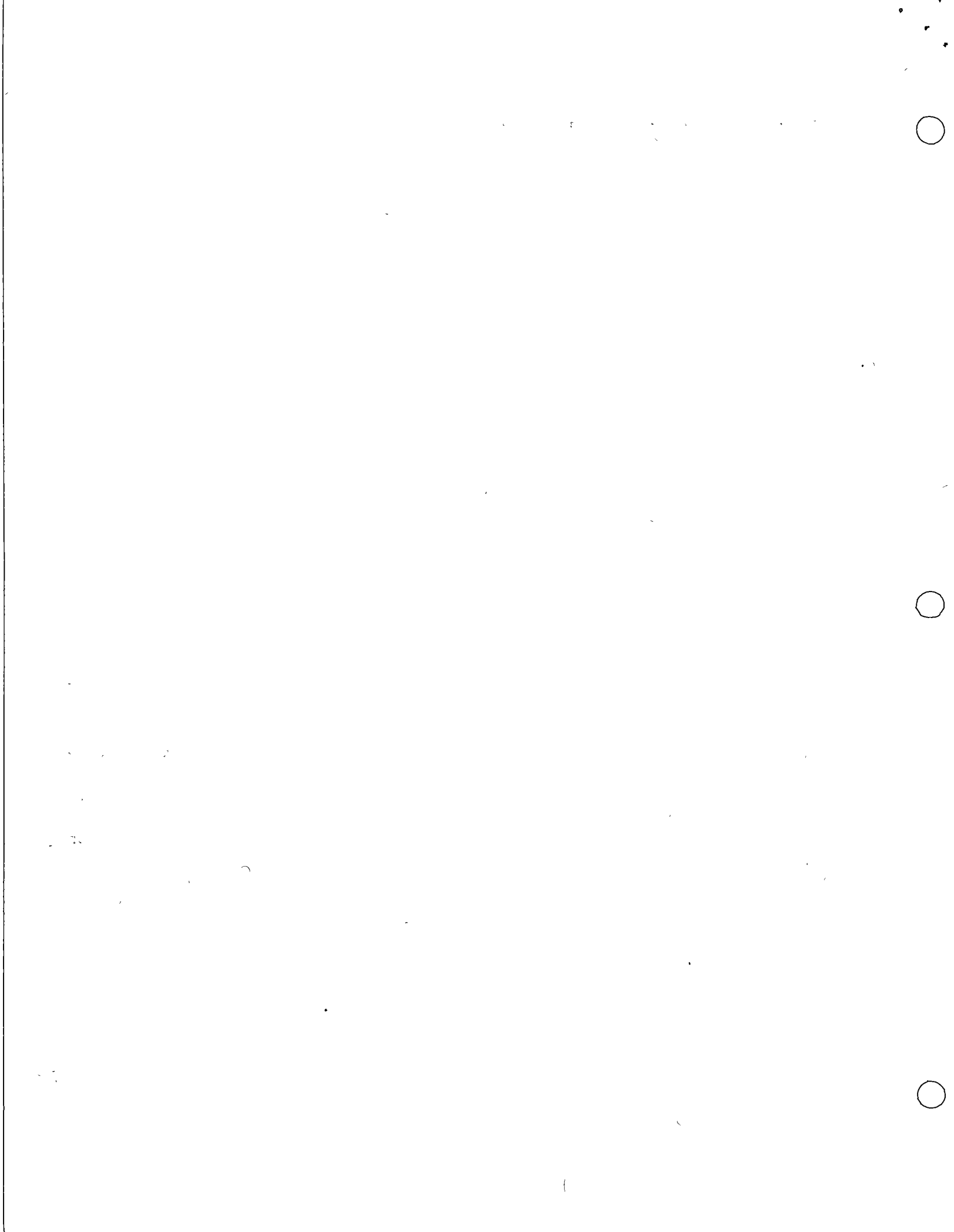
en régimen establecido

$$h = f(t)$$

en régimen no establecido ó transitorio

c).- Superficie libre.- Se define como una superficie de corriente, a lo largo de la cual la presión es uniforme. En acuíferos libres, la superficie fréatica se puede considerar como la superficie libre, sí se desprecian los efectos de capilaridad y el grado de infiltración de la superficie del agua. La presión uniforme en este caso es la presión atmosférica.

d).- Fronteras de Interfases.- En el caso de dos acuíferos adyacentes con diferentes propiedades hidráulicas, en los que el cambio en estas propiedades puede ser gradual o abrupto, la zona en que ocurre



el cambio puede ser idealizada como una frontera común a los dos - -  
acuíferos.

Si se designa con  $h_1$  y  $h_2$ , la distribución de carga en -  
cada, uno de ellos y  $k_1$  y  $k_2$  sus permeabilidades respectivas.

Las condiciones que se deben cumplir en la frontera son:

$$h_1 = h_2$$

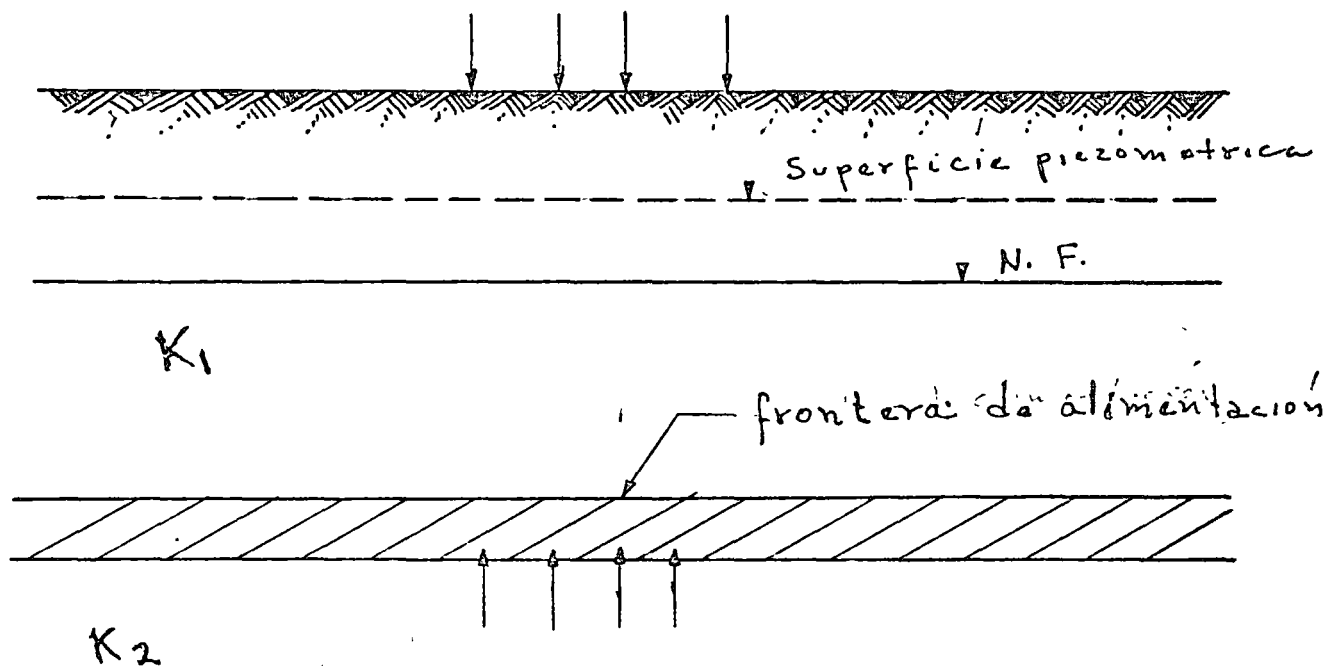
$$v_{n1} = v_{n2}$$

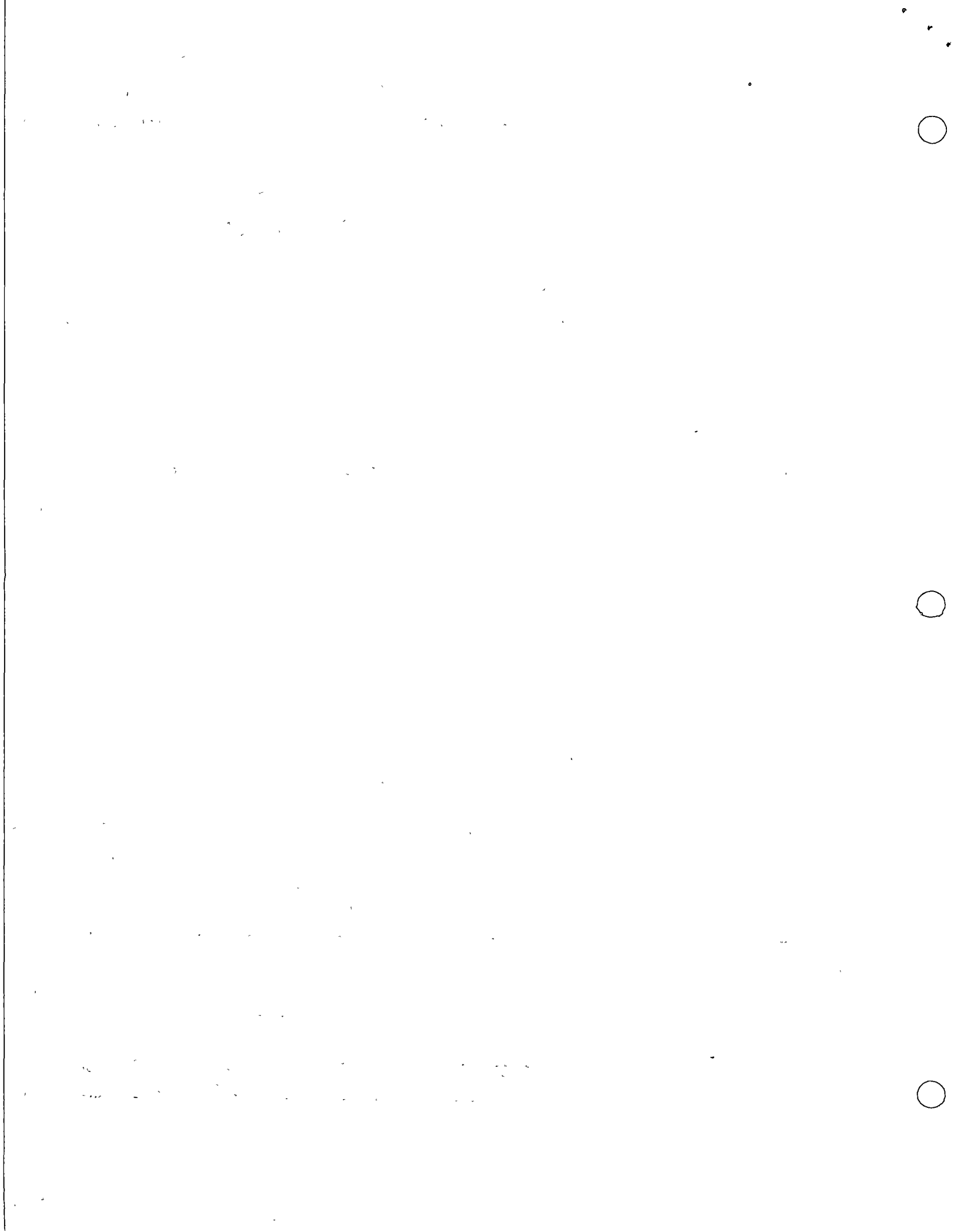
$$K_1 \frac{\partial h_1}{\partial n} = K_2 \frac{\partial h_2}{\partial n}$$

y las líneas de flujo al pasar de un medio a otro deben cumplir con  
la ley de refracción, por la que se establece.

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2}$$

$\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos que las líneas de flujo forman con la nor-  
mal a la frontera.







considerado es  $W \Delta x \Delta y$ , aplicando el principio de continuidad queda:

$$\Delta x \Delta y \frac{K}{2} \left( \frac{d^2 h^2}{dx^2} + \frac{d^2 h^2}{dy^2} \right) + W \Delta x \Delta y = 0$$

$$\nabla^2 h^2 + \frac{2W}{K} = 0 \quad 6.2.23$$

6.4 Soluciones Gráficas de la Ecuación General de Movimiento: Redes de flujo.

La solución de la ecuación de Laplace, debe efectuarse en un dominio dado con ciertas condiciones que debe cumplir la función  $h$ , en los límites del mismo (condiciones de frontera). Generalmente su solución analítica es complicada. En estos casos resuelve - - por métodos numéricos, analógicos o métodos gráficos.

REDES DE FLUJO:

Sí una función  $h(x, y) = 0$  cumple la ecuación de Laplace, - existe otra función  $\Psi$  llamada ecuación conjugada de Laplace, que - también la cumple.

Se demuestra que estas dos funciones representan dos familias de curvas que se cortan ortogonalmente (condiciones de Cauchy - - Riemann).

La representación gráfica de estas dos familias de curvas que cumplen además con las condiciones de frontera del flujo en un medio poroso, se conoce con el nombre de red de flujo . .

El método gráfico se basa en la ortogonalidad que guardan las líneas de flujo y las equipotenciales.

1912

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...



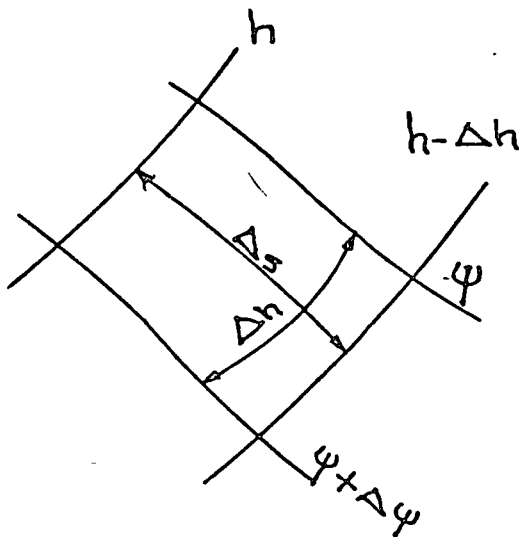
En medios homogéneos se utiliza el método de los cuadrados (método de Forcheimer) que consiste en trazar celdas cuadradas cumpliendo las condiciones de frontera.

Por un procedimiento de tanteos se construyen  $N$  tubos de flujo de igual descarga  $\Delta Q = \frac{Q}{N}$  La caída total de carga  $H$  se divide en  $M$  caídas.

El caudal está dado por:

$$Q = N \Delta Q = N \cdot k \frac{\Delta h}{\Delta s} \cdot \Delta h = k \cdot N \frac{H}{M}$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta s} = 1$$

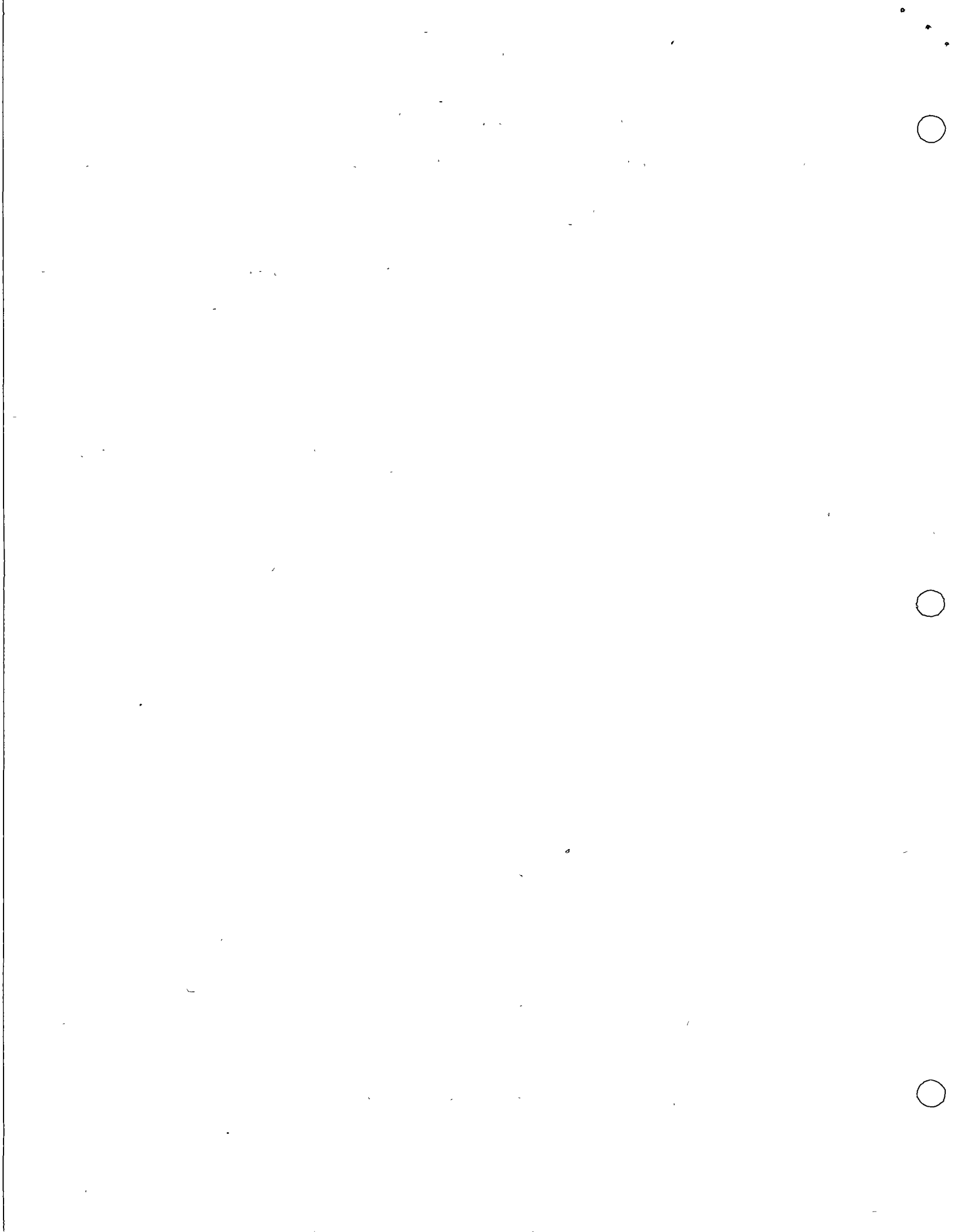


se analiza una sección de ancho unitario.

## 6.5 Soluciones analíticas de la ecuación

Método de diferencias finitas:

Este método se basa en una propiedad de la función armónica: el valor de la función en un punto es igual al promedio de sus valores a lo largo de un círculo con centro en el punto



$$\varphi_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi_M d\theta$$

$\varphi_0$  es el valor de la función armónica en el punto o, es el valor en el punto M del perímetro. De esta expresión se obtiene la fórmula aproximada:

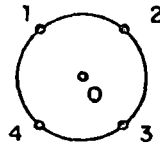
$$\varphi_0 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n}{n}$$

donde  $\varphi_1, \varphi_2$  son valores de  $\varphi$  en puntos equidistantes a lo largo del perímetro.

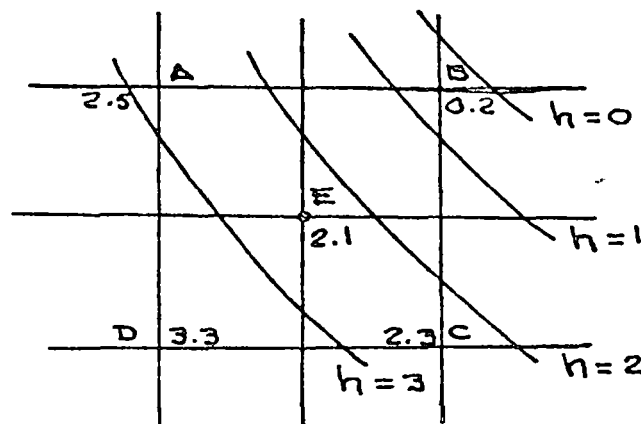
En particular si se toman cuatro puntos

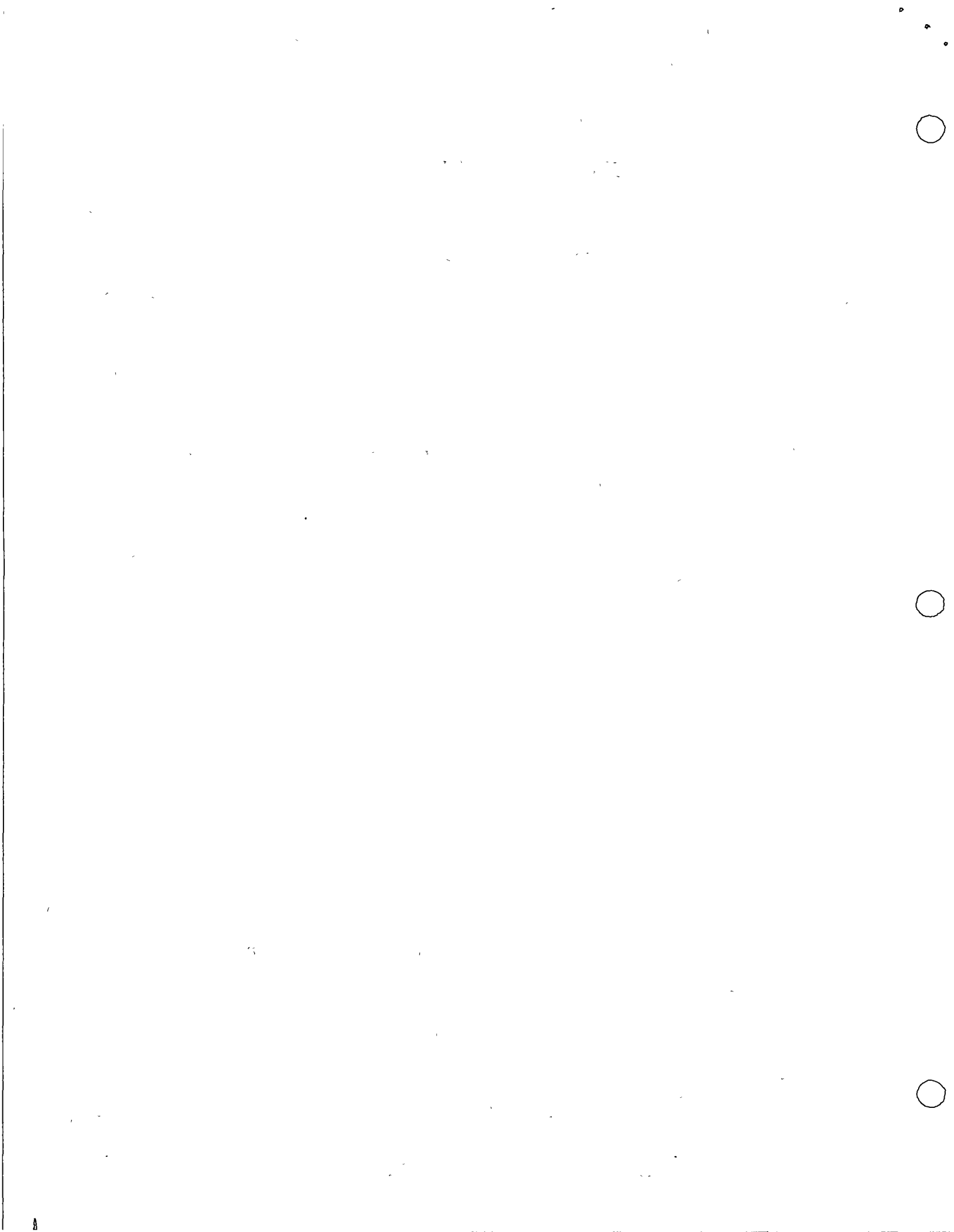
$$\varphi_0 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4}{4}$$

Los cuatro puntos son los vértices de un cuadrado,  $\varphi_0$  es el valor de la función en el centro del cuadrado.



Si suponemos que tenemos un esquema inicial de las equipotenciales de un sistema de flujo en medio, en el que se ha trazado una malla formada por cuadros, como se ilustra en la siguiente figura.





Por interpolación entre líneas adyacentes equipotenciales, se pueden determinar los valores aproximados de la función armónica en los vértices del cuadrado A B C D, de la figura anterior. Para el centro E del cuadrado A B C D, el valor de la función la determinamos el promedio de los valores de la función en los cuatro vértices.

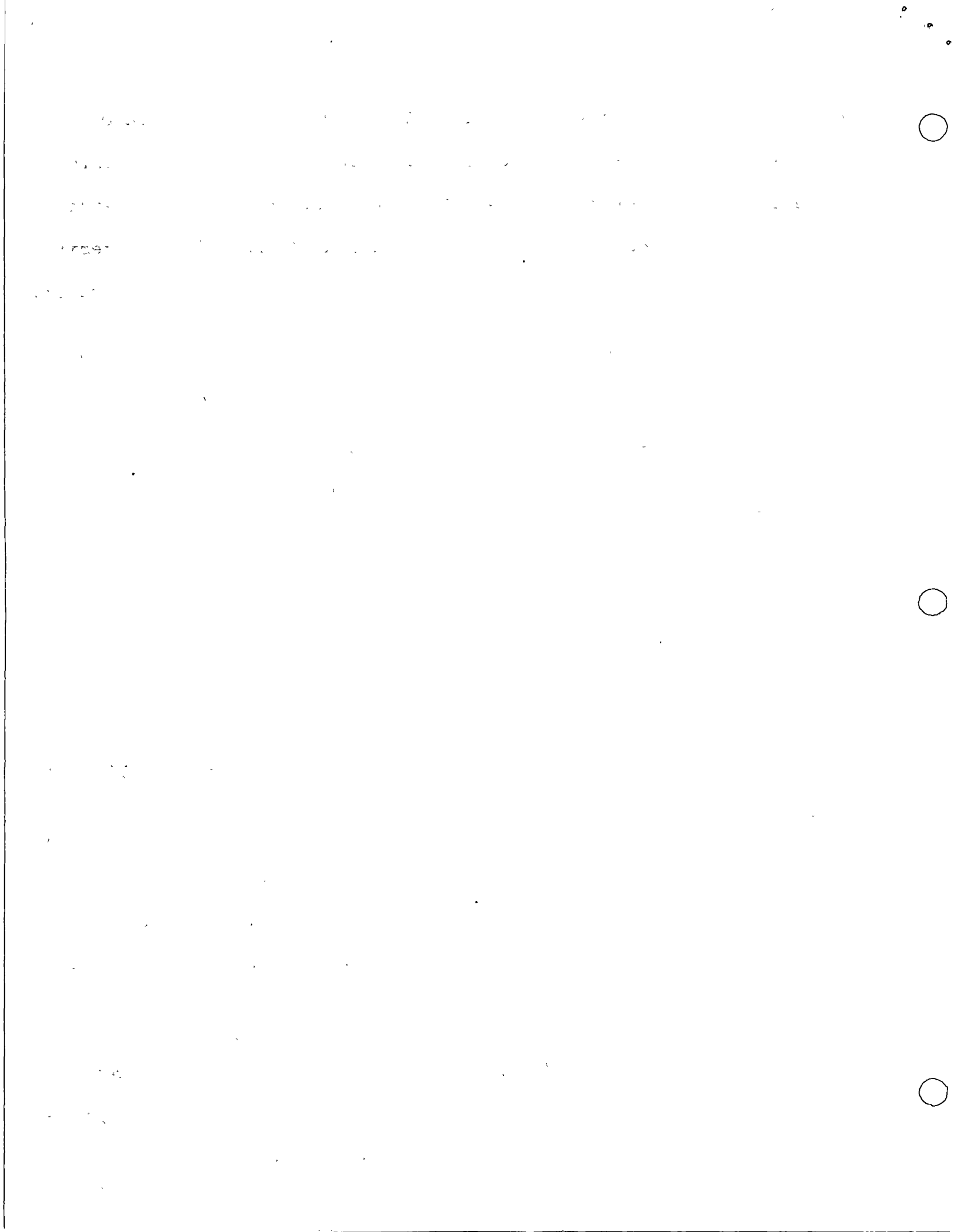
Determinando en esta forma los valores de los centros de todos los posibles cuadros, formamos los promedios aritméticos de los nuevos valores.

Que dan con mayor precisión los valores de la función en los vértices A B C D. Podemos borrar los valores iniciales y escribir los nuevos valores calculados.

Sí continuamos este proceso, obtendremos un sistema de números que tienden a su límite bien definido, que es el valor de la función armónica en los vértices del cuadro. Prácticamente después de 3 ó 4 vueltas, los valores de la función en cada vértice, ya no varían.

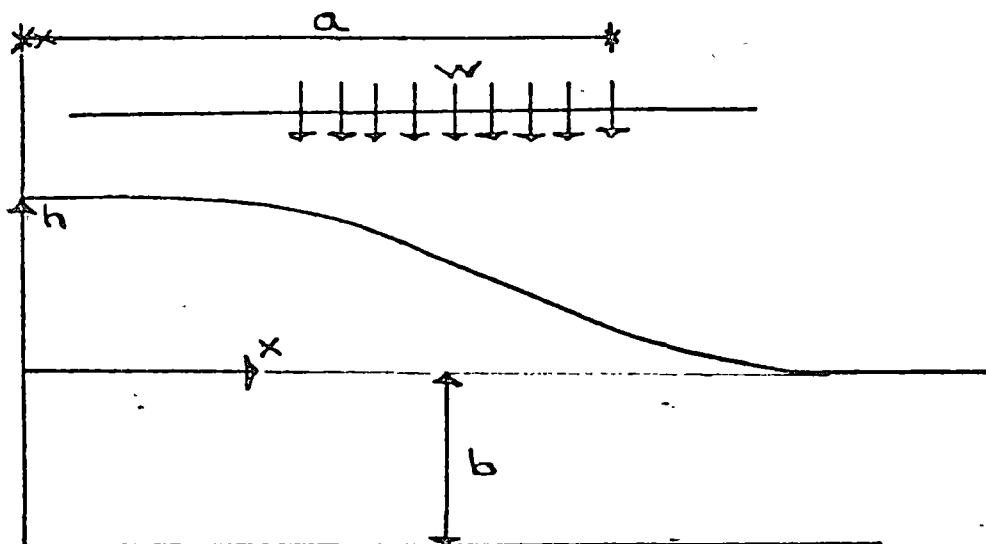
Con los valores de la función  $h$  en los vértices del cuadro, podremos dibujar las familias de curvas equipotenciales, la familia de curvas de líneas de corriente se puede construir otorgando a la primera, o bien por el método de los promedios.

Consideremos el siguiente problema, sea un medio poroso limitado lateral e inferiormente por fronteras impermeables y consideramos que en un ancho "a" recibe una recarga  $w$  por unidad de área y





consideremos que el espesor  $b$  del acuífero es infinito, se trata de determinar la ecuación que representa la forma de la superficie piezométrica.



Puesto que el espesor del acuífero es infinito se puede considerar que el flujo es confinado, además consideremos la condición de flujo establecido. La ecuación de Laplace considerando la recarga  $w$  queda.

$$\nabla^2 h + \frac{w}{T} = 0 \quad T = Kb$$

Y PUESTO QUE EL MOVIMIENTO OCURRE EN LA DIRECCION X

$$\frac{d^2 h}{dx^2} = 0 \quad \text{Y QUEDA:}$$

1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000



$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{W}{T} = 0 \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{d^2 h}{dx^2} = -\frac{W}{T} \textcircled{2}$$

$$\Rightarrow \frac{dh}{dx} = -\frac{W}{T} x + C_1 \textcircled{3}$$

PARA  $x=0$

INTEGRANDO  $\textcircled{3}$

$$dh = -\frac{W}{T} x dx$$

$$h = -\frac{W}{2T} x^2 + C_2 \textcircled{4}$$

PARA  $x=a$   $h_1 = 0$

$$0 = -\frac{W}{2T} a^2 + C_2$$

$$\Rightarrow C_2 = \frac{W}{2T} a^2$$

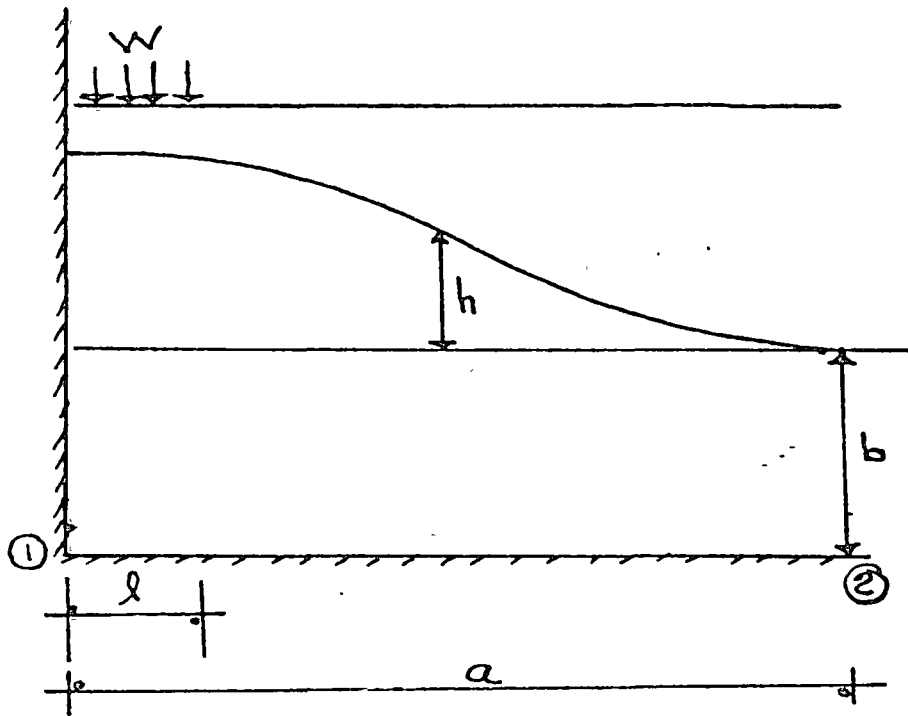
SUSTITUYENDO ESTE VALOR EN  $\textcircled{4}$

$$h = -\frac{W}{2T} x^2 + \frac{W}{2T} a^2$$

$$h = \frac{W}{2T} (a^2 - x^2) \text{ ES LA ECUACION DE LA SUPERFICIE PIEZO - METRICA.}$$



CONSIDEREMOS EL CASO EN QUE LA RECARGA OCURRA SOLO EN UNA PORCION DEL ACUIFERO Y LAS MISMAS CONDICIONES DE FLUJO QUE EN EL PROBLEMA ANTERIOR.



SE TIENE:

$$\frac{d^2 h_1}{dx^2} + \frac{W}{T} = 0 \quad ; \quad 0 < x \leq l \quad (1)$$

$$x=0 \quad \frac{dh}{dx} = 0$$

$$\frac{d^2 h_2}{dx^2} = 0 \quad ; \quad \frac{dh_2}{dx} \left( \frac{dh_2}{dx} \right) \quad (2)$$

$$x=a \quad h=0$$



$$\text{PARA } x=1 \quad h_1 = h_2$$

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{dh_2}{dx}$$

DE ①

$$\frac{d^2 h_1}{dx^2} = -\frac{w}{T}$$

$$\Rightarrow \frac{dh_1}{dx} = -\frac{w}{T}x + C_1 \quad \textcircled{3} ; \text{PARA } x=l$$

$$\frac{dh_1}{dx} = -\frac{w}{T}l \quad x=0 \quad \frac{dh_1}{dx} = 0 ; C_1 = 0$$

$$\frac{dh_1}{dx} = -\frac{w}{T}x$$

$$h_1 = -\frac{w}{T} \frac{x^2}{2} + C_2 \quad \textcircled{4}$$

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{dh_2}{dx} = -\frac{w}{T}l = \text{cte.}$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{dh_2}{dx} \right) = 0 \Rightarrow \frac{dh_2}{dx} = \text{cte.} = -\frac{w}{T}l$$

$$\Rightarrow h_2 = -\frac{w}{T}lx + C_3$$

$$\text{PARA } x=a \quad h_2 = 0 \Rightarrow C_3 = \frac{w}{T}la$$

$$h_2 = -\frac{w}{T}lx + \frac{w}{T}la$$

$$h_2 = \frac{w}{T}l(a-x) \quad \textcircled{5}$$





Para valuar  $C_2$  hagase  $x = l$  y sustituyendose en (5)

$$h_2 = \frac{w}{T} l (a-l) \quad (6)$$

Calculamos el valor  $h_1$  para  $x = l$  en (4)

$$\text{Se tiene } h_1 = -\frac{w}{T} \frac{l^2}{2} + C_2$$

Puesto que  $h_1 = h_2$

$$-\frac{w}{T} \frac{l^2}{2} + C_2 = \frac{w}{T} l (a-l)$$

$$C_2 = \frac{w}{T} \left( al - l^2 + \frac{l^2}{2} \right)$$

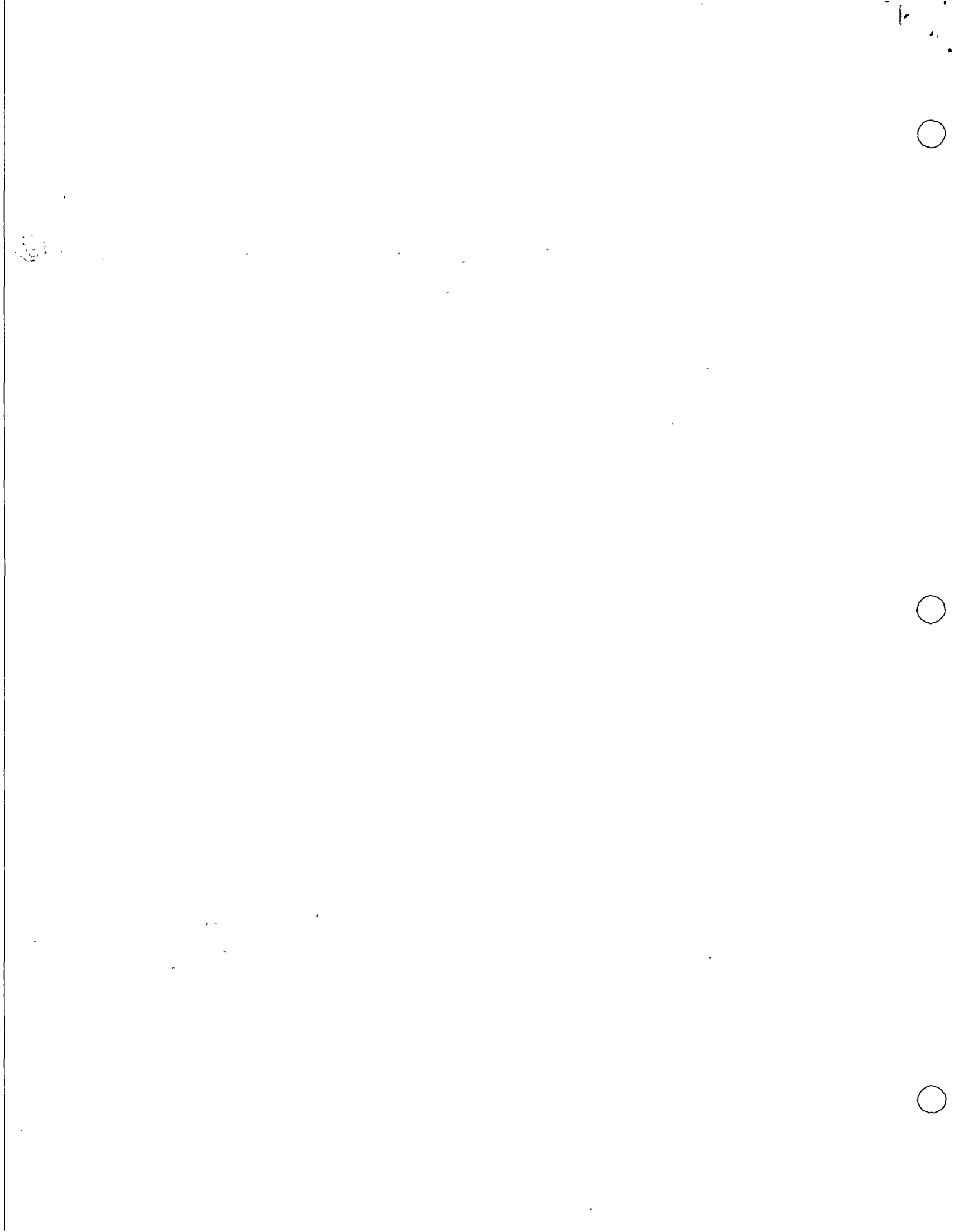
$$C_2 = \frac{w}{T} \left( al - \frac{l^2}{2} \right)$$

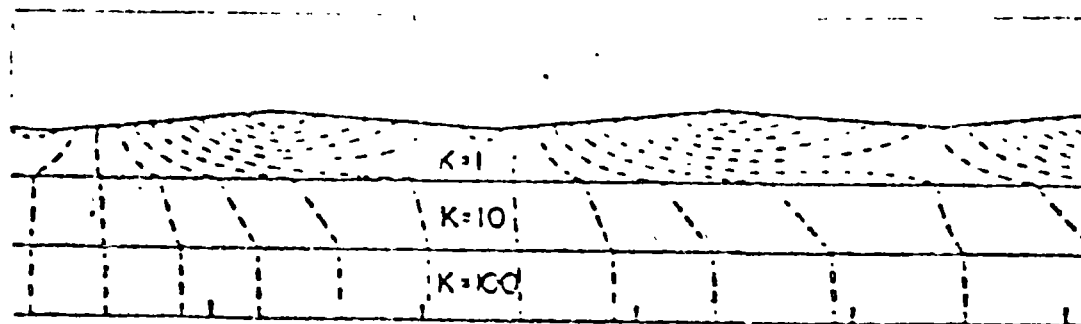
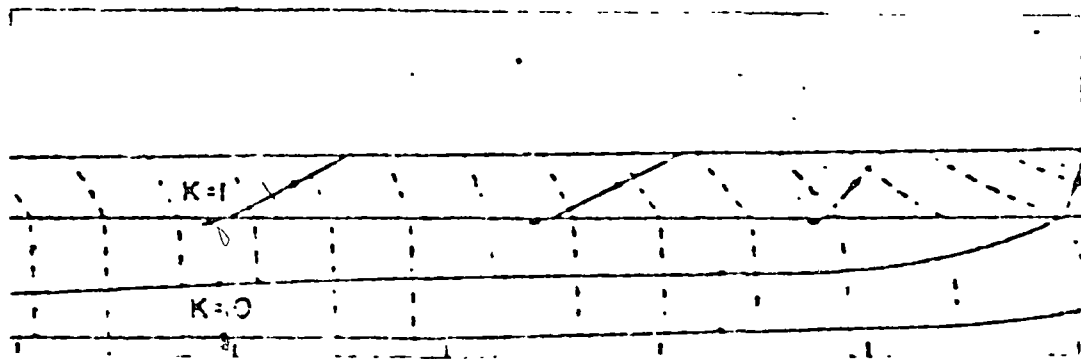
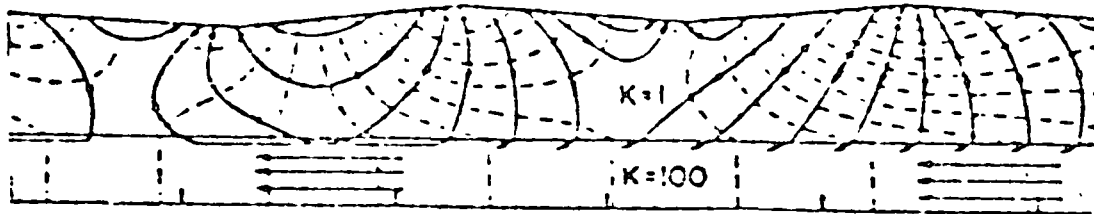
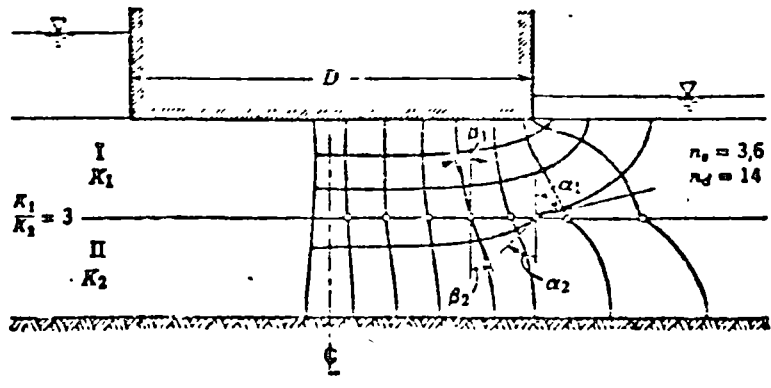
Sustituyendo este valor en (4)

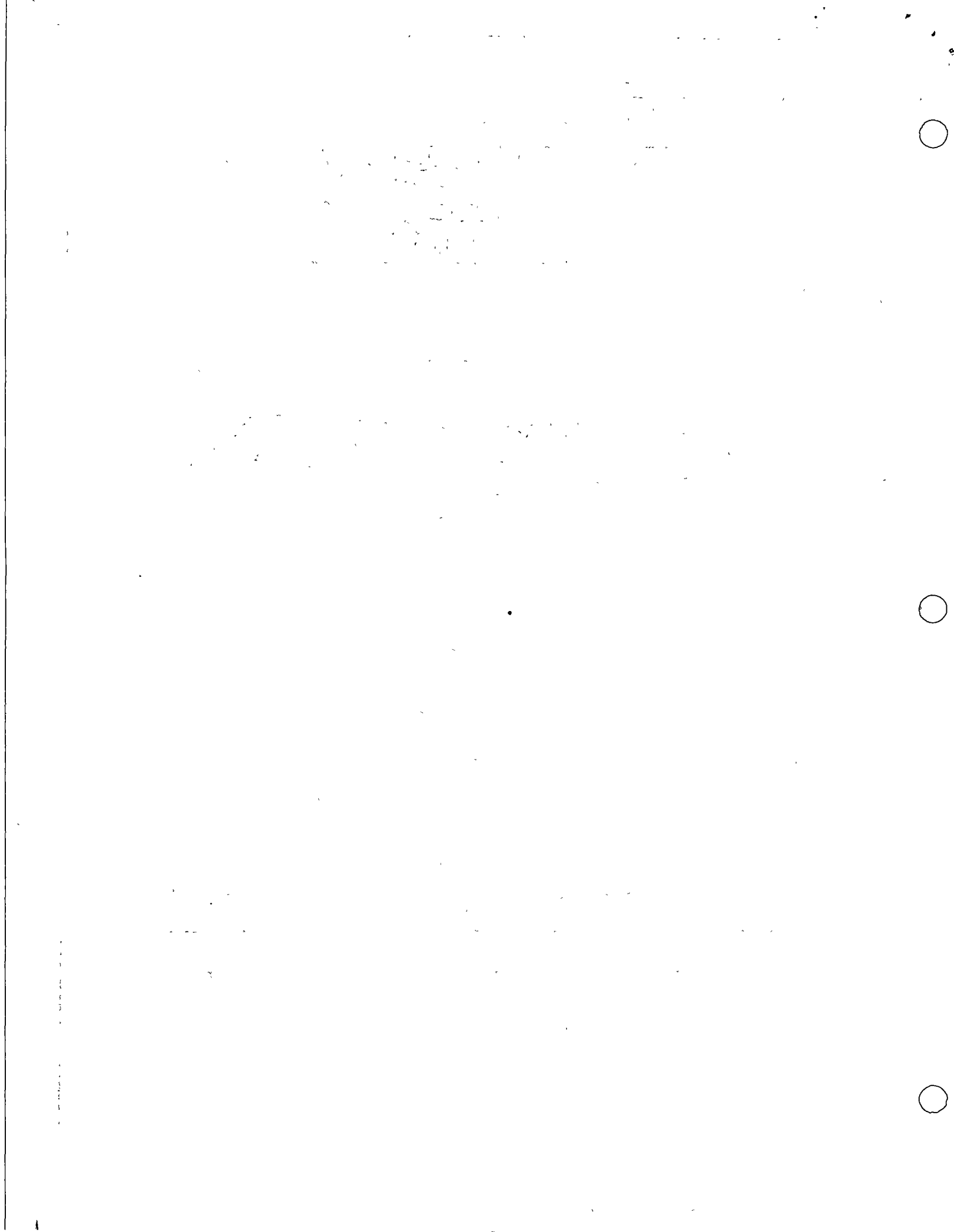
se tiene la expresión de  $h_1$

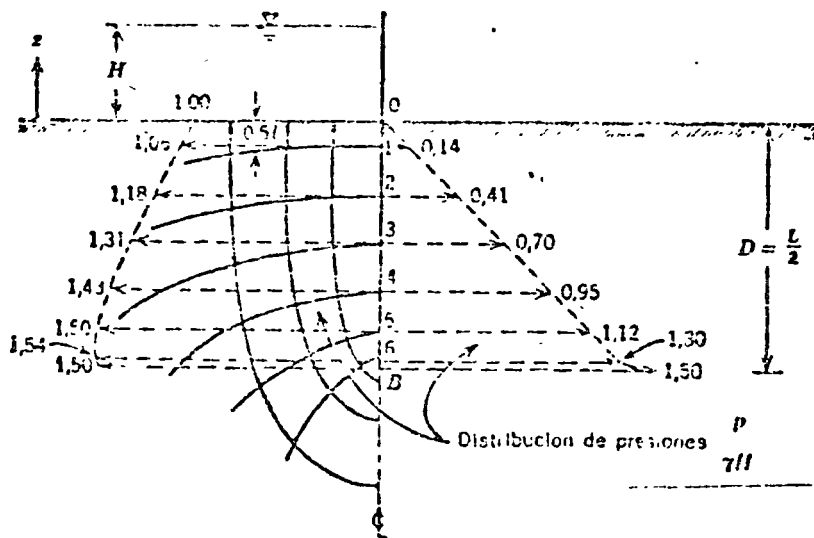
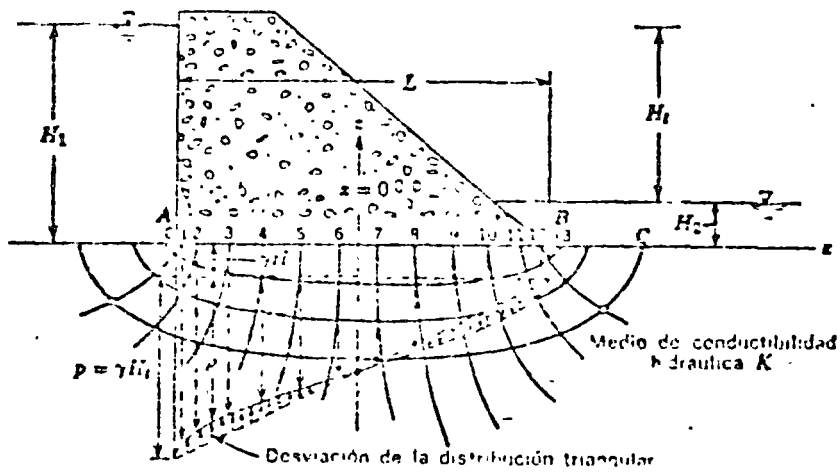
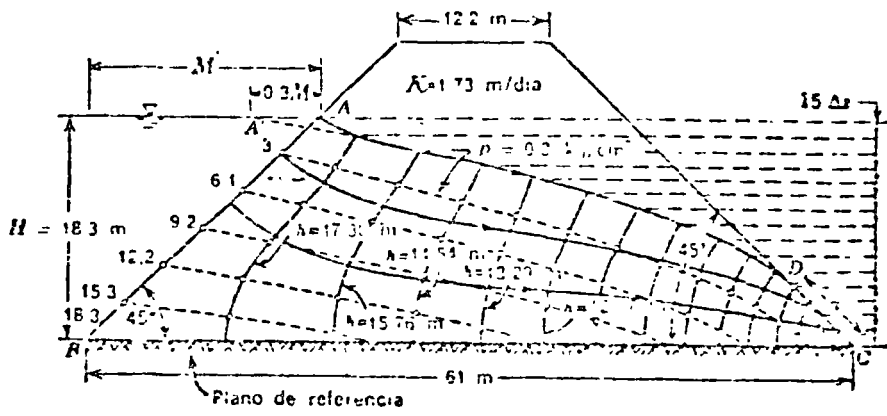
$$h_1 = \frac{w}{T} \left[ al - \frac{l^2}{2} - \frac{x^2}{2} \right]$$

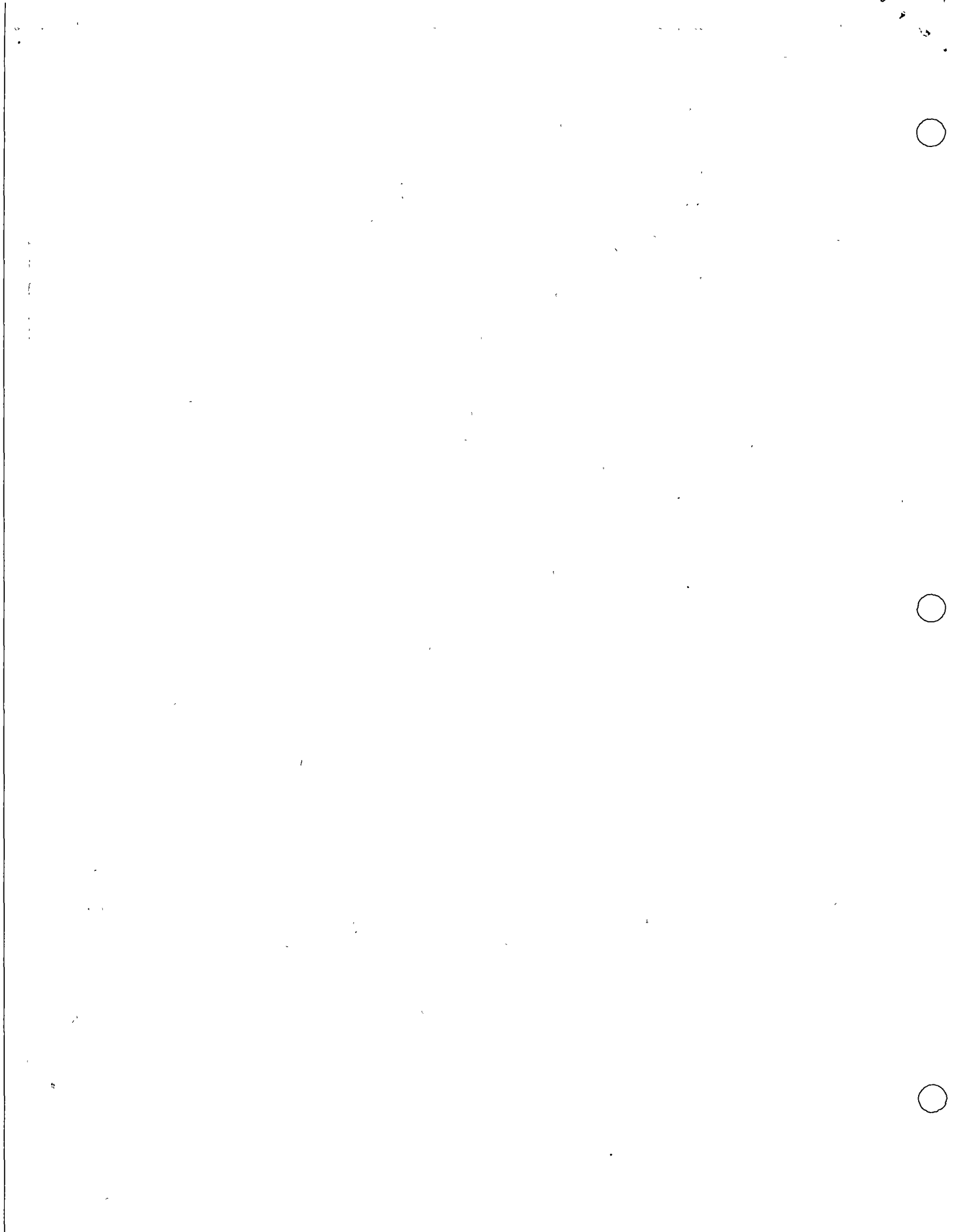
$$h_1 = \frac{w}{T} \left[ al - \frac{l^2 + x^2}{2} \right]$$









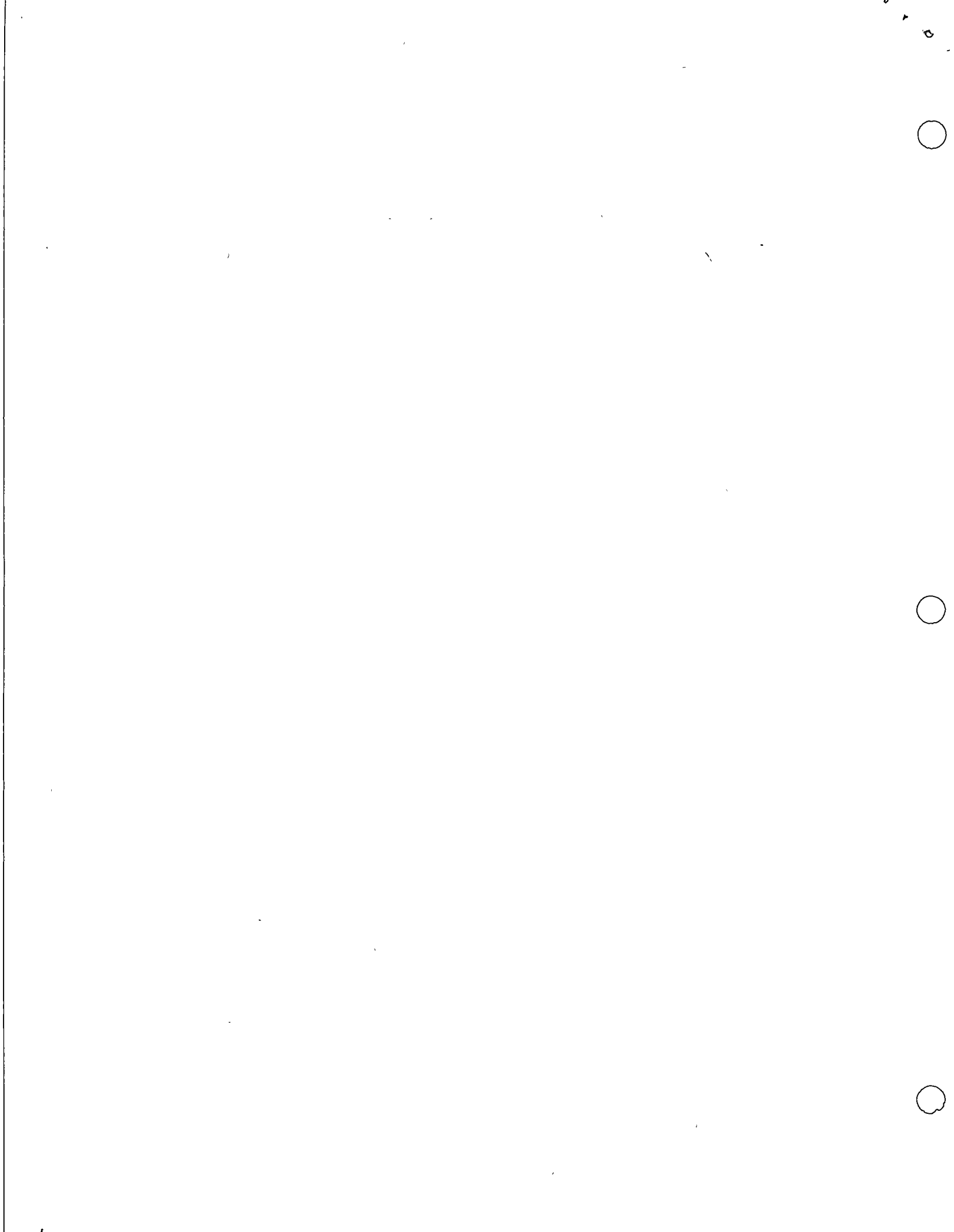


HIDROLOGIA SUBTERRANEA

HIDRAULICA DE POZOS

ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN

JULIO DE 1976.





## HIDRAULICA DE POZOS

La Hidráulica de Pozos es una de las materias más importantes de la Hidrología Subterránea, ya que proporciona las bases teóricas para interpretar o prever las fluctuaciones de los niveles freáticos o piezométricos, provocados por la extracción de agua mediante pozos.

### I.- PROBLEMAS COMUNES.

Los problemas que estudia la Hidráulica de Pozos son muy diversos; entre los más comunes se encuentran los siguientes:

- a).- Identificación de sistemas de flujo y de terminación de sus características hidráulicas.

La identificación del sistema de flujo de que se trata (confinado, semiconfinado, con fronteras impermeables o de alimentación, etc.) y la de terminación de sus características hidráulicas (coeficientes de permeabilidad, transmisibilidad, almacenamiento, etc.), son esenciales para estudiar el comportamiento de un acuífero. Tal conocimiento es indispensable, en problemas de carácter local, para prever el comportamiento de los niveles de agua bajo diferentes regímenes de bombeo de uno o varios pozos; en problemas de carácter regional, como por ejemplo la cuantificación del volumen aprovechable de un acuífero, el conocimiento de las características hidráulicas es esencial para calcular los caudales de agua que circulan en el subsuelo y las variaciones del almacenamiento subterráneo, así como para desarrollar modelos de simulación de acuíferos.

- b).- Predicción del comportamiento de los niveles de agua.

Conocidas las características hidráulicas del acuífero, mediante las fórmulas de la Hidráulica de Pozos es posible predecir los abatimientos que se provocarían bajo ciertas condiciones de bombeo. Así, por ejemplo; si se trata del diseño de un pozo, pueden calcularse los abati-

10  
11  
12

13  
14

15  
16

17  
18

19  
20

21  
22



mientos que se van a provocar en el propio pozo por la extracción del caudal requerido; así mismo, es posible conocer de antemano los abatimientos que se van a provocar en captaciones cercanas a la considerada, o en qué medida se van a provocar en captaciones cercanas a la considerada, o en qué medida se van a interferir varios pozos entre sí.

c).- Diseño de campos de pozos.

El problema consiste en definir el número, distribución (espaciamiento y arreglo) y régimen de operación (caudal y tiempo de bombeo) convenientes, de los pozos necesarios para la extracción de un caudal total.

d).- Definición del régimen de operación de pozos, dada una restricción en el abatimiento de los niveles.

Específicamente, en un acuífero costero el problema puede ser la definición de un régimen de bombeo de uno o varios pozos, tal que los niveles freáticos o piezométricos no descieran abajo de un nivel crítico, impuesto por el riesgo de contaminación salina.

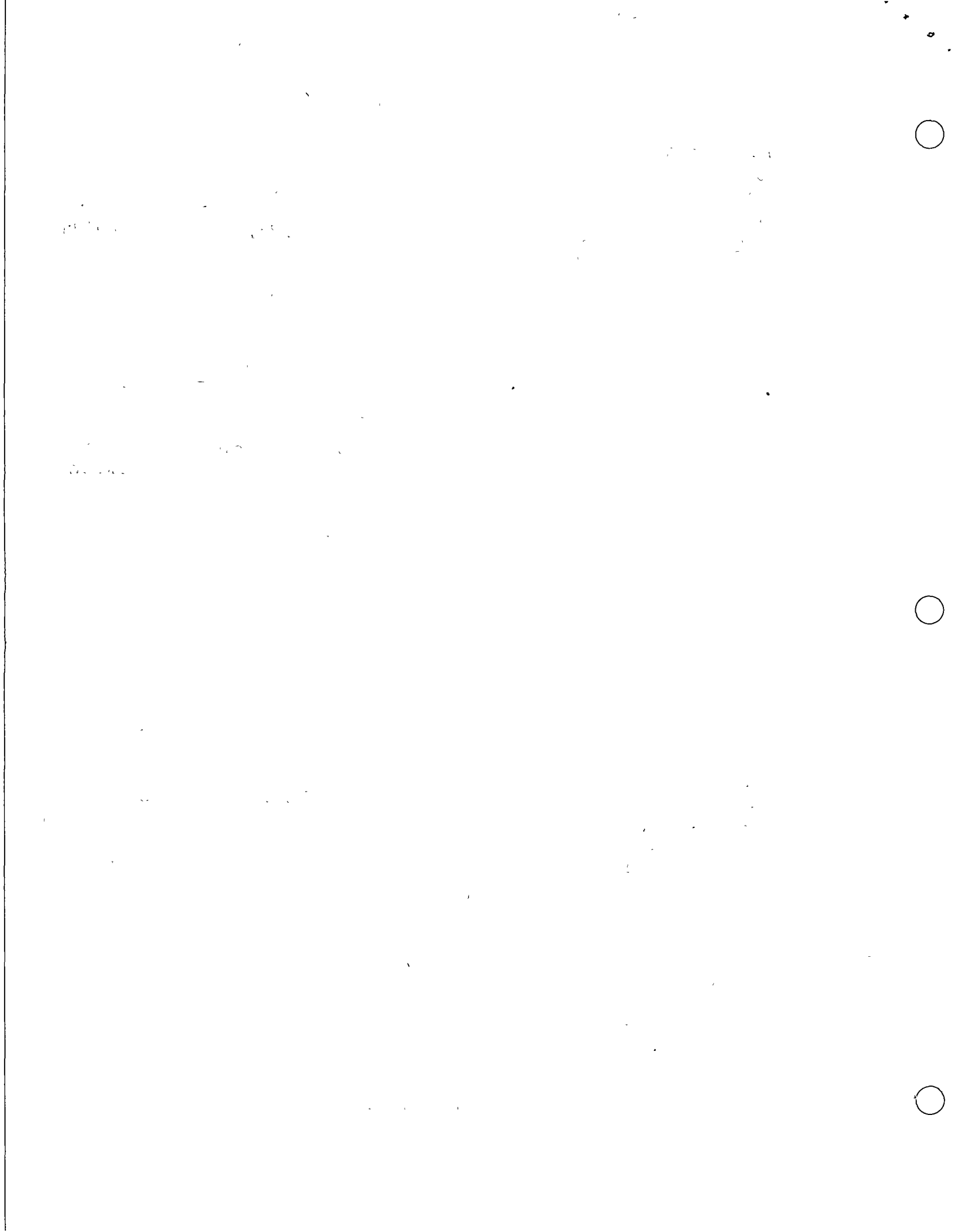
e).- Drenaje vertical.

En terrenos agrícolas los niveles freáticos someros constituyen un problema por afectar los sistemas radiculares de los cultivos o propiciar la salinización del suelo; en áreas urbanas, dicha condición obstaculiza la construcción de cimentaciones. En ocasiones, la geología subterránea es tal que los drenes verticales (pozos) resultan más eficientes que los horizontales. En ese caso, la Hidráulica de Pozos aporta las herramientas teóricas para diseñar el sistema de drenaje.

f).- Recarga artificial.

Uno de los métodos utilizados para recargar un acuífero consiste en la inyección de agua a través de pozos. Conocidas las características del sistema acuífero, puede deducirse la capacidad de absorción de uno o varios pozos y predecirse la respuesta de los niveles a la recarga.

II.- PRUEBAS DE BOMBEO.



## 2.1.- GENERALIDADES.

El conocimiento de las características físicas e hidráulicas del sistema acuífero es básico para el estudio de los problemas señalados.

Generalmente, un buen corte geológico derivado de la clasificación de las muestras de los materiales atravesados durante la perforación, proporciona una idea del tipo de sistema de que se trata. De la correlación de la litología de los materiales con los rangos de permeabilidad correspondientes, puede deducirse la transmisibilidad del acuífero; lógicamente, el valor así obtenido es sólo aproximado, ya que durante la perforación y el muestreo se alteran las condiciones que tiene el material in situ, especialmente por lo que se refiere al acomodo y grado de compactación, factores que tienen gran influencia en la permeabilidad.

## 2.2.- OBJETIVOS DE LA PRUEBA.

Sin embargo, la transmisibilidad deducida en esta forma es prácticamente puntual, y la respuesta de los niveles al bombeo depende más bien de la transmisibilidad media de la porción de acuífero afectada por el mismo. Por otra parte, dicha respuesta no sólo es función de la transmisibilidad, sino también de otras propiedades hidráulicas y de las condiciones de frontera particulares del sistema de que se trata. Es necesario, pues, efectuar una prueba que dé una idea del tipo de sistema, y proporcione valores de las características hidráulicas del acuífero en el área de influencia del bombeo. Tales son los objetivos de la llamada "prueba de bombeo".

La prueba consiste en observar los efectos provocados en la superficie freática o piezométrica de un acuifero por la extracción de un caudal conocido. Los efectos (abatimientos) son registrados en el pozo de bombeo y en pozos próximos a él.

## 2.3.- SELECCION DEL SITIO DE PRUEBA.

En ocasiones, el sitio de la prueba está obligado; por ejemplo, cuando se trata de un problema de carácter local o interesa conocer las características hidráulicas del acuífero en un sitio específico.



1000

1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000

1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000

1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000

1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000  
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000

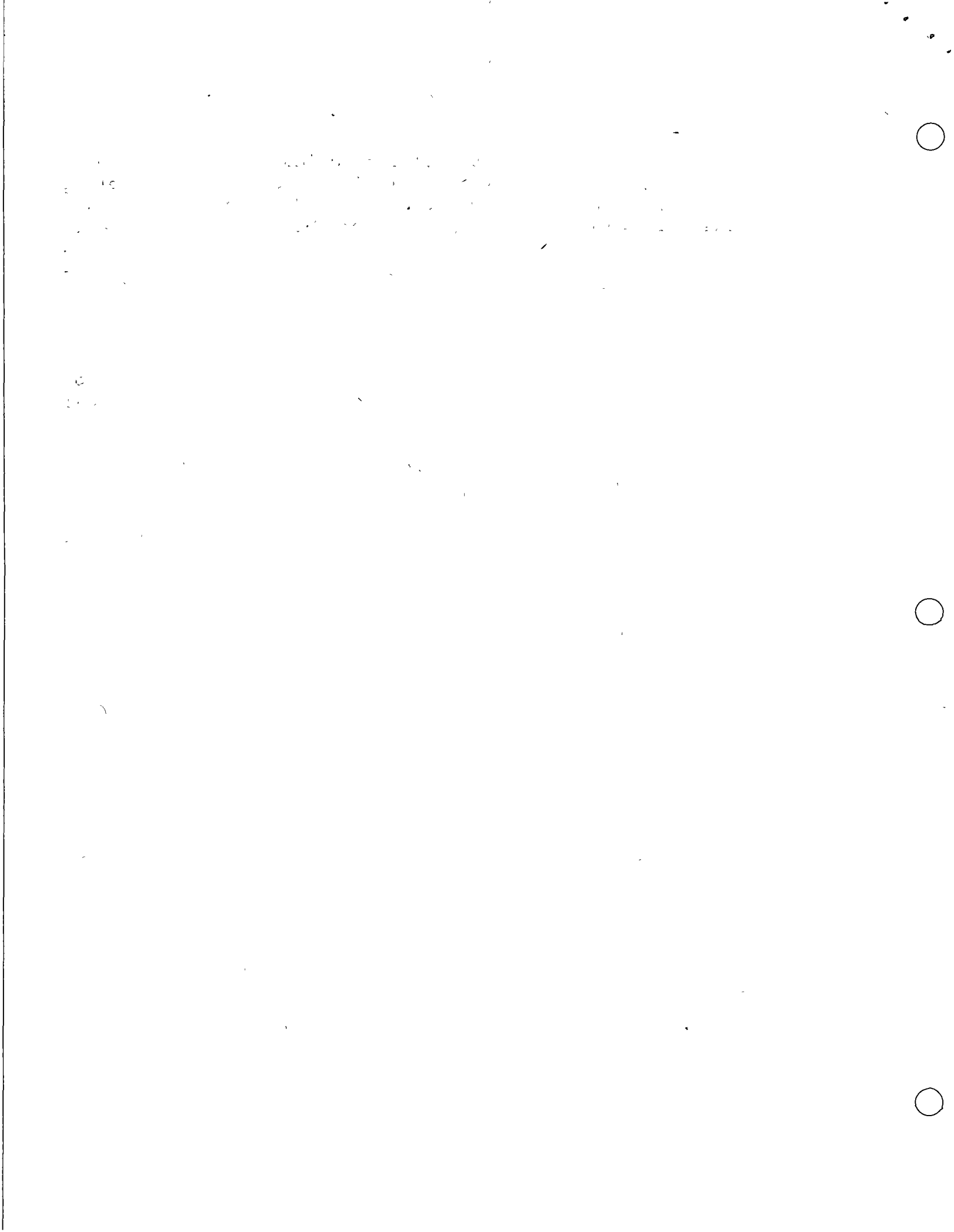
En estudios geohidrológicos de carácter regional, generalmente hay cierta flexibilidad para elegir el sitio de prueba. Habiendo disponibilidad presupuestal para construir pozos con este fin, la prueba puede llevarse a cabo en el sitio que más convenga; aunque lo más frecuente es que tengan que utilizarse pozos ya existentes. Si en el área de interés hay varios pozos utilizables para el propósito de que se trata, en la elección del más adecuado deben considerarse los aspectos siguientes:

- que el equipo de bombeo se encuentre en condiciones apropiadas para sostener un caudal constante durante la prueba.
- que la profundidad al nivel del agua sea fácilmente medible.
- que el caudal de extracción pueda ser fácilmente aforado.
- que el agua bombeada no se infiltre hasta el acuífero en las proximidades del pozo.
- que las características constructivas y el corte geológico del pozo sean conocidos, y
- que los pozos próximos no operen durante la prueba.

Puesto que no es fácil que se cumplan simultáneamente todos estos requisitos, en cada caso deberá juzgarse con cierto criterio, si el incumplimiento de uno o varios de ellos obstaculiza significativamente o no, el buen desarrollo y la interpretación de la prueba.

#### 2.4.- POZOS DE OBSERVACION.

Para la interpretación completa de una prueba, lo ideal es contar con uno o varios pozos de observación -- dispuestos a diferentes distancias del pozo de bombeo. Cuando esto es posible las características deducidas son más -- confiables y representativas de un área mayor. Por ello, -- es muy recomendable disponer al menos de un pozo de observación.





### Ubicación de los Pozos de Observación.

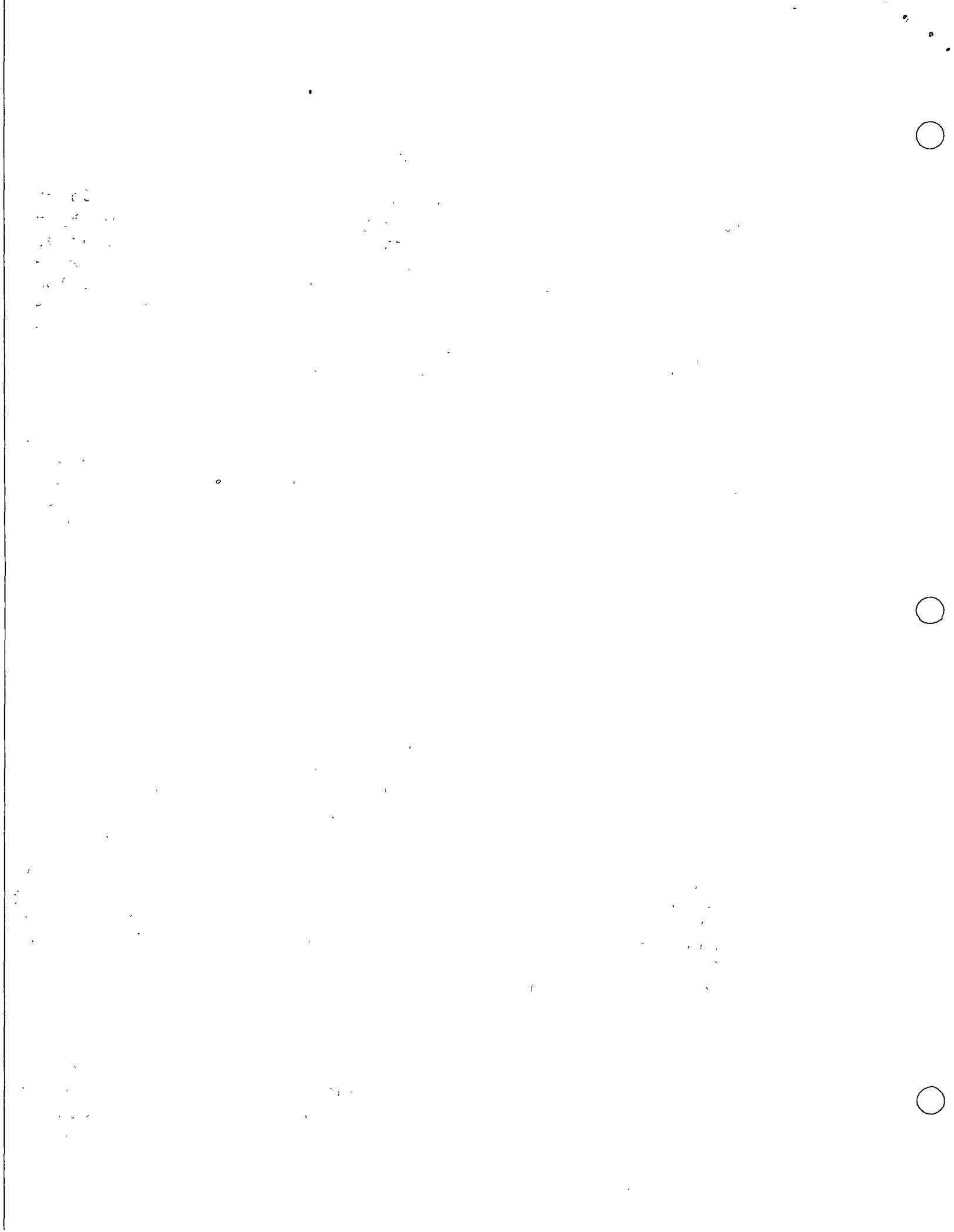
De gran importancia es la adecuada ubicación de los pozos de observación con respecto al de bombeo. No hay una regla fija que indique la distancia a que deben situarse, ya que ésta depende de las condiciones locales particulares de cada caso. En términos generales, el emplazamiento de los pozos de observación a distancias entre 30 y 100 m del pozo de bombeo, es adecuado en la mayoría de los casos; aunque para una ubicación más cuidadosa deben contemplarse los aspectos siguientes: el tipo y la transmisibilidad del acuífero, el caudal de descarga, la ubicación y longitud del cedazo del pozo de bombeo.

En acuíferos confinados la propagación de los efectos del bombeo es muy rápida y, por tanto, los abatimientos pueden ser medibles a distancias hasta de varios cientos de metros, incluso para tiempos cortos de bombeo. Por esta razón, en este tipo de acuíferos los pozos de observación pueden situarse bastante alejados del pozo de prueba. En cambio, en los acuíferos freáticos la propagación de los abatimientos es mucho más lenta; por consiguiente, los pozos de observación deben situarse más próximos al de bombeo, a fin de que los abatimientos sean medibles sin prolongar demasiado la prueba.

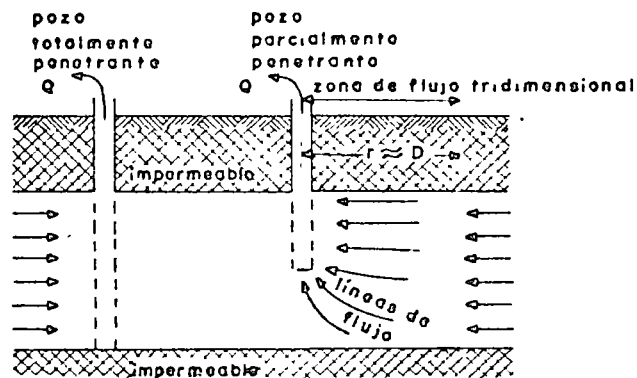
Mientras mayor es la transmisibilidad de un acuífero más extenso es el cono de abatimientos. Entonces, en un acuífero de alta transmisibilidad los pozos de observación pueden situarse más alejados del pozo de bombeo, que en un acuífero de transmisibilidad baja.

La magnitud de los abatimientos es directamente proporcional al caudal bombeado. Si éste es pequeño, los abatimientos provocados en pozos de observación relativamente alejados pueden no ser medibles, aun cuando la influencia del bombeo ya se haya extendido hasta ellos. Por tanto, mientras más bajo sea el caudal extraído, más próximos deben situarse los pozos de observación.

Cuando el cedazo del pozo de bombeo capta la mayor parte del espesor del acuífero, el flujo es predominantemente lateral. En este caso, los pozos de observación registran el mismo abatimiento independientemente de la posición y de la ubicación de su cedazo. Por el contrario, si el cedazo



del pozo bombeado capta sólo una parte del espesor del acuífero, la distribución vertical de los abatimientos no es uniforme, debido a que el flujo es tridimensional en las proximidades del pozo; como consecuencia, los abatimientos registrados en un pozo de observación dependen de la ubicación y longitud de su cedazo, y la interpretación de la prueba resulta bastante más complicada. Por esta razón, en tal caso es preferible emplazar los pozos de observación a distancias mayores de 1.5 veces el espesor del acuífero, para las cuales el flujo es prácticamente horizontal.



#### Profundidad de los Pozos de Observación.-

Tan importante como su ubicación con respecto al pozo de bombeo, es la adecuada profundidad de los pozos de observación. Naturalmente, debe cuidarse que estos capten el mismo acuífero que está siendo bombeado. Cuando el pozo de bombeo capta la mayor parte del espesor del acuífero, y éste es más o menos homogéneo, no es necesario que los pozos de observación penetren totalmente al acuífero, siendo suficiente un cedazo de longitud reducida, de preferencia ubicado a la profundidad en que se encuentra la parte media del cedazo del pozo de bombeo.

Sin embargo, si el acuífero tiene intercalaciones de materiales arcillosos, es conveniente que el cedazo de los pozos de observación sea de mayor longitud o, todavía mejor, que se construyan pozos de observación que capten cada estrato permeable, con el propósito de definir la intercon-

1. The first part of the document  
 2. describes the general situation  
 3. and the objectives of the study.  
 4. The second part of the document  
 5. describes the methodology used  
 6. in the study. The third part of  
 7. the document describes the results  
 8. of the study. The fourth part of  
 9. the document describes the  
 10. conclusions of the study.



xión entre ellos. Así mismo, cuando se trata de acuíferos se miconfinados, es conveniente instalar también pozos de observación en el estrato semiconfinante, con el objeto de registrar los abatimientos provocados en él, lo que permite un conocimiento más preciso de su permeabilidad vertical.

#### Limitaciones.-

Obviamente, el empleo de pozos de observación - enfrenta una gran dificultad: su construcción en la mayoría de los casos no es viable por limitaciones económicas. Por otra parte, aun cuando dichas limitaciones no sean muy serias, es frecuente que no se aprecie lo suficiente la utilidad de una prueba confiable, y que la construcción de los pozos "testigo" se considere un gasto inútil.

Al respecto, cabe aclarar que el costo de tales pozos no es muy significativo, ya que su diámetro puede ser muy reducido y, por lo general, no se requiere que penetren totalmente al acuífero; por el otro lado, el mejor conocimiento del tipo de sistema y de sus características hidráulicas, que se logra cuando se dispone de ellos, es invaluable en el estudio de diversos problemas de agua subterránea.

Cuando no se dispone de medios económicos para construirlos, pero se tiene cierta libertad para elegir el em plazamiento del pozo de bombeo, éste puede ubicarse en las proximidades de pozos existentes para utilizarlos en la prueba, siempre y cuando las características de ellos sean adecuadas para tal fin. Lo más común, sin embargo, es que no se disponga de pozos de observación, y que la prueba se limite a observar los abatimientos en el pozo de bombeo. Debido a que en su interior y en su vecindad inmediata se presentan efectos locales complejos, difíciles de tomar en cuenta en las soluciones teóricas (concentraciones de flujo; influencia del fil tro de grava; pérdidas por entrada, fluctuaciones, cambios de dirección; turbulencias . . .), la interpretación de las pruebas en este caso es aún muy dudosa y, por lo mismo, los resultados de ella deben tomarse con ciertas reservas.

#### 2.5.- DURACION DE LA PRUEBA.

La duración recomendable de una prueba de bombeo depende de las características del sistema acuífero estudiado y de la precisión con que se desea conocer sus características hidráulicas; desde luego, en la práctica está sujeta a la

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or title.

Second block of faint, illegible text, appearing as several lines of a list or document.

Third block of faint, illegible text, continuing the list or document.

Fourth block of faint, illegible text, appearing as a paragraph or section.

Fifth block of faint, illegible text, continuing the list or document.

Sixth block of faint, illegible text at the bottom of the page.

disponibilidad de los pozos (cuando se utilizan pozos particulares) y a limitaciones económicas. Una prueba de larga duración tiene varias ventajas: las características deducidas de su interpretación son representativas de una área mayor, ya que los efectos del bombeo se propagan a mayor distancia; en ocasiones, revela la presencia de fronteras laterales; en algunos casos, se alcanza la estabilización del cono de abatimiento, facilitando la interpretación de la prueba.

La duración recomendable varía entre varias - - horas y varios días, siendo conveniente prolongarla tanto como sea posible, sobre todo cuando se cuenta con pozos de observación; en caso contrario, no se justifica realizar pruebas largas y, en general, son suficientes unas cuantas horas de bombeo. En todo caso, el graficado, en el sitio de prueba, del comportamiento de los niveles del agua proporciona elementos de juicio para continuar o suspender la prueba, como se indica más adelante.

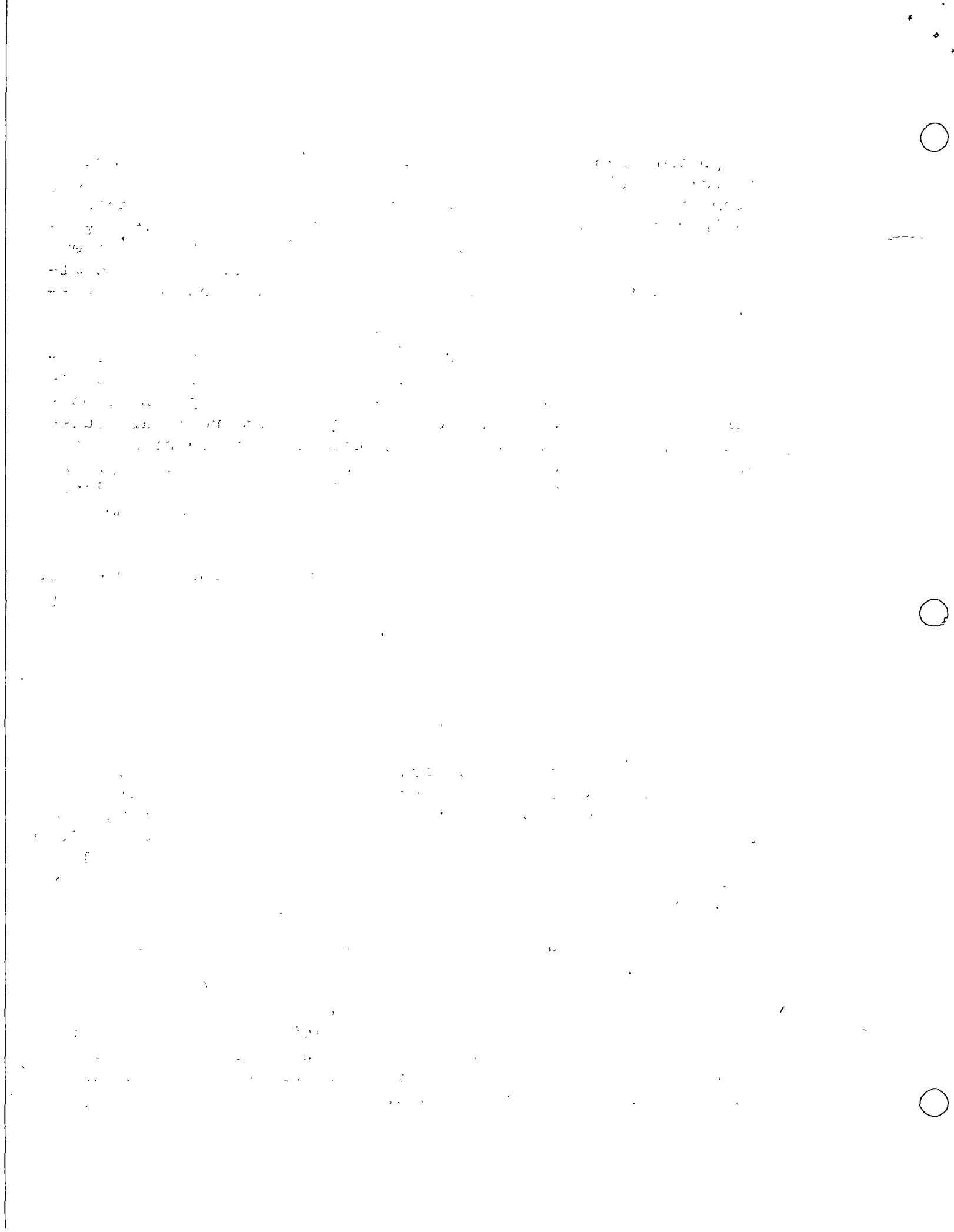
Para verificar los resultados deducidos mediante la llamada "etapa de bombeo" ó "etapa de abatimiento", se lleva a cabo la llamada "etapa de recuperación", que consiste en observar el comportamiento de los niveles al suspender el bombeo durante un cierto tiempo; la duración de esta etapa es, generalmente, semejante a la de la etapa anterior.

## 2.6.- EJECUCION DE LA PRUEBA.

Antes de iniciar la prueba, se revisará el equipo a utilizar (cronómetros, sondas, cintas métricas, escuadra para aforo, etc.), para verificar su correcto funcionamiento. El cable de las sondas deberá ser previamente calibrado. Cuando se cuente con varias sondas, se procurará, en lo posible, que todas las observaciones en un pozo se efectúen con la misma sonda.

Seguidamente, se llevarán a cabo las actividades siguientes:

a).- Inmediatamente antes de iniciar el bombeo, se medirá la profundidad al nivel estático en el pozo de bombeo y en el (o los) de observación. Se anotará la hora de iniciación de la prueba y las lecturas iniciales con el nombre de los pozos a que corresponden.





b).- Se iniciará el bombeo, procurando mantener un caudal constante, y se procederá a medir la profundidad al nivel del agua en el pozo de bombeo y en el (o los) de observación, con la secuela de tiempos que se indica a continuación:

LECTURA	TIEMPO A PARTIR DE LA INICIACION DEL BOMBEO
1	Inmediatamente antes de iniciar el bombeo.
2	15 Segundos
3	30 Segundos
4	1 Minuto
5	2 Minutos
6	4 Minutos
7	8 Minutos
8	15 Minutos
9	30 Minutos
10	1 Hora
11	2 Horas
12	4 Horas
13	8 Horas
14	16 Horas
15	24 Horas
16	32 Horas
17	40 Horas
18	48 Horas

c).- A intervalos de tiempo seleccionados, se harán las observaciones o lecturas necesarias para cuantificar el caudal de bombeo.

d).- Con las observaciones realizadas, se -- construirá, en el sitio de prueba, la gráfica de variación del nivel dinámico en el tiempo, para el pozo de bombeo y -- para cada uno de los pozos de observación. En la grafica-- ción podrá utilizarse papel con trazado aritmético o semilogarítmico ( los tiempos se llevarán en la escala logarítmica ). Estas gráficas son útiles para juzgar el correcto desarrollo de la prueba: permiten detectar errores de medición, variaciones sensibles de caudal y otras anomalías causadas por factores externos, y constituyen un elemento de -- juicio para continuar o suspender una prueba.

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

10/20/57

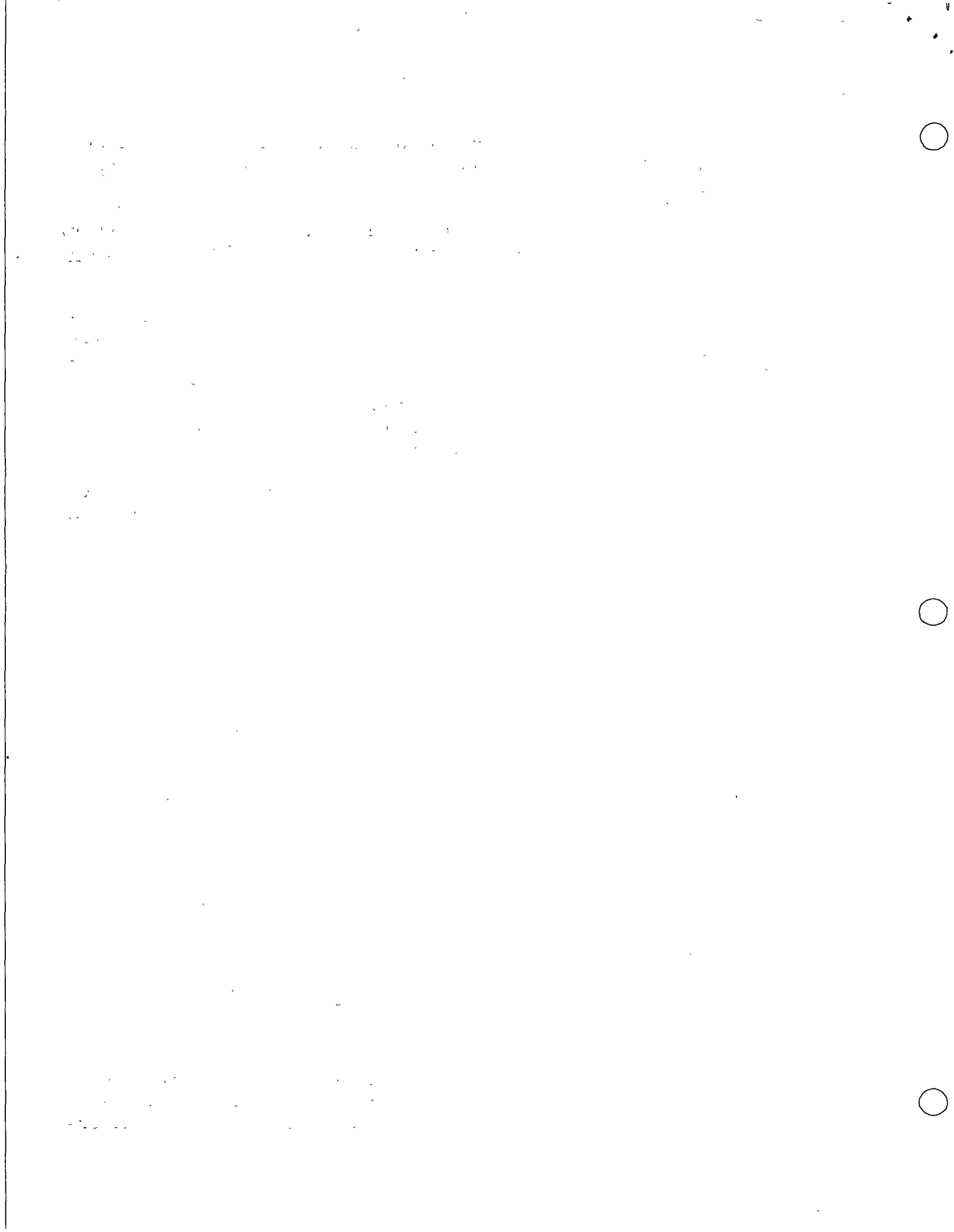
e).- La duración de la etapa de bombeo, fijada inicialmente como se indicó en (2.5) podrá modificarse con el criterio siguiente:

- Si el caudal de bombeo varía apreciablemente, en forma continua e incontrolable, se suspenderá la prueba.
- Cuando en la gráfica nivel dinámico-tiempo, del pozo bombeado (en trazado semilogarítmico o aritmético) se observe una estabilización del nivel dinámico por un tiempo mínimo de 4 hs, podrá suspenderse la etapa de bombeo antes de alcanzar la duración prefijada, (ver gráfica anexa).

f).- Una vez concluída la etapa de bombeo, se iniciará la de recuperación, en la que se efectuarán observaciones en los tiempos indicados a continuación:

LECTURA	TIEMPO A PARTIR DE LA SUSPENSION DEL BOMBEO
1	Inmediatamente antes de suspender el bombeo.
2	15 Segundos
3	30 Segundos
4	1 Minuto
5	2 Minutos
6	4 Minutos
7	8 Minutos
8	15 Minutos
9	30 Minutos
10	1 Hora
11	2 Horas
12	4 Horas
13	8 Horas
14	16 Horas
15	24 Horas
16	32 Horas
17	40 Horas
18	48 Horas

g).- Los tiempos indicados en los incisos b) y f) son una guía de la frecuencia con la que deben realizarse las observaciones. Si, por cualquier causa, no puede hacer-



se contacto con el nivel dinámico en el tiempo señalado, se hará la medición y se indicará el tiempo real a que corresponde.

### 2.7.- COMENTARIOS GENERALES.

De todo lo expuesto se desprende que una prueba de bombeo requiere una cuidadosa programación e implica un cierto gasto más o menos significativo. Desde luego, la duración del bombeo y el número de pozos de observación recomendables en cada caso particular, depende del tipo de problema de que se trate. En muchos casos no se justifica una prueba larga, ni la construcción de pozos "testigo"; por ejemplo, cuando se trata de problemas de carácter muy local. En cambio, cuando se trata de problemas más complejos o de carácter regional, como el cálculo de la disponibilidad de agua subterránea de una zona, o el diseño de un campo de pozos o de un sistema de drenaje agrícola, se justifica plenamente el gasto que implica la ejecución de una prueba completa, ya que un conocimiento insuficiente o equivocado de las características del sistema, se puede traducir en graves perjuicios económicos.

### III.- ANALISIS DE LAS PRUEBAS.

La interpretación de las pruebas de bombeo en acuíferos granulares, se basa en soluciones teóricas deducidas resolviendo la ecuación diferencial de flujo, para las condiciones de frontera representativas de diversos sistemas. Dichas soluciones expresan matemáticamente el comportamiento de los niveles piezométricos en el área estudiada por el bombeo.

Al realizar una prueba, la gráfica de las observaciones sugiere el tipo de sistema de que se trata. Mediante consideraciones geológicas, hidrológicas y topográficas, basadas en la información complementaria disponible (cortes geológicos, registros eléctricos, geología superficial, presencia de canales o ríos, pendiente topográfica, etc.), se confirma, modifica o descarta la suposición hecha inicialmente. Una vez identificado el sistema, a partir de las ecuaciones correspondientes pueden deducirse las características hidráulicas buscadas.

Naturalmente, para que el problema sea atacable analíticamente, es necesario simplificar los sistemas conside

1948

1949

1950

1951

1952

1953

1954

1955

1956

1957

1958

1959

1960

1961

1962

1963

1964

1965

1966

1967

1968

1969

1970

1971

1972

1973

1974

1975

1976

1977

1978

1979

1980

1981

1982

1983

1984

1985

1986

1987

1988

1989

1990

1991

1992

1993

1994

1995

1996

1997

1998

1999

2000

2001

2002

2003

2004

2005

2006

2007

2008

2009

2010

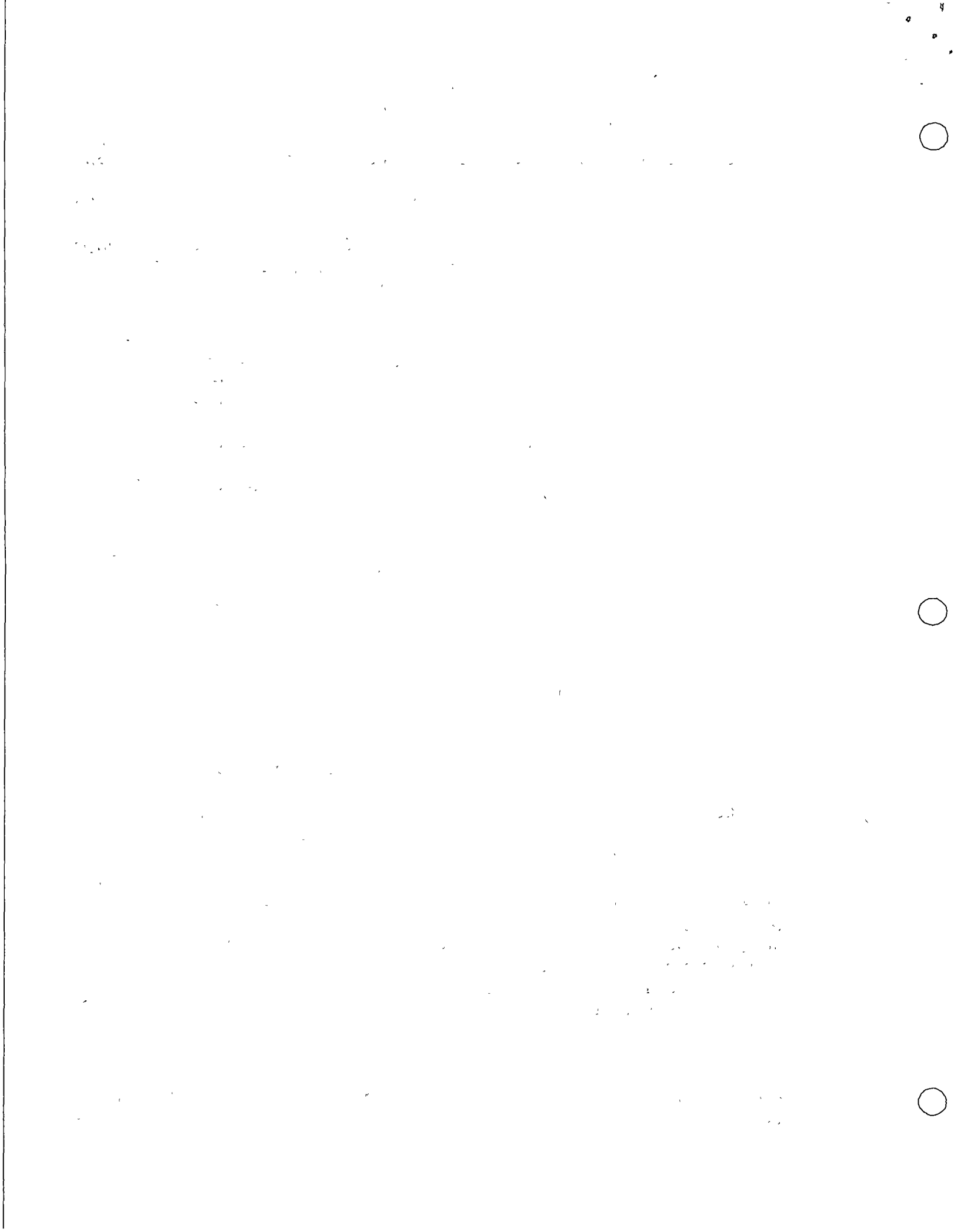
rados, introduciendo algunas hipótesis. Las más comunes son:

- el acuífero tiene extensión lateral infinita.
- el acuífero es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme en el área afectada por el bombeo.
- la superficie piezométrica o la superficie freática, según el caso, es aproximadamente horizontal en el área de influencia del bombeo, antes de iniciarse la prueba.
- el caudal de descarga es constante.
- el pozo capta totalmente el espesor del acuífero.

Aparentemente, estas hipótesis limitan seriamente la aplicabilidad de las soluciones a casos reales; sin embargo, no deben considerarse en forma rigurosa sino con un enfoque práctico. Es claro que las condiciones naturales siempre diferirán en cierta medida de las condiciones teóricas; pero en muchos casos tales desviaciones no son significativas desde el punto de vista práctico.

Conviene aclarar, sobre todo, que las hipótesis señaladas deben cumplirse, exclusivamente, en el área afectada por el bombeo, la cual no es de extensión muy considerable. Este hecho hace a las hipótesis más "razonables". En efecto, las características hidráulicas y el espesor medio de un acuífero, generalmente no presentan variaciones importantes en el área comprendida por el cono de abatimientos; en condiciones naturales la superficie freática o la superficie piezométrica tienen gradientes muy pequeños, por lo que pueden suponerse prácticamente horizontales; en cuanto a la homogeneidad, la presencia de intercalaciones de materiales de litología y permeabilidad diferentes a las del acuífero, sólo afectan localmente la distribución de abatimientos, pero no influyen significativamente en el comportamiento de conjunto del acuífero.

Obviamente, cuando las condiciones reales se apartan notablemente de las establecidas en las hipótesis, las soluciones basadas en éstas dejan de ser aplicables, y es ne-





cesario utilizar otras soluciones cuyas hipótesis se ajusten razonablemente a la situación real.

### 3.1.- MECANISMO DEL FLUJO HACIA UN POZO.

Cuando un pozo es bombeado, la superficie freática (o piezométrica) del acuífero es abatida en sus alrededores. El abatimiento provocado es máximo en el pozo de bombeo y decrece conforme aumenta la distancia al pozo, hasta ser - prácticamente nulo. Como el abatimiento a cierta distancia - del pozo es el mismo en todas direcciones, el área de influencia del bombeo es un círculo (si el acuífero es relativamente homogéneo e isótropo) cuyo radio depende de las características hidráulicas y del tiempo de bombeo, entre otros factores.

Dado que la presión mínima se tiene en el pozo de bombeo, el agua fluye hacia él desde todas direcciones. Si el flujo es horizontal, conforme el agua se acerca al pozo, - se mueve a través de superficies cilíndricas de área cada vez menor; como consecuencia, la velocidad del agua va incrementando conforme ésta se acerca al pozo. Puesto que la velocidad es proporcional al gradiente hidráulico, de acuerdo con la -- ley de Darcy, la pendiente de la superficie piezométrica incrementa gradualmente hacia el pozo, lo que da a dicha superficie una forma aproximadamente cónica. Por ello, a la depresión piezométrica provocada por el bombeo, se le acostumbra - llamar "cono de depresión".

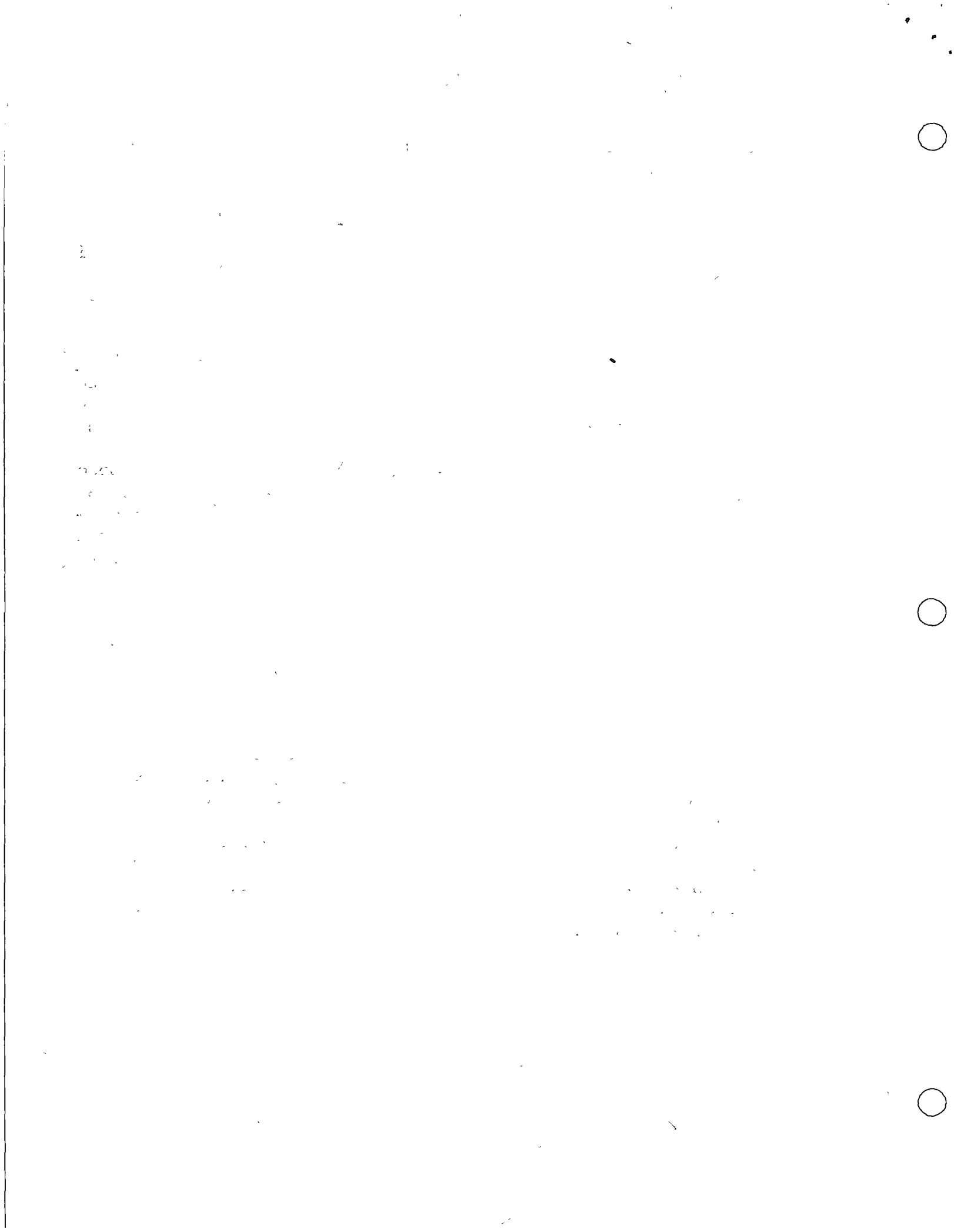
El agua bombeada por el pozo es tomada del almacenamiento del acuífero. Si no hay recarga vertical en el área afectada por el bombeo, la depresión piezométrica se va expandiendo afectando un área cada vez mayor. Al crecer el - área afectada, los abatimientos necesarios para mantener la extracción del pozo son cada vez menores, alcanzándose un momento en el que la superficie piezométrica se estabiliza en las proximidades del pozo. En estas condiciones se dice que el flujo está establecido.

### 3.2.- POZOS EN ACUIFEROS CONFINADOS.

Pruebas en régimen de flujo establecido.-

Puede demostrarse que la solución de la ecuación diferencial

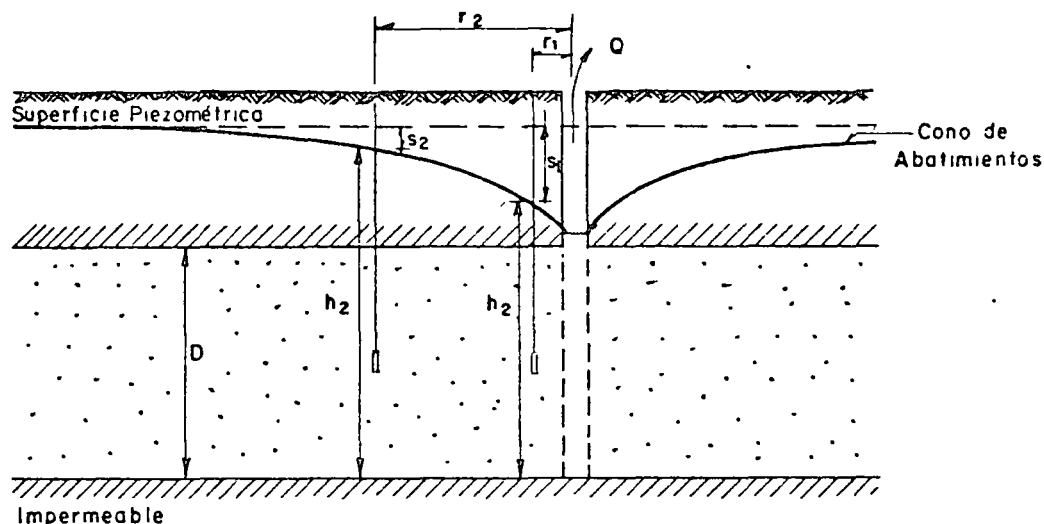
$$\frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} = 0 \quad (1)$$



sujeta a las condiciones de frontera correspondientes al sistema ilustrado en la figura, es:

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi Kb} L \frac{r_1}{r_2} \quad (2)$$

en la que:  $h_1$  y  $h_2$  son las elevaciones del nivel del agua a las distancias  $r_1$  y  $r_2$  del pozo de bombeo, respectivamente;  $Q$ , el caudal bombeado;  $K$ , la permeabilidad del acuífero, y  $b$ , su espesor saturado. Esta solución se basa en la hipótesis de que el flujo hacia el pozo se encuentra establecido, y en todas las -- antes señaladas.

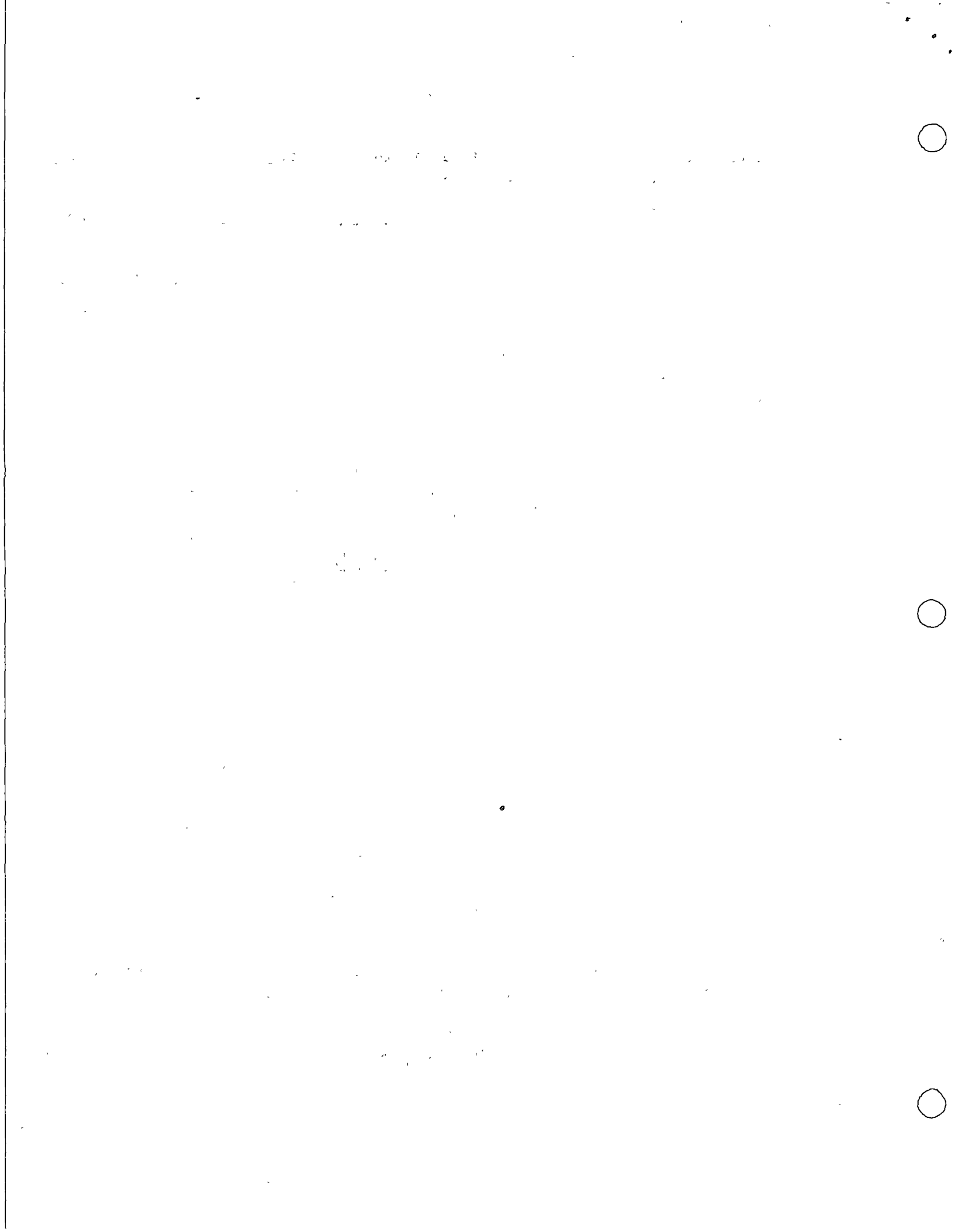


La expresión anterior, llamada "Fórmula de Thiem", permite calcular la permeabilidad cuando se conoce la posición del nivel del agua en dos pozos de observación:

$$K = \frac{Q}{2\pi b (a_2 - a_1)} L \frac{r_1}{r_2} \quad (3)$$

Cuando sólo se dispone de un pozo de observación, la permeabilidad se deduce mediante la ecuación:

$$K = \frac{Q}{2\pi b (a_p - a_1)} L \frac{r_1}{r_p} \quad (4)$$



en la que  $r_p$  es el radio del pozo de bombeo, y  $a_p$  es el abatimiento registrado en el mismo. Esta expresión debe utilizarse con reservas, porque el abatimiento medido en el pozo está influenciado por las pérdidas locales en el pozo de bombeo.

Aun cuando las fórmulas anteriores son aplicables a algunos casos prácticos, tienen dos limitaciones principales: no proporcionan información respecto al coeficiente de almacenamiento, ni permiten calcular los abatimientos en función del tiempo.

#### Pruebas de bombeo en régimen transitorio.-

En 1935, C. V. Theis inició el estudio de la hidráulica de pozos en régimen transitorio, al desarrollar la fórmula que lleva su nombre. Mediante ella pueden deducirse los valores de los coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento, a partir de los abatimientos registrados en uno o varios pozos de observación para diferentes tiempos de bombeo, con la ventaja de que no es necesario esperar la estabilización del cono de abatimientos, como en el caso anterior.

La solución desarrollada por Theis, es:

$$a = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (5)$$

donde:  $a$  es el abatimiento registrado a la distancia  $r$  del pozo de bombeo;  $Q$ , es el caudal;  $T$ , la transmisibilidad;  $W(u)$ , la función de pozo, y

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (6)$$

Con base en las expresiones (5) y (6), Theis desarrolló el método gráfico-numérico de solución para determinar los parámetros  $T$  y  $S$ , que a continuación se describe:

- a).- Trazar la curva tipo  $W(u) - 1/u$  en papel con trazado doble logarítmico.
- b).- Construir la gráfica abatimiento-tiempo del pozo de observación en papel idéntico al utilizado en el inciso a).
- c).- Superponer las gráficas manteniendo los ejes paralelos, y buscar la coincidencia de la

24 117  
2-21-11  
E-10-11

curva de campo y curva tipo.

- d).- Seleccionar un punto de ajuste y obtener sus coordenadas en los cuatro ejes.
- e).- Substituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones (5) y (6), despejando los valores de T y S.

En la figura se muestra la curva tipo; la figura ilustra la interpretación de una prueba de bombeo.

En general, debe darse menor peso a los puntos correspondientes a los tiempos más cortos, pues en esta parte de la prueba pueden tenerse las mayores discrepancias entre las condiciones reales y las hipótesis establecidas para obtener la fórmula: hay cierto retraso entre el abatimiento de la superficie piezométrica y la liberación del agua, retraso que puede ser mayor en esta parte de la prueba, en la que los niveles se abaten rápidamente; el caudal puede variar apreciablemente por el incremento brusco de la carga de bombeo, etc. Para tiempos mayores de bombeo, estas discrepancias se van minimizando y se tiene un mejor ajuste entre la teoría y las condiciones reales.

Un método más sencillo para la interpretación de las pruebas, fué desarrollado por Jacob, quien observó -- que para tiempos largos ( $t > 5Sr^2/T$ ), la ecuación (5) puede expresarse:

$$a = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \frac{2.25 Tt}{r^2 S}$$

A partir de esta fórmula, desarrolló el método gráfico de interpretación que lleva su nombre, y que consiste en lo siguiente:

- a).- Construir la gráfica abatimiento (en escala aritmética) contra tiempo (en escala logarítmica).
- b).- Pasar una recta por los puntos que se alinean, y determinar su pendiente. Los puntos correspondientes a los primeros minutos de la prueba se apartan generalmente

1950

1951

1952

1953

1954

1955

1956

1957

1958

1959

1960

1961

1962

1963





de la recta, debido a que corresponden a -  
tiempos cortos ( $t < 5r^2S/T$ ) para los cuales  
no es válida la fórmula de Jacob.

- c).- Si la pendiente de la recta de ajuste es  $b$   
la transmisibilidad puede obtenerse de la  
expresión:

$$T = \frac{0.183 Q}{b}$$

- d).- Determinar el valor de  $t$ ,  $t_0$ , para el cual  
la prolongación de la recta de ajuste in-  
tersecta la línea de abatimiento nulo.

- e).- Calcular el coeficiente de almacenamiento  
mediante la expresión:

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$$

El mismo método puede seguirse cuando se cono-  
cen los abatimientos en varios pozos de observación para un -  
tiempo dado. En este caso se grafica el abatimiento contra la  
distancia (en escala logarítmica). Los coeficientes buscados  
se obtienen mediante las fórmulas:

$$T = \frac{0.366 Q}{b}$$

$$S = \frac{2.25 T t}{r_0^2}$$

en que  $r_0$  es el valor de  $r$  para el cual la prolongación de la  
recta de ajuste interseca la línea de abatimiento nulo.

La forma más general del método se aplica cuando  
se tienen observaciones en varios pozos de observación para di-  
ferentes tiempos. En este caso, se llevan en el eje logarítmico  
los valores de la relación  $t/r^2$ , y se sigue la secuela descrita  
anteriormente.

En la figura se compara la curva tipo de Theis  
con la aproximación de Jacob, en trazado semilogarítmico; en la  
figura se ejemplifica la aplicación del método.

12 11

12 11

12 11

12 11

12 11

12 11

12 11

12 11

12 11

12 11



### Penetración Parcial.-

Cuando un pozo capta sólo una parte del espesor saturado de un acuífero, se le denomina "parcialmente penetrante".

En la porción de acuífero no penetrado por el pozo de bombeo el agua recorre trayectorias de mayor longitud para entrar al cedazo; por consiguiente, las pérdidas de carga en la formación son mayores en este sistema que en el de penetración total. En otras palabras: los abatimientos en un pozo parcialmente penetrante son mayores que los provocados en uno totalmente penetrante, para un mismo caudal de extracción, aumentando el abatimiento conforme disminuye la penetración del pozo.

Para dar una idea aproximada de la disminución de la eficiencia hidráulica del pozo causada por la penetración parcial, considérese que si un pozo capta sólo la mitad del espesor saturado de un acuífero, el abatimiento provocado en él será algo menor que el doble del provocado en un pozo totalmente penetrante, para el mismo caudal de bombeo. Si se considera ahora un mismo abatimiento, el caudal que puede proporcionar un pozo es tanto menor cuanto menor es la penetración de su cedazo.

En las proximidades de estos pozos el flujo es tridimensional; por ello, el abatimiento registrado en el pozo de bombeo y en pozos de observación próximos a él, depende, -- entre otros factores, de la longitud y posición de los cedazos. Esto complica la interpretación de las pruebas de bombeo, ya que los abatimientos son función también de las características constructivas de los pozos. Para simplificar la interpretación es conveniente ubicar los pozos de observación a distancias equivalentes al espesor del acuífero, o mayores, para las cuales el efecto de penetración es mínimo o nulo.

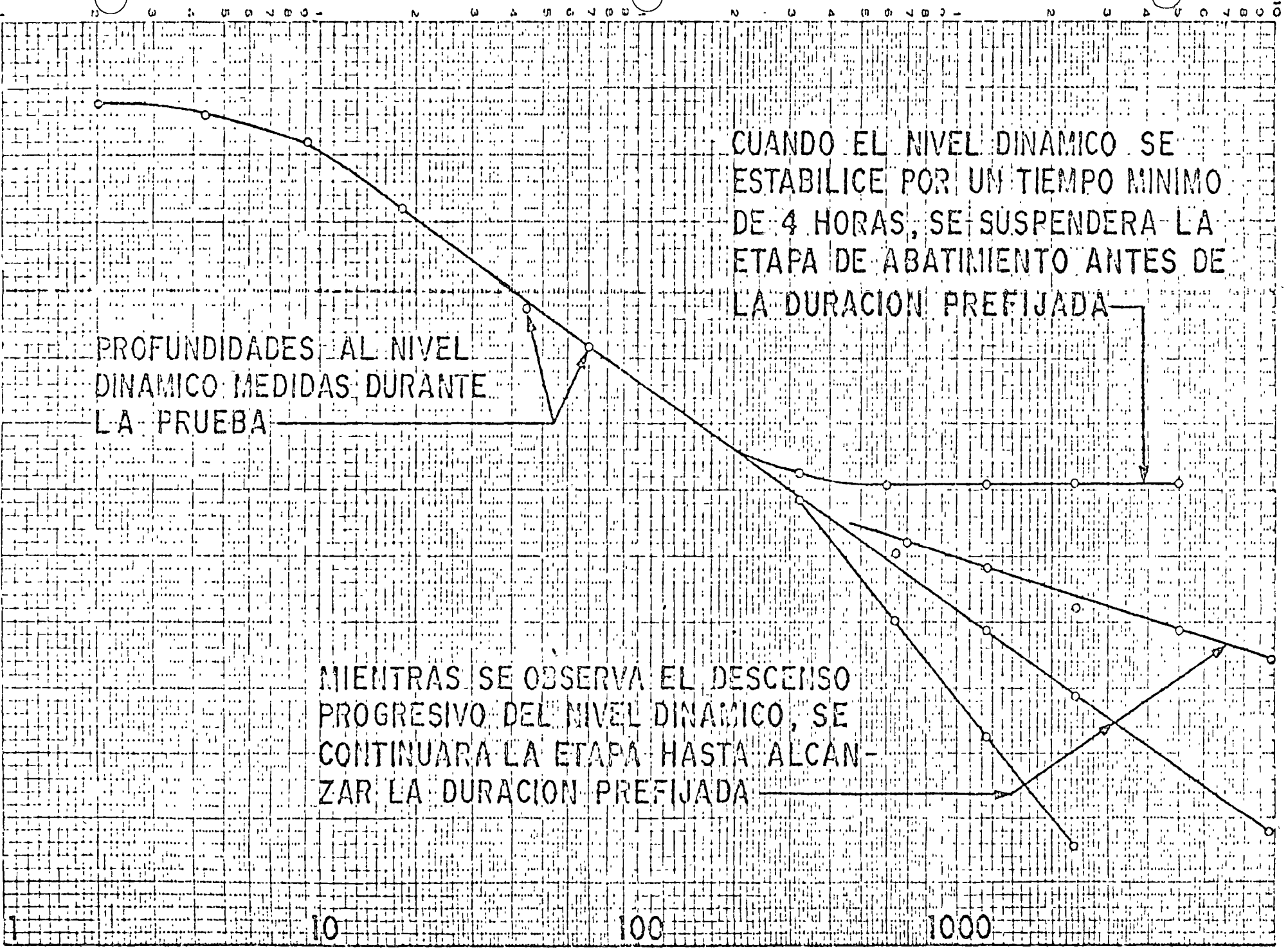
El nivel del agua en un pozo de observación situado a tales distancias se comporta como si el pozo de bombeo fuera totalmente penetrante, y la prueba se interpreta en la forma ya indicada; lo mismo puede hacerse cuando el pozo de observación penetra totalmente al acuífero, independientemente de su ubicación con respecto al pozo de bombeo.

Fuera de estos dos casos, la interpretación es bastante laboriosa, pues hay que construir una curva tipo pa-



# TIEMPO DE BOMPEO, EN MINUTOS

UNIDAD AL NIVEL DINAMICO, EN METROS

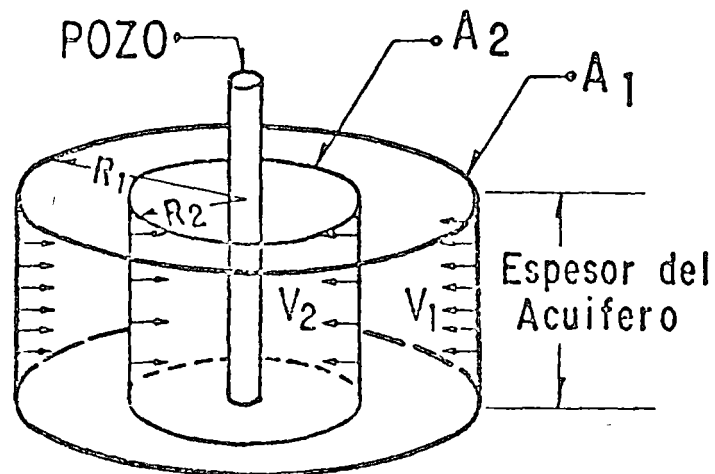
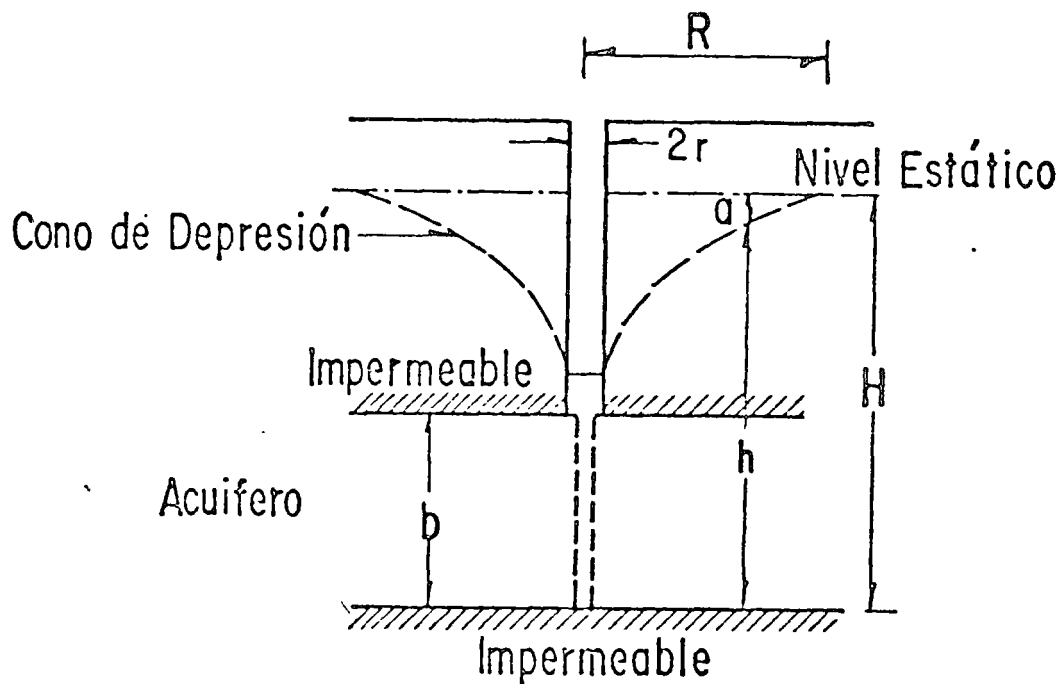




1000

1000

# MECANISMO DEL FLUJO HACIA UN POZO



$$R_1 = 2 R_2 \quad A_1 = 2 A_2$$

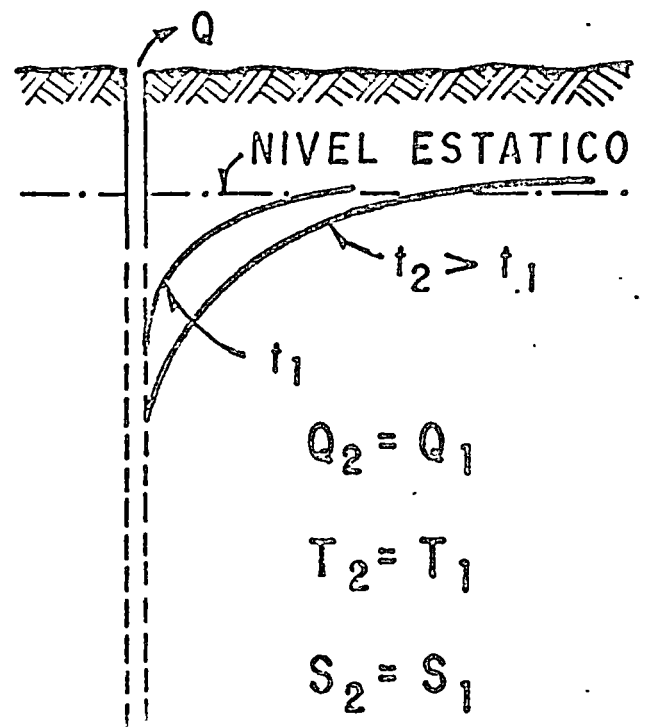
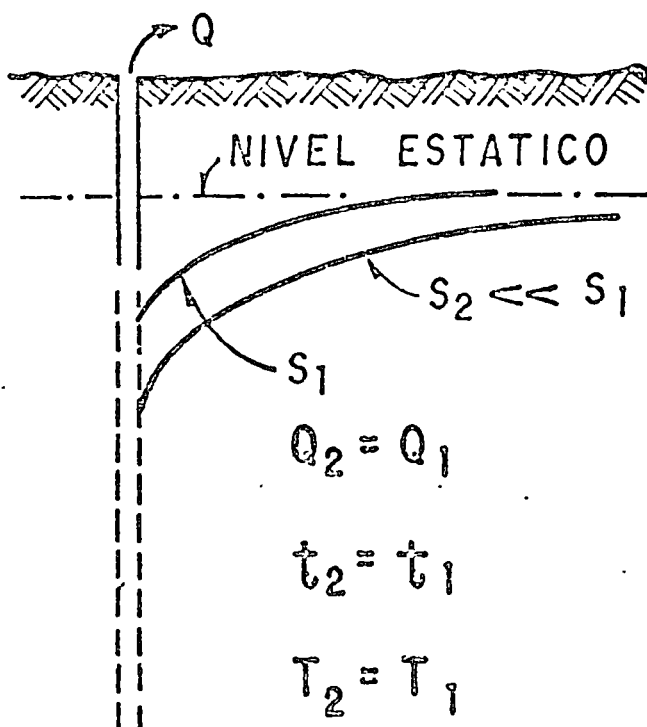
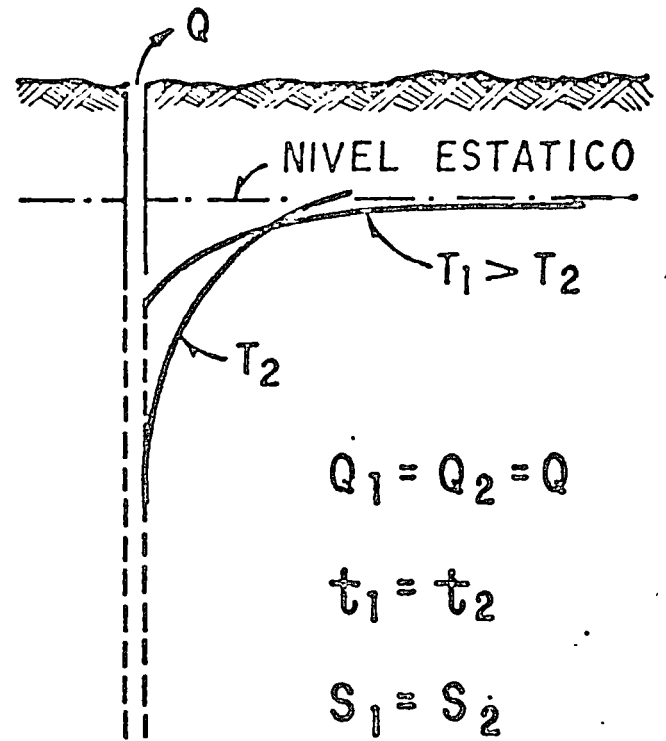
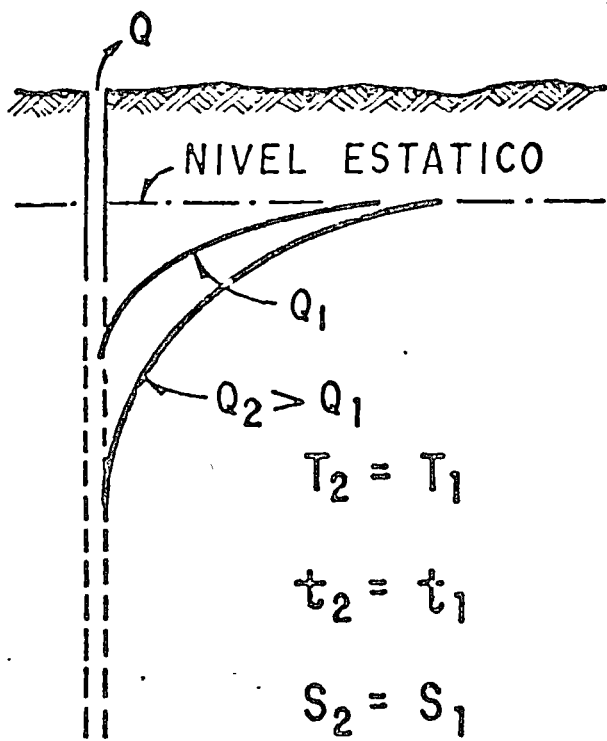
$$V_2 = 2 V_1$$

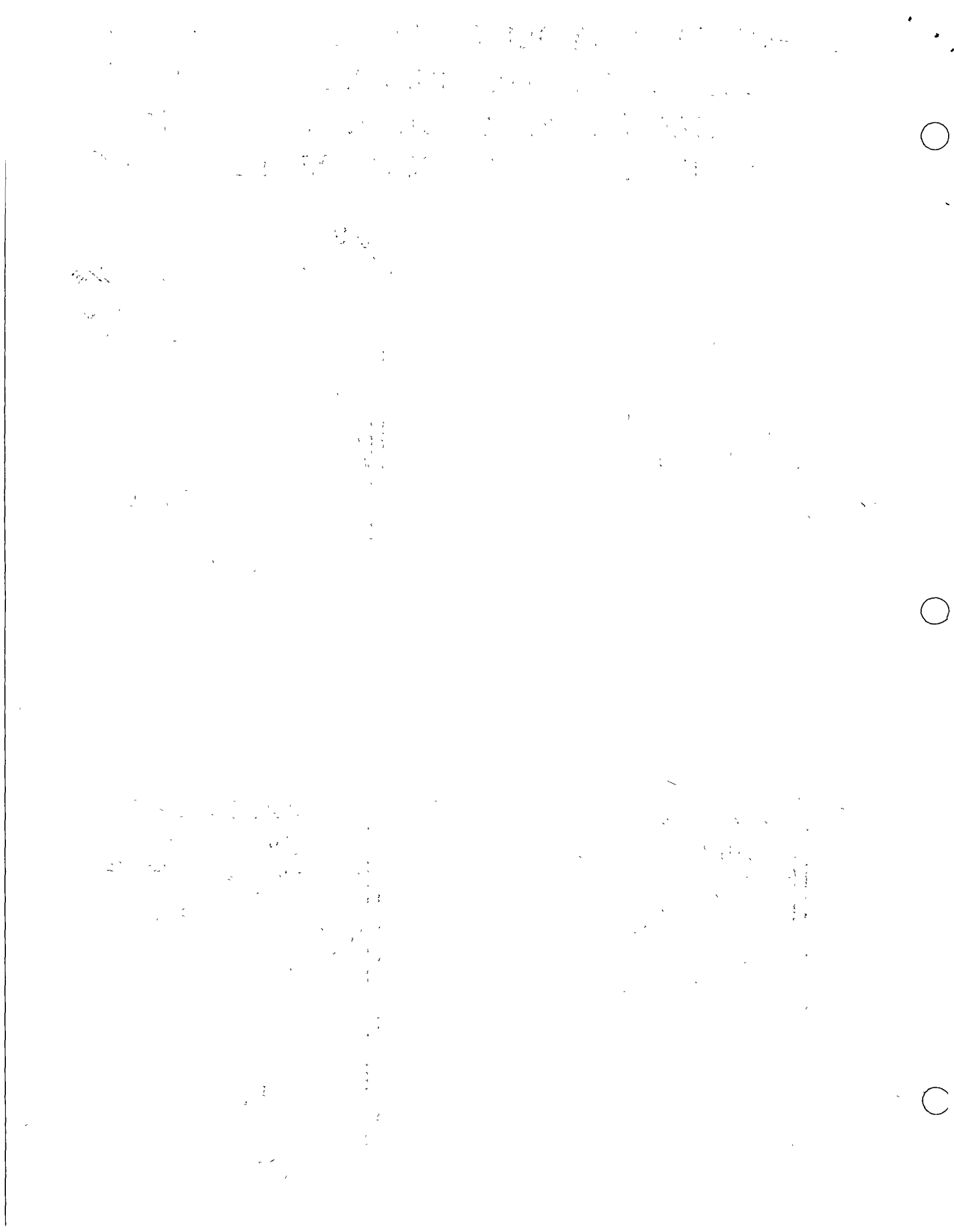
6A-8





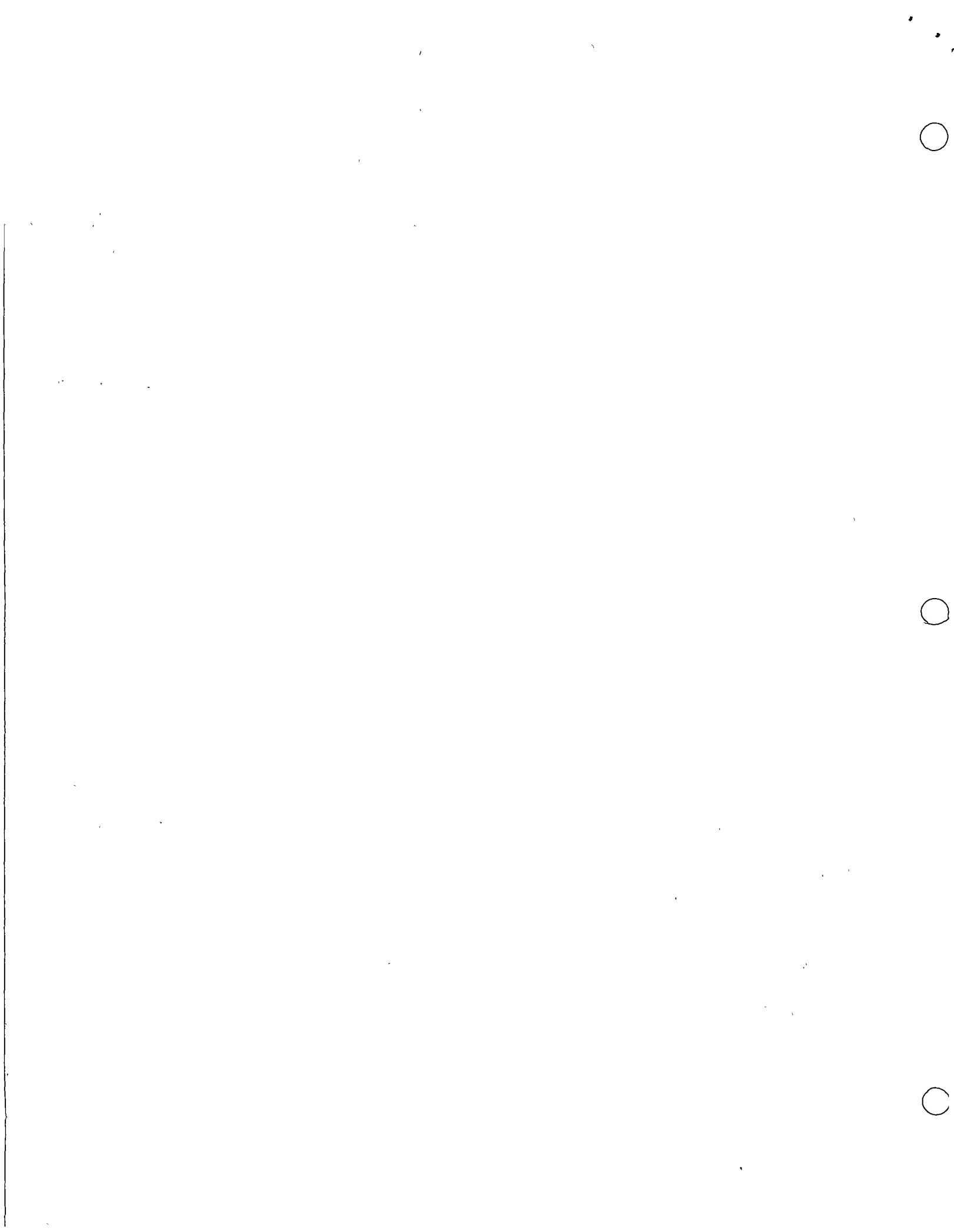
FIG. C.— INFLUENCIA DEL CAUDAL (Q) TIEMPO DE BOMBEO (t), TRANSMISIBILIDAD (T), Y ALMACENAMIENTO (S), EN LA FORMA Y DIMENSIONES DEL CONO DE DEPRESION



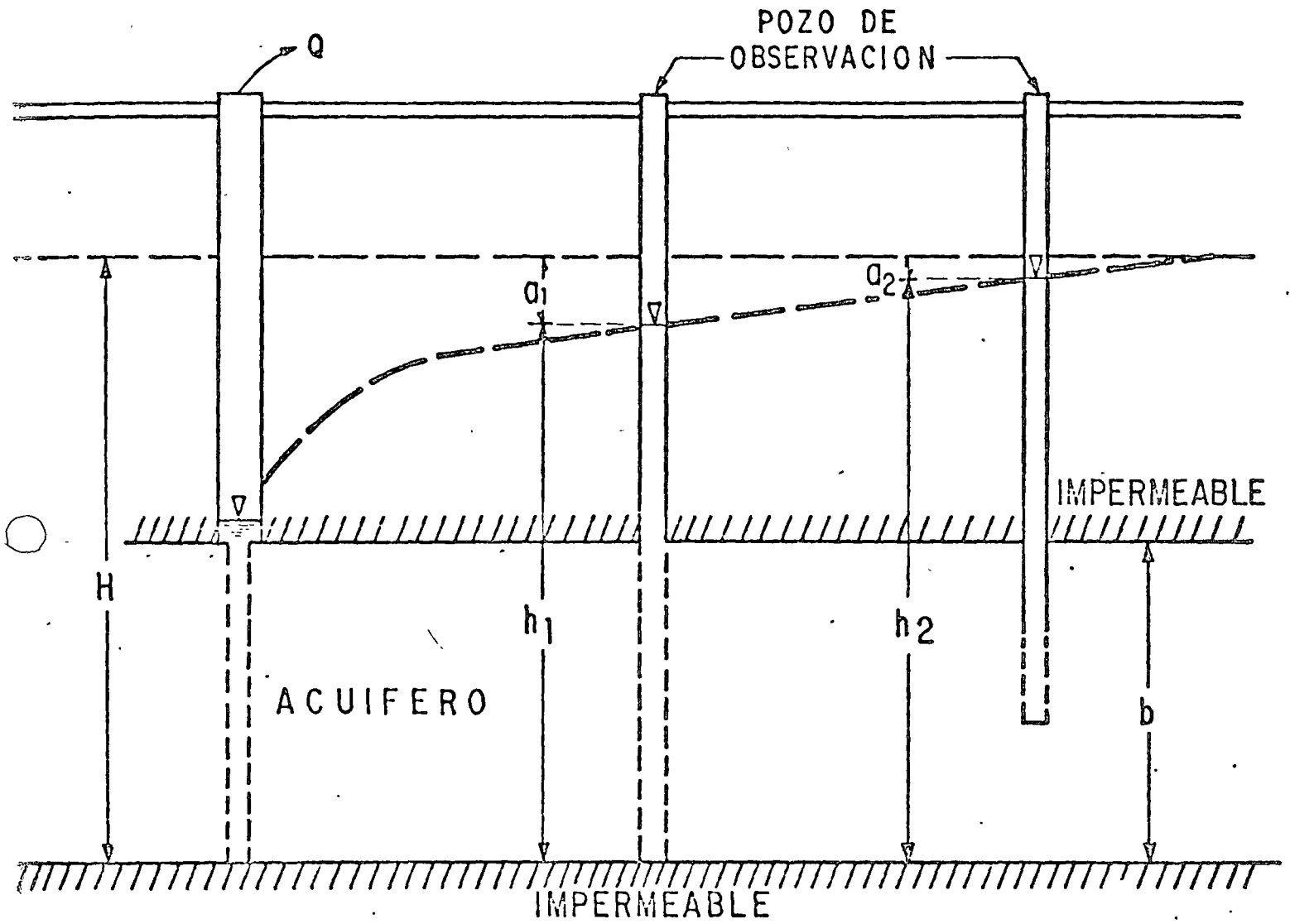


## HIPOTESIS BASICAS DE LA ECUACION DE THIEM

- a). - ACUIFERO HOMOGENEO E ISOTROPO EN EL AREA AFECTADA POR EL BOMBEO.
- b). - EL ESPESOR DEL ACUIFERO ES CONSTANTE (ACUIFERO CONFINADO) O EL ESPESOR SATURADO INICIAL ES CONSTANTE ANTES DE INICIAR EL BOMBEO (ACUIFERO LIBRE).
- c). - EL POZO ES TOTALMENTE PENETRANTE.
- d). - LA SUPERFICIE PIEZOMETRICA O FREATICA ES HORIZONTAL ANTES DE INICIARSE EL BOMBEO.
- e). - EL ABATIMIENTO EN LAS PROXIMIDADES DEL POZO NO VARIARIA EN EL TIEMPO.

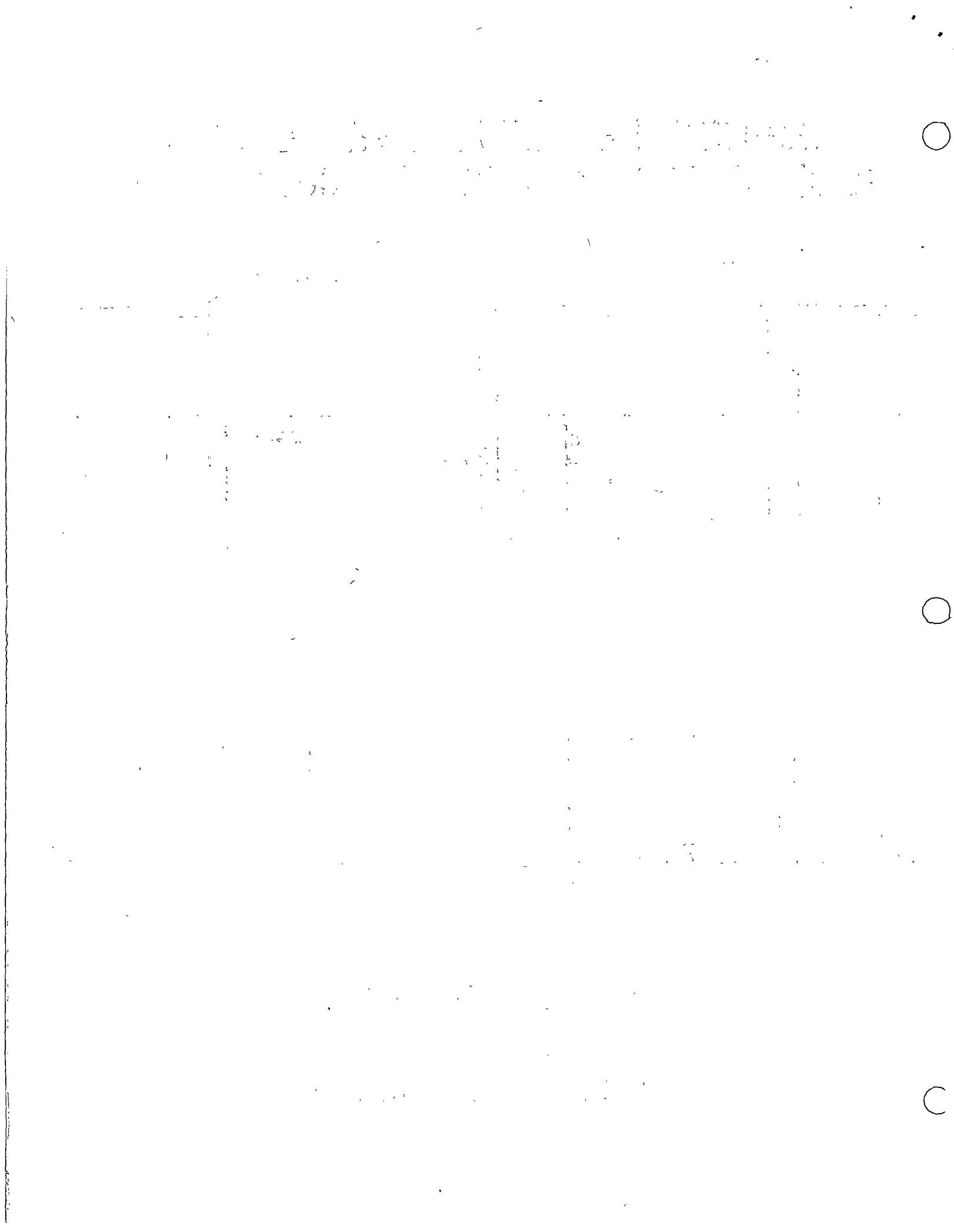


# REGIMEN DE FLUJO ESTABLECIDO HACIA POZOS EN ACUIFERO CONFINADO

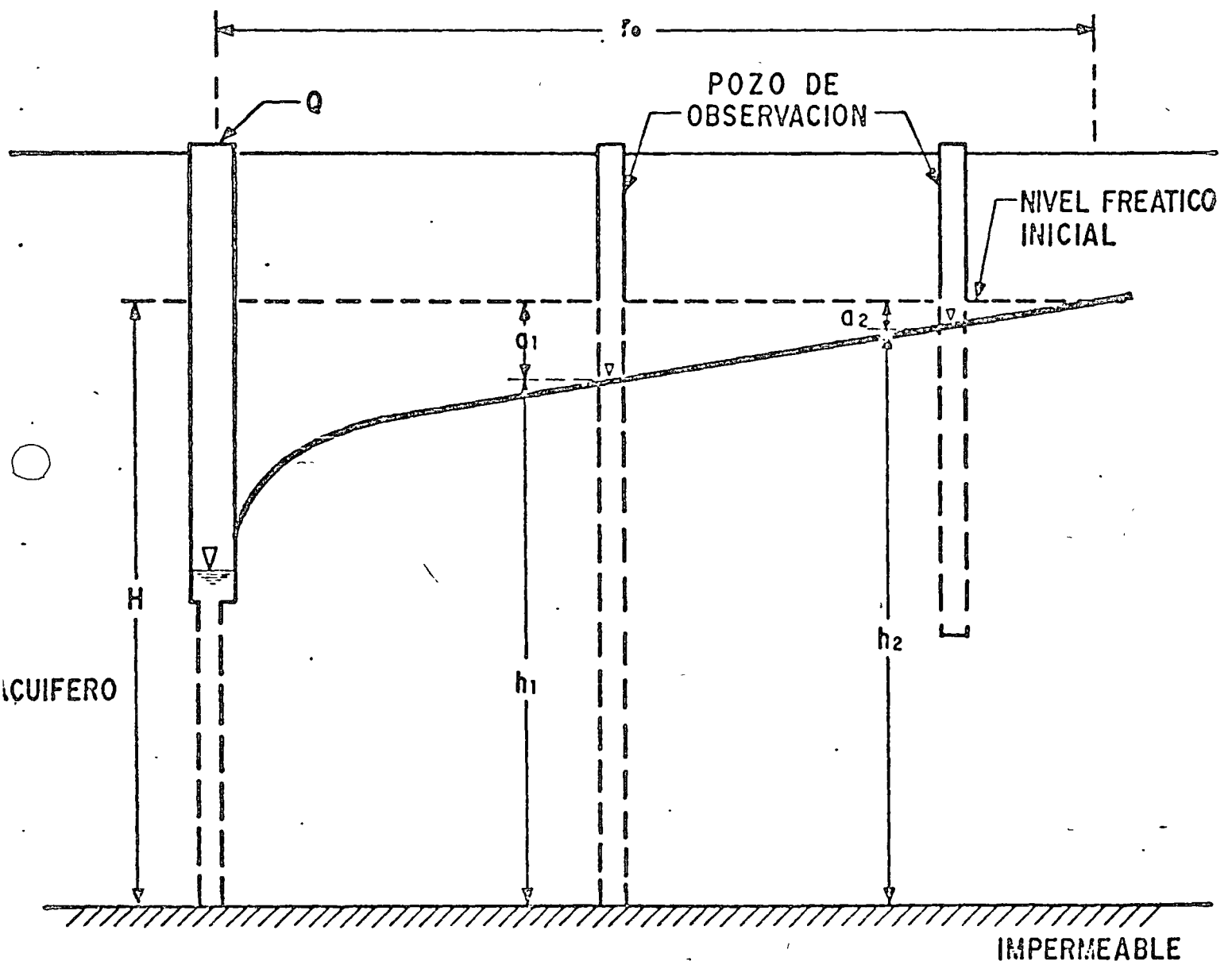


$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{2\pi K b} L \frac{r_1}{r_2}$$

(FORMULA DE THIEM)



# REGIMEN DE FLUJO ESTABLECIDO HACIA POZOS EN UN ACUIFERO LIBRE



$$h_1^2 - h_2^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_1}{r_2}$$

1777  
1778  
1779  
1780  
1781  
1782  
1783  
1784  
1785  
1786  
1787  
1788  
1789  
1790  
1791  
1792  
1793  
1794  
1795  
1796  
1797  
1798  
1799  
1800



FORMULA DE THEIS PARA FLUJO RADIAL  
TRANSITORIO HACIA UN POZO

$$a = \frac{Q}{4\pi T} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

$$= \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$W(u) = -0.577 - L u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

FORMULA SIMPLIFICADA DE JACOB

$$\frac{1}{u} > 20$$

$$W(u) = L \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

$$a = \frac{2.3 Q}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

Handwritten text at the top of the page, possibly a title or header, which is mostly illegible due to fading and bleed-through.



## HIPOTESIS BASICAS DE LA ECUACION DE THEIS

- a).- EL ACUIFERO ES HOMOGENEO E ISOTROPO.
- b).- EL ESPESOR SATURADO DEL ACUIFERO ES CONSTANTE.
- c).- EL ACUIFERO TIENE EXTENSION LATERAL INFINITA.
- d).- EL CAUDAL BOMBEADO PROCEDE DEL ALMACENAMIENTO DEL ACUIFERO.
- e).- EL POZO ES TOTALMENTE PENETRANTE.
- f).- EL ACUIFERO LIBERA EL AGUA INSTANTANEAMENTE AL ABATIRSE LA SUPERFICIE PIEZOMETRICA.



1944

1945

1946

1947

1948

1949

1950

1951

1952



1953

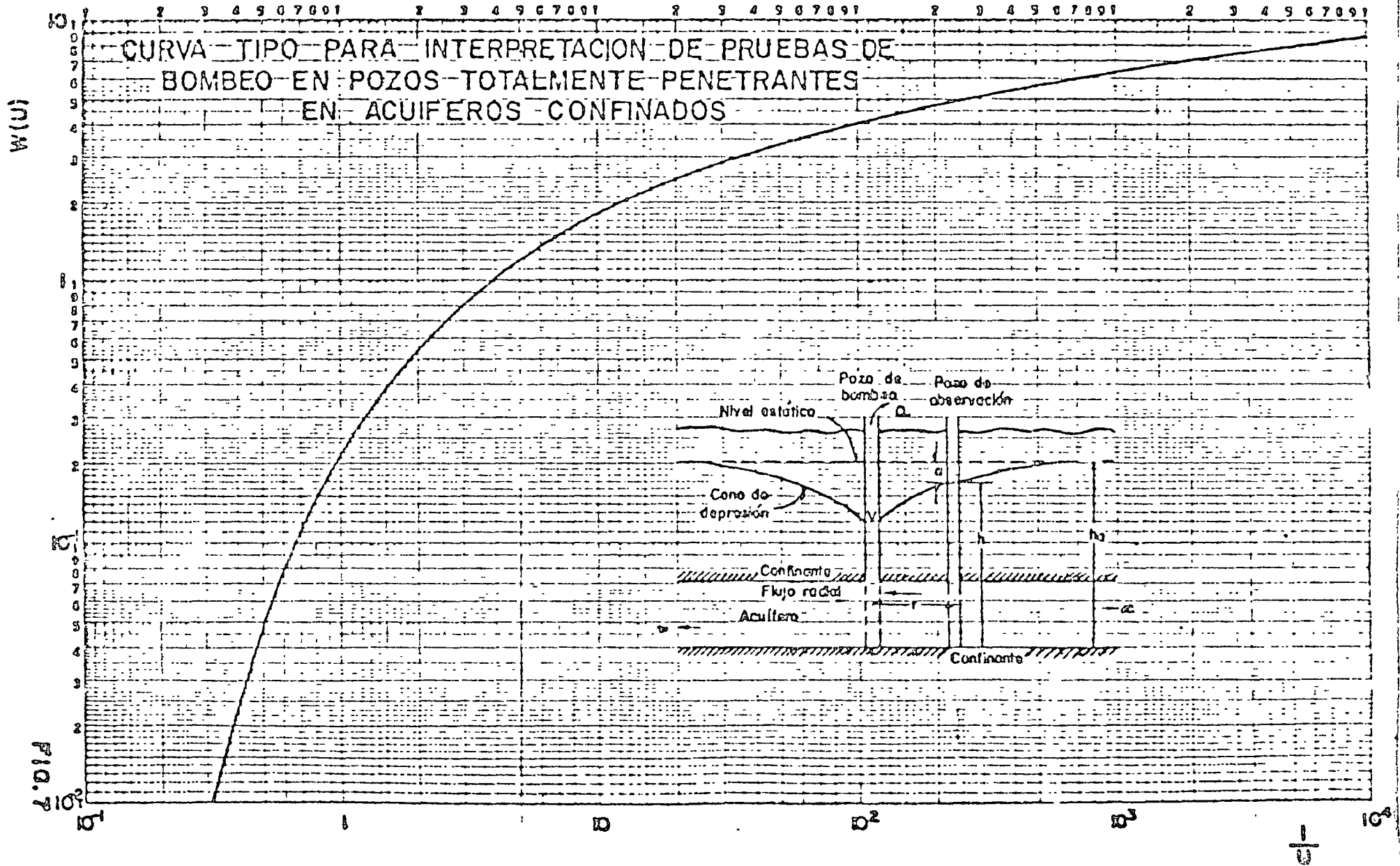
1954

1955

1956

1957







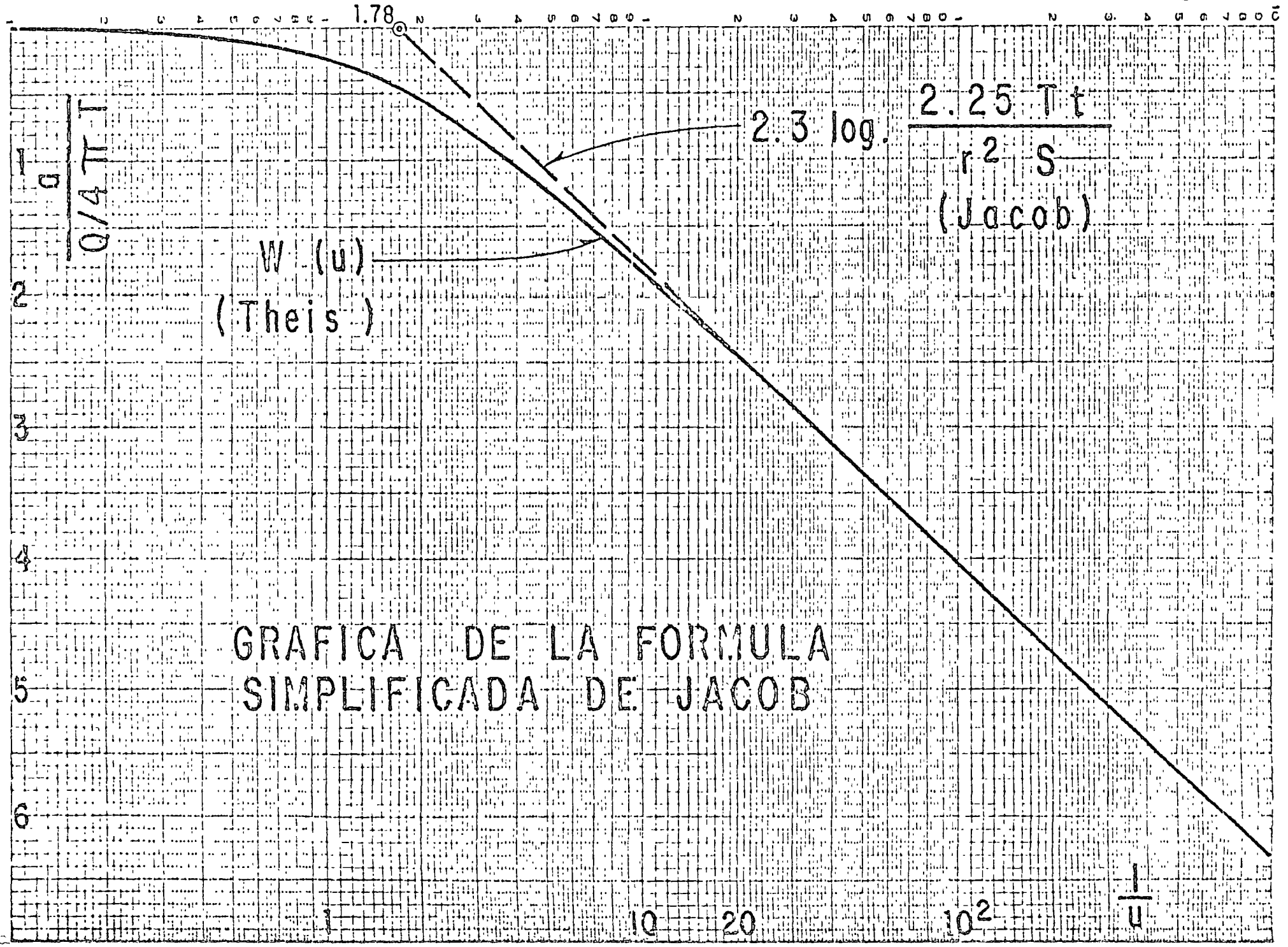


TABLE

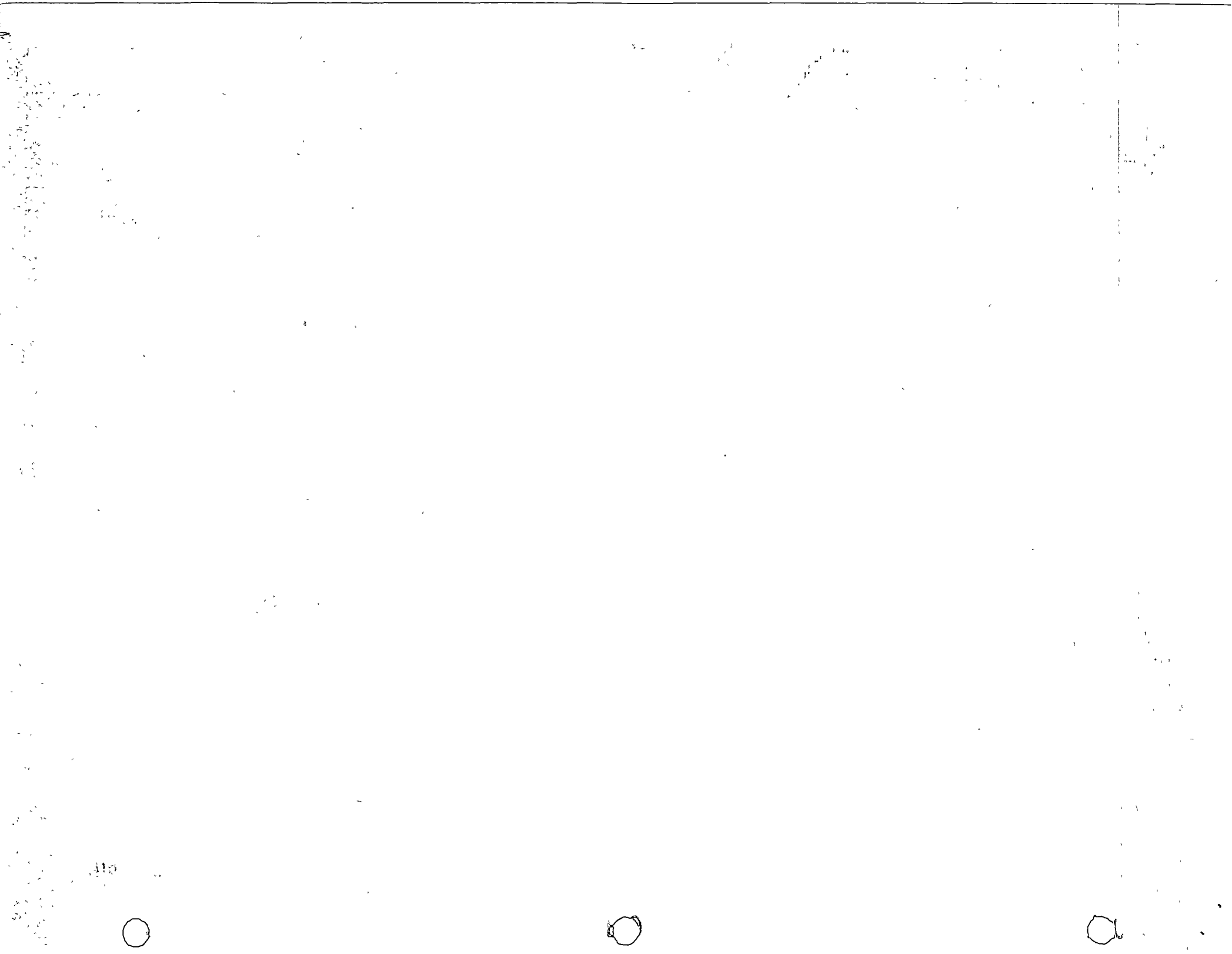
$\mu$ (min)	$\tau$ (min)
1.0	1.0
1.2	1.2
1.4	1.4
1.6	1.6
1.8	1.8
2.0	2.0
2.2	2.2
2.4	2.4
2.6	2.6
2.8	2.8
3.0	3.0
3.2	3.2
3.4	3.4
3.6	3.6
3.8	3.8
4.0	4.0
4.2	4.2
4.4	4.4
4.6	4.6
4.8	4.8
5.0	5.0
5.2	5.2
5.4	5.4
5.6	5.6
5.8	5.8
6.0	6.0
6.2	6.2
6.4	6.4
6.6	6.6
6.8	6.8
7.0	7.0
7.2	7.2
7.4	7.4
7.6	7.6
7.8	7.8
8.0	8.0
8.2	8.2
8.4	8.4
8.6	8.6
8.8	8.8
9.0	9.0
9.2	9.2
9.4	9.4
9.6	9.6
9.8	9.8
10.0	10.0







GRAFICA DE LA FORMULA SIMPLIFICADA DE JACOB



# TIEMPO DE BOMBEO, EN MINUTOS

$t_0 = 7.4 \text{ min.}$

LECTURA EQUIVOCADA

$p = 1.2 \text{ m/ciclo}$

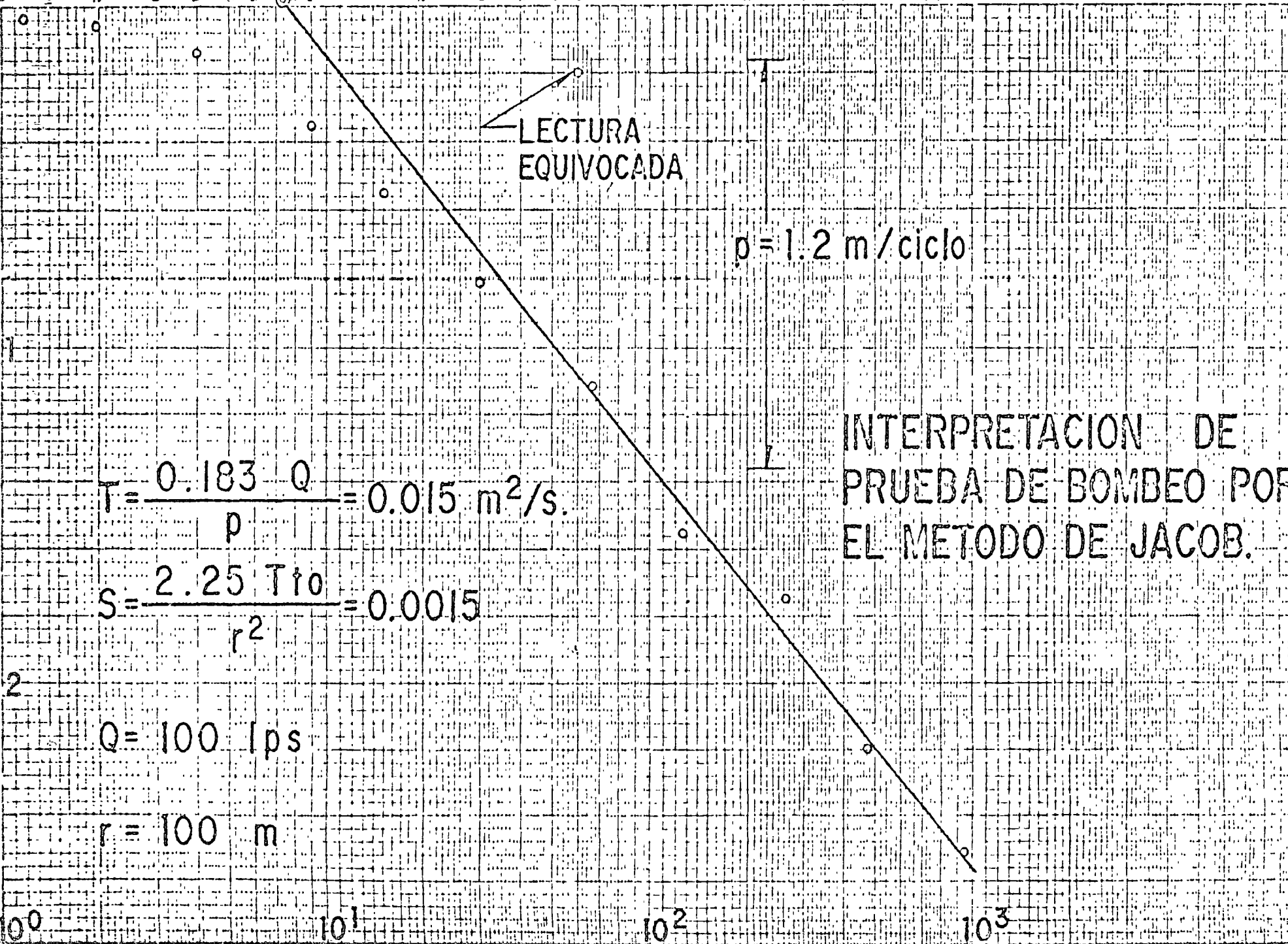
INTERPRETACION DE PRUEBA DE BOMBEO POR EL METODO DE JACOB.

$$T = \frac{0.183 Q}{p} = 0.015 \text{ m}^2/\text{s.}$$

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} = 0.0015$$

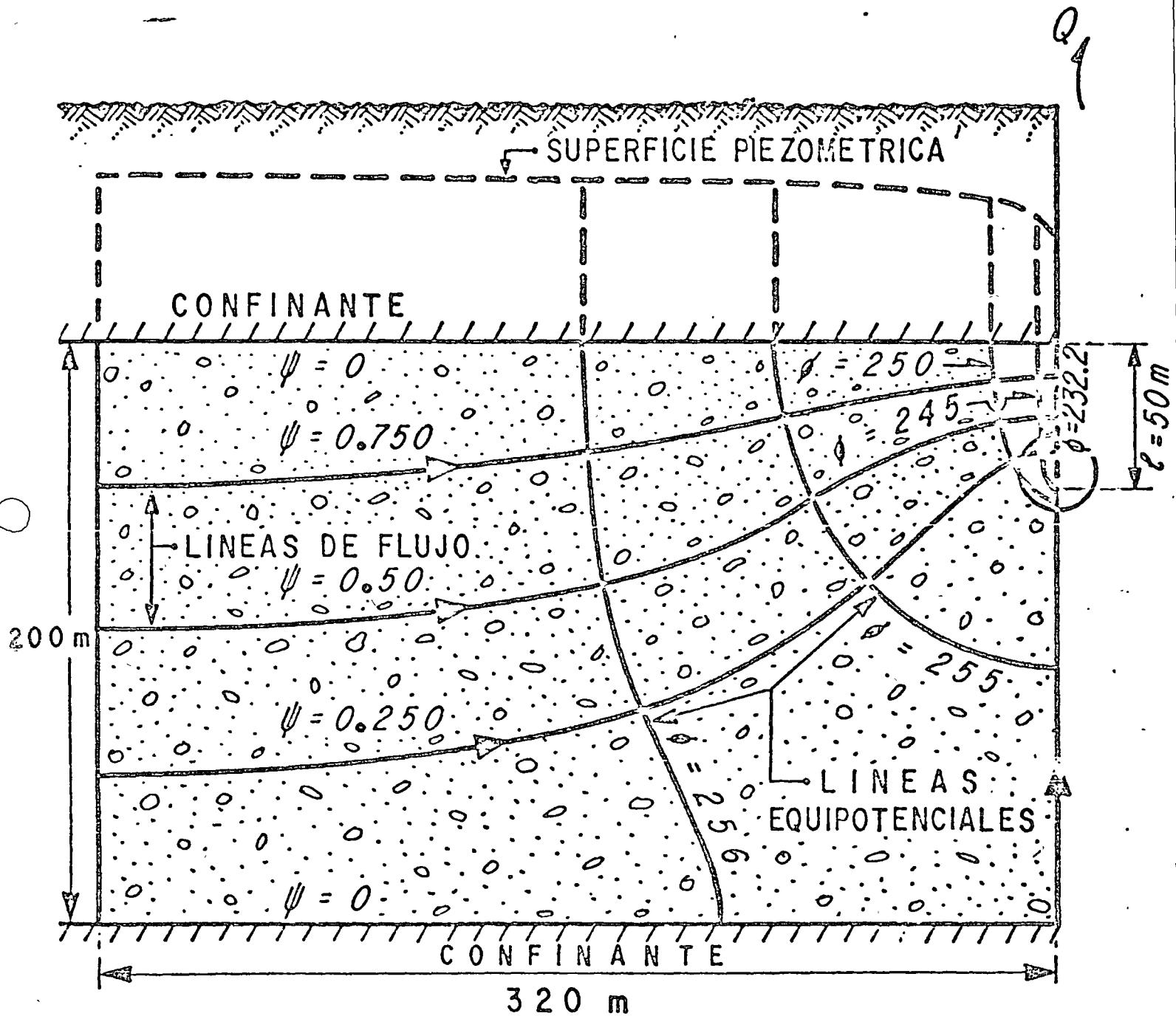
$Q = 100 \text{ lps}$

$r = 100 \text{ m}$





# FLUJO HACIA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE



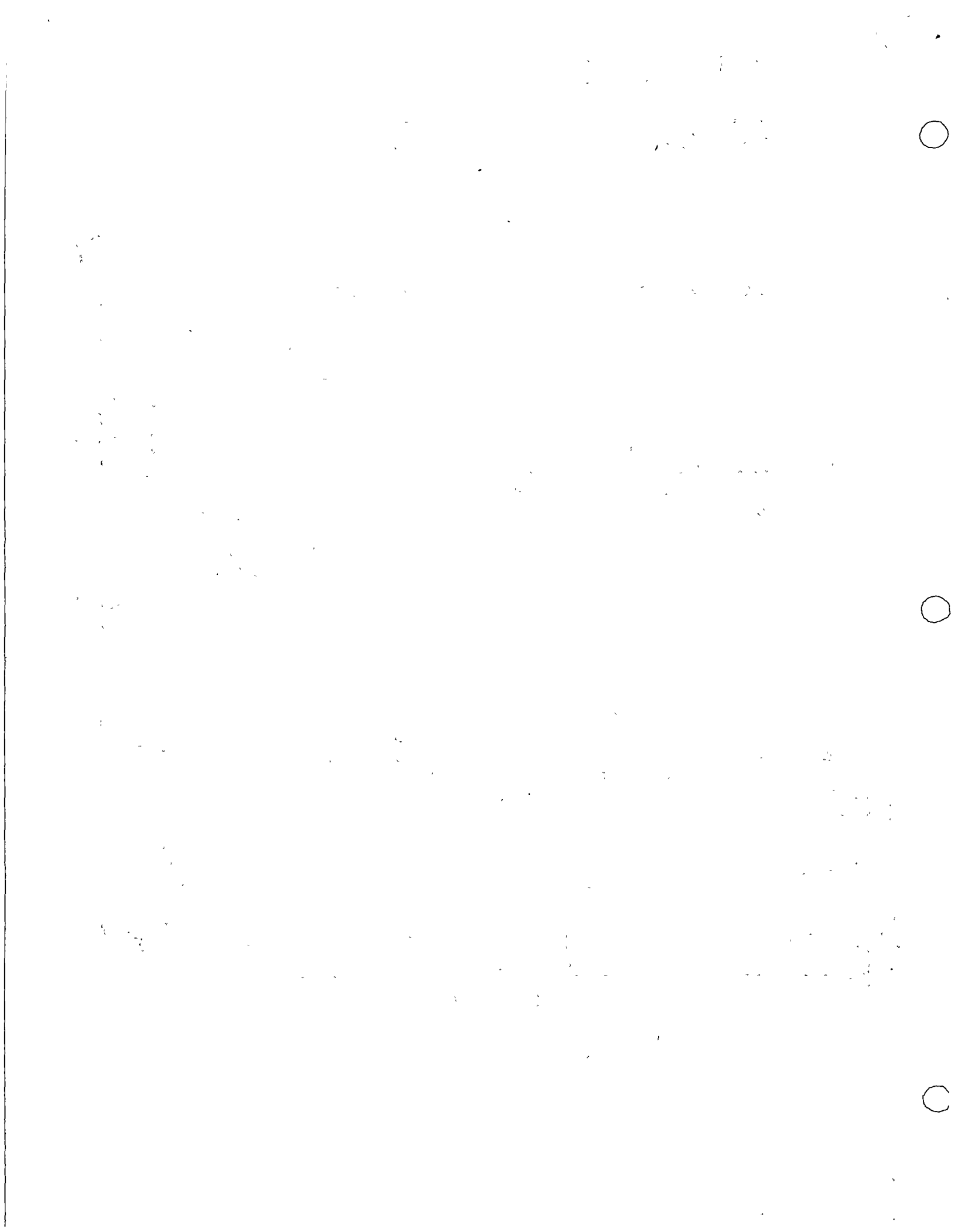
$$Q = 150 \text{ lps}$$

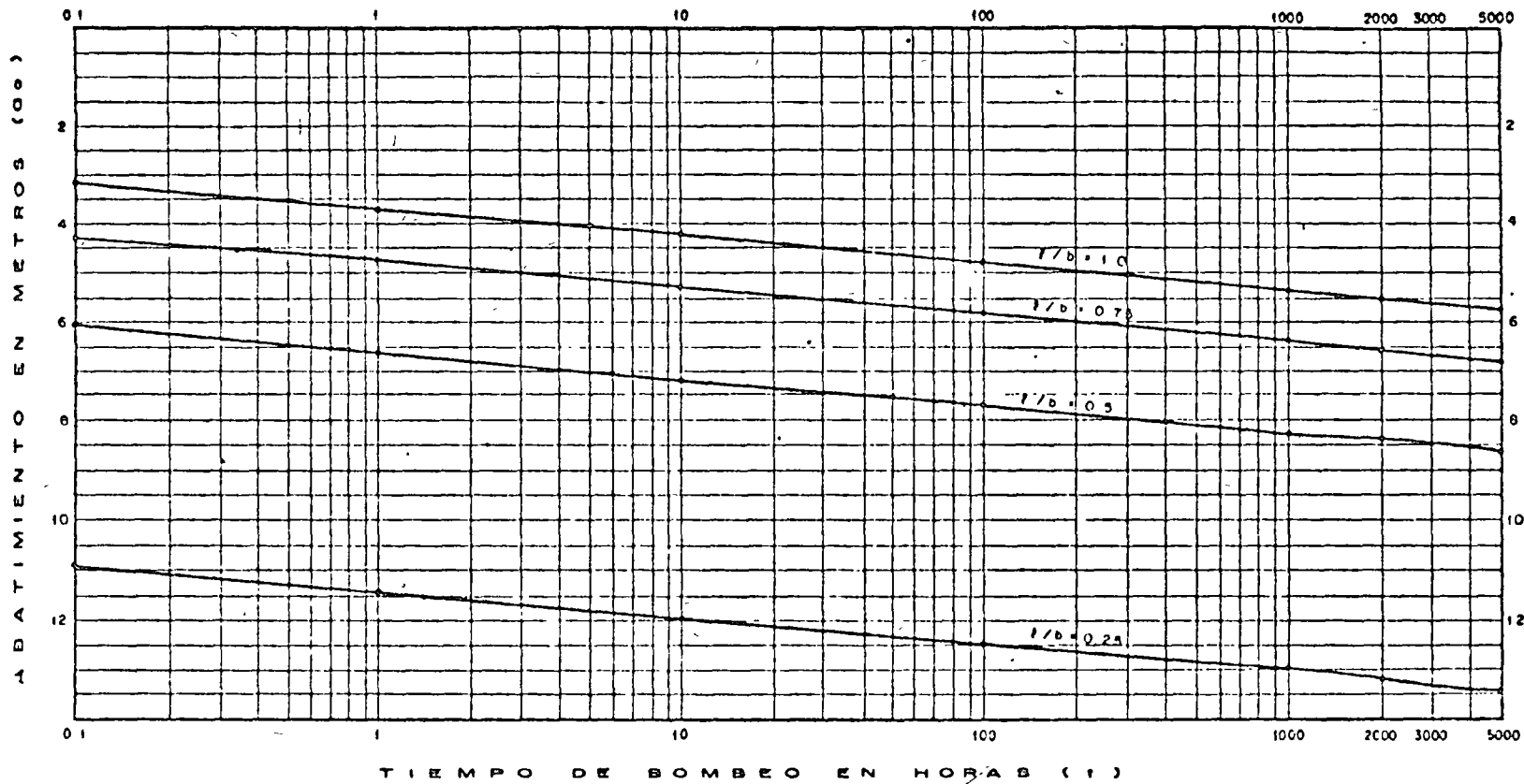
$$t = 2000 \text{ hrs}$$

$$T = 0.02 \text{ m}^2/\text{s}$$

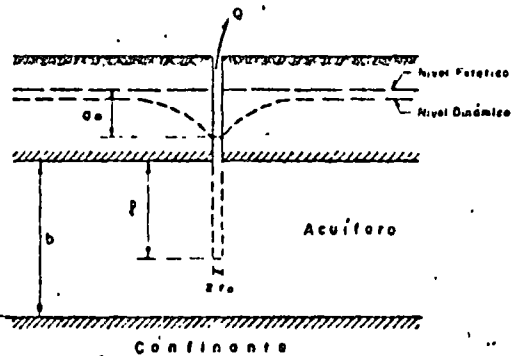
$$S = 0.02$$

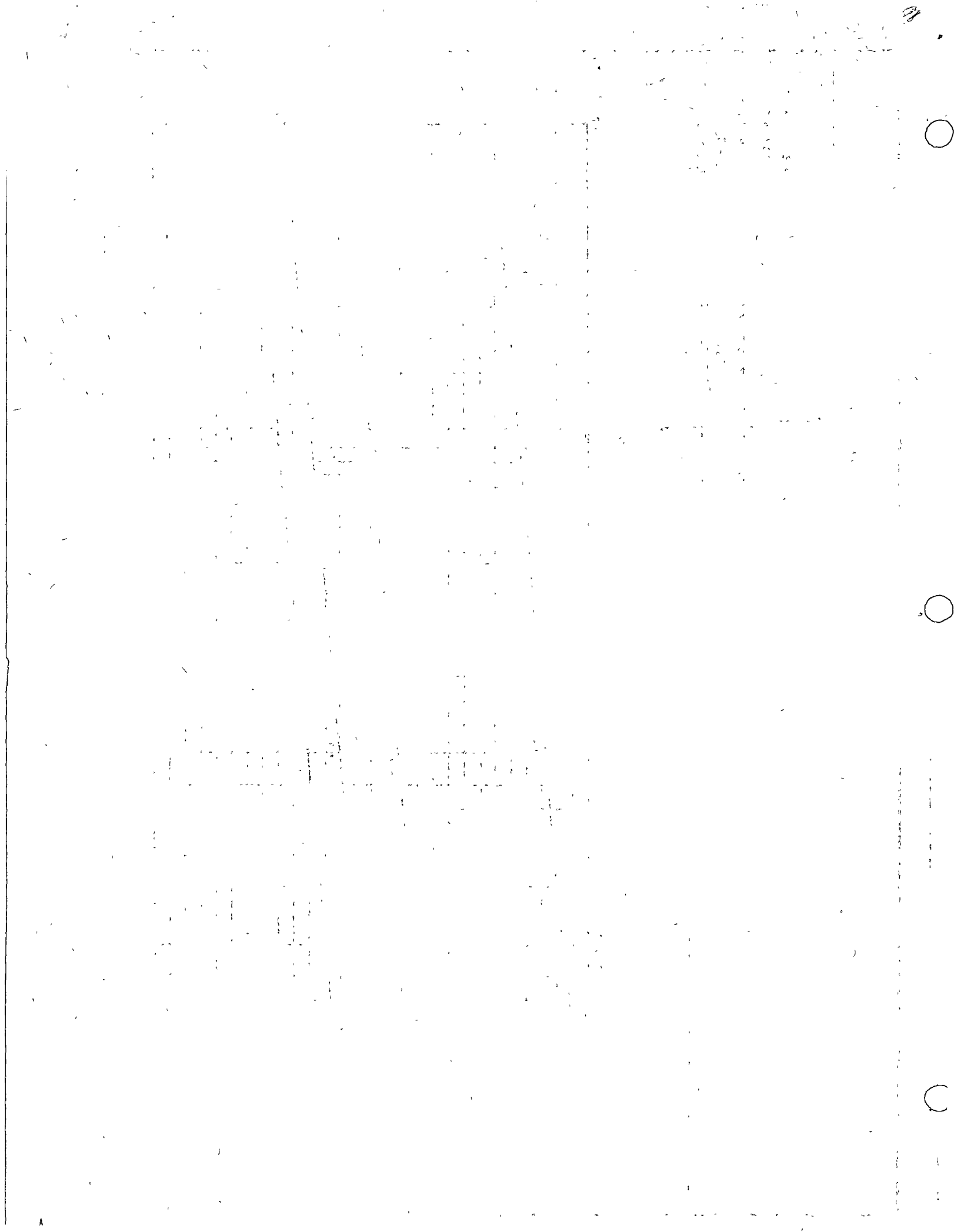
SCALA 1:2000





$Q = 150$  lps.  
 $T = 5 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/seg  
 $S = 2 \times 10^{-3}$   
 $b = 200$  m.  
 $r_w = 0.2$  m.







Q (CAUDAL EN LPS.)

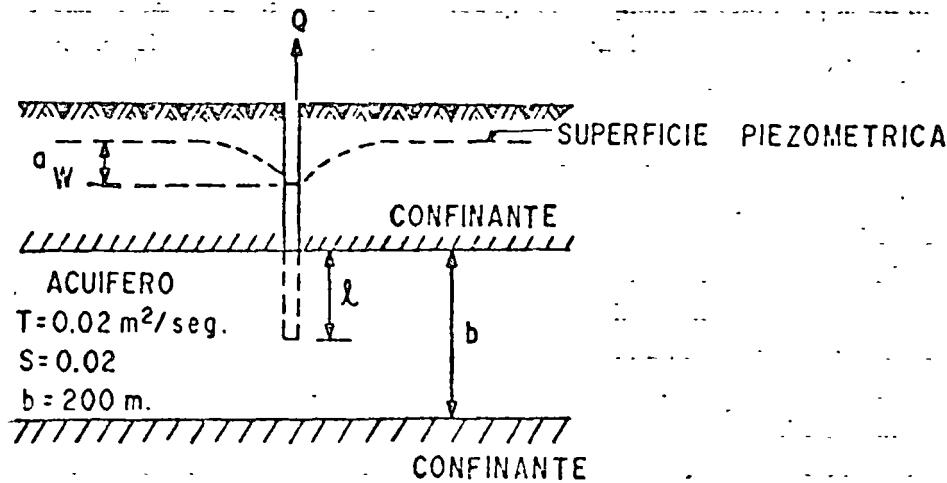
ABATIMIENTO EN METROS

$l/b = 1.00$

$l/b = 0.75$

$l/b = 0.5$

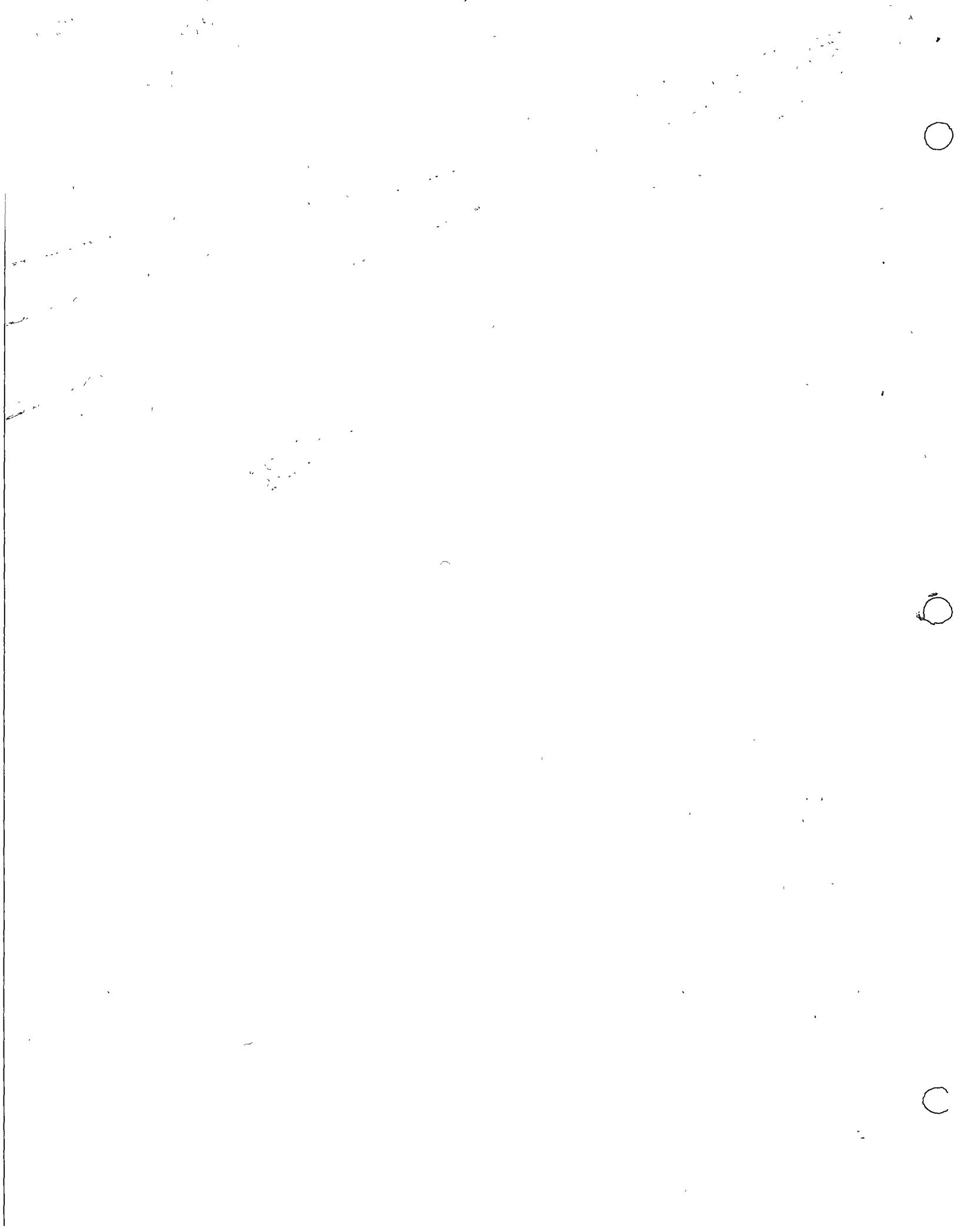
$l/b = 0.25$



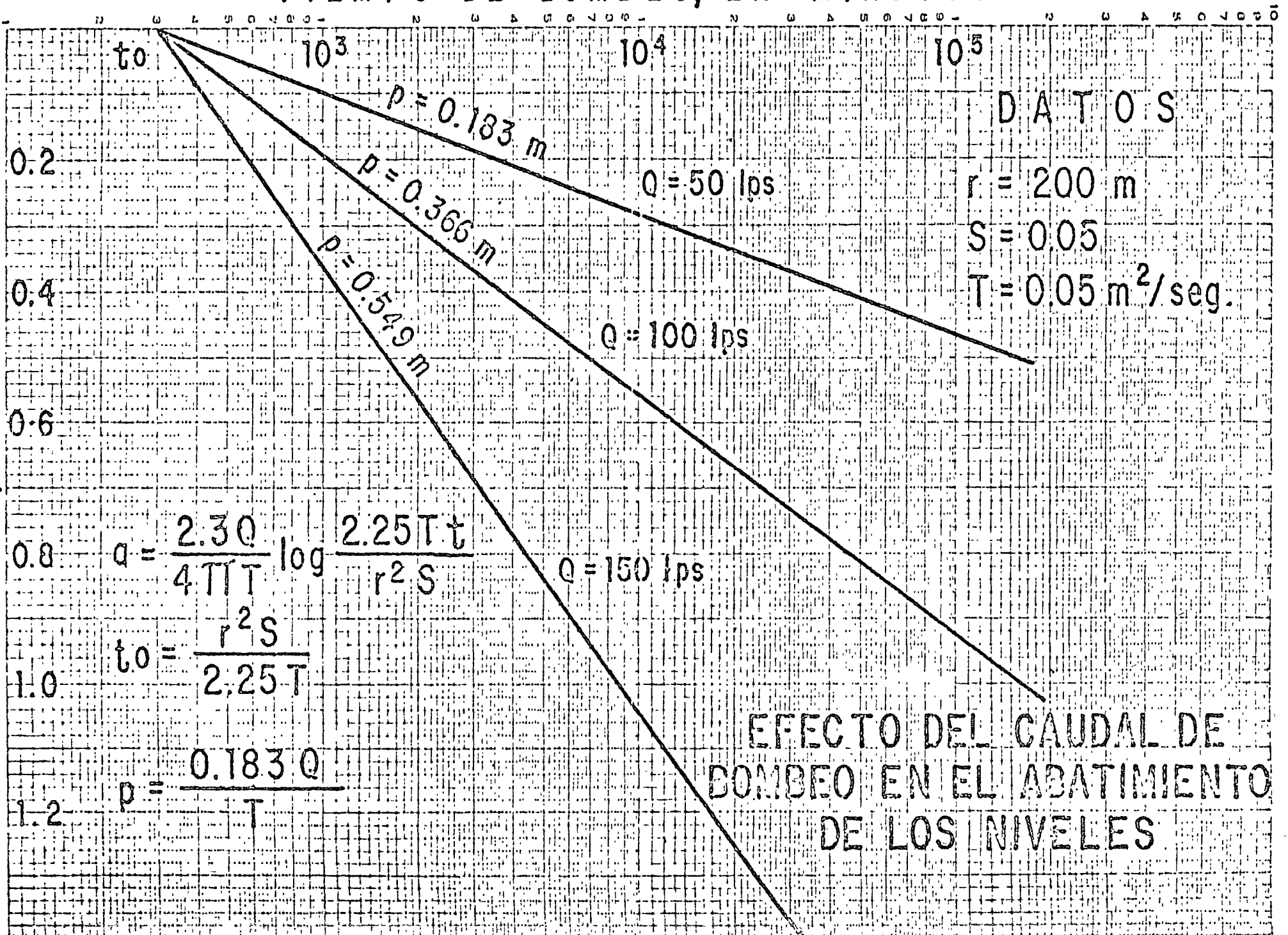
NOTA:

ESTA RELACION CORRESPONDE A UN TIEMPO DE BOMBEO DE 2000 HORAS

# RELACION - CAUDAL - ABATIMIENTO PENETRACION



# TIEMPO DE BOMBEO, EN MINUTOS



## DATOS

$r = 200 \text{ m}$   
 $S = 0.05$   
 $T = 0.05 \text{ m}^2/\text{seg.}$

$$a = \frac{2.30}{4\pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

$$t_0 = \frac{r^2 S}{2.25 T}$$

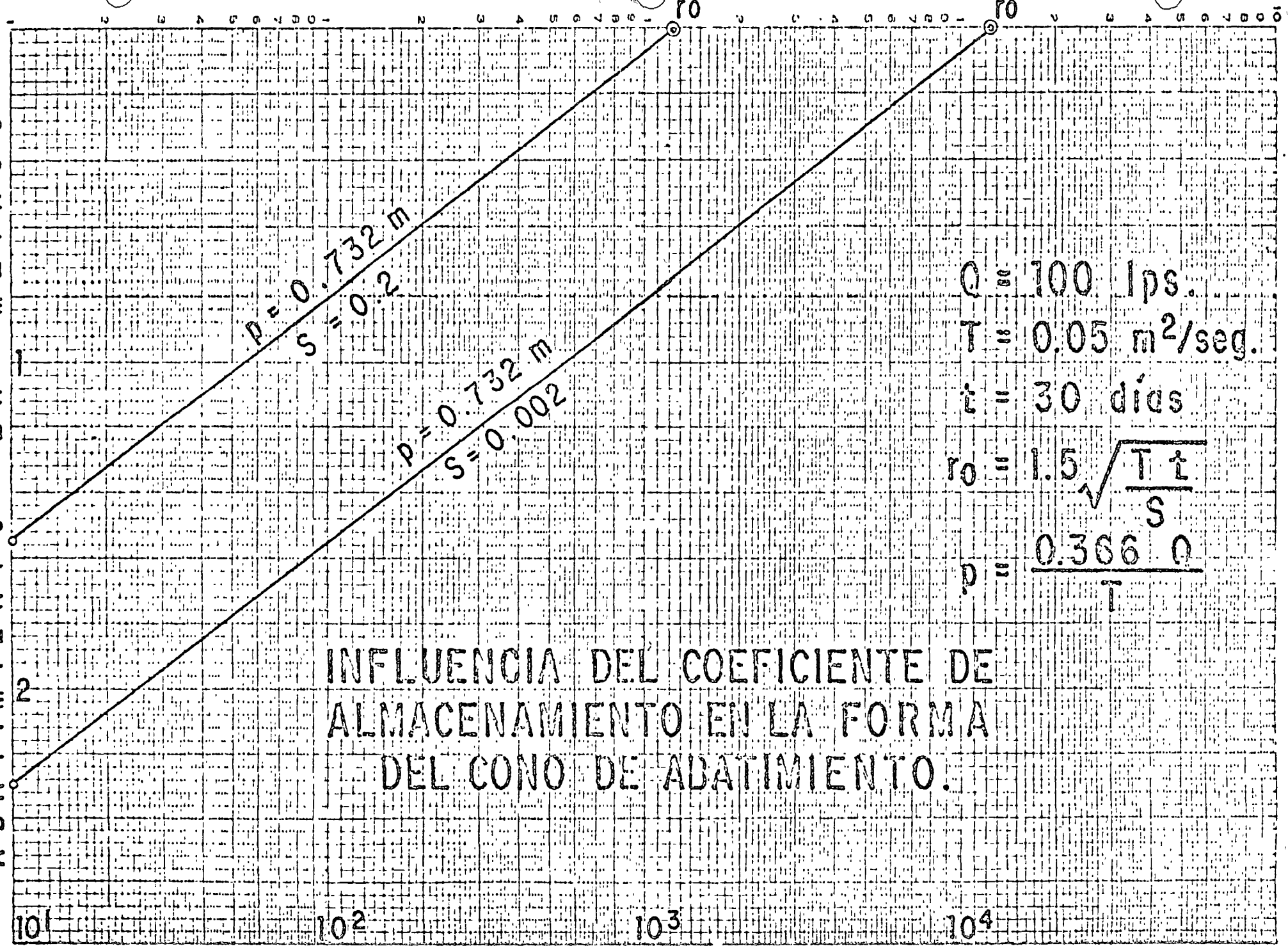
$$p = \frac{0.183 Q}{T}$$

EFECTO DEL CAUDAL DE BOMBEO EN EL ABATIMIENTO DE LOS NIVELES



DISTANCIA AL PUZO U BOMBEO EN METROS

ABATIMIENTO EN METROS



$Q = 100 \text{ lps.}$

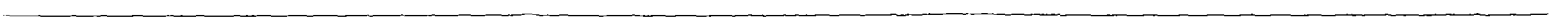
$T = 0.05 \text{ m}^2/\text{seg.}$

$t = 30 \text{ días}$

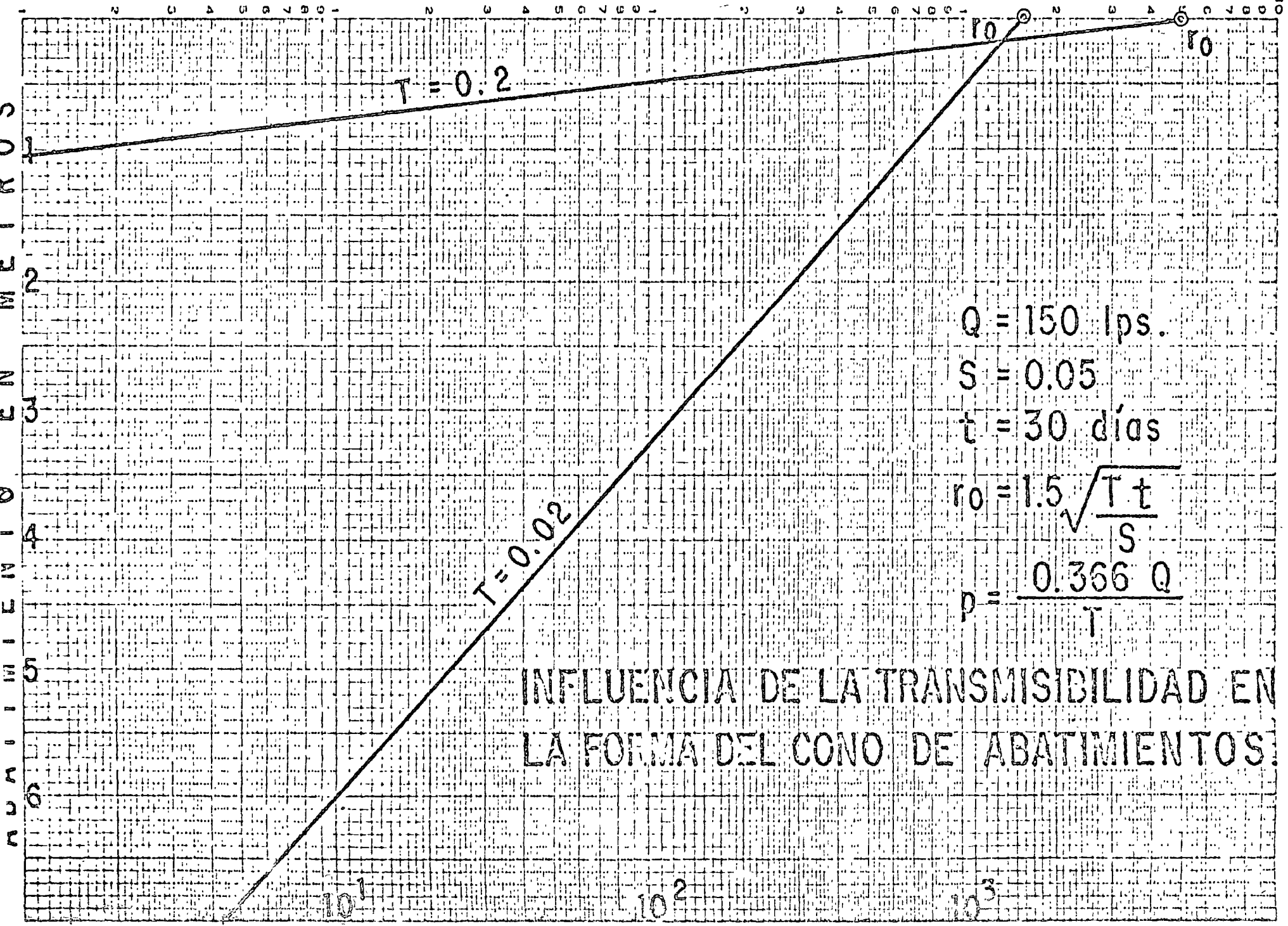
$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$

$p = \frac{0.366 Q}{T}$

INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO EN LA FORMA DEL CONO DE ABATIMIENTO.



DISTANCIA AL POZO DE BOMBEO EN METROS



$Q = 150 \text{ lps.}$

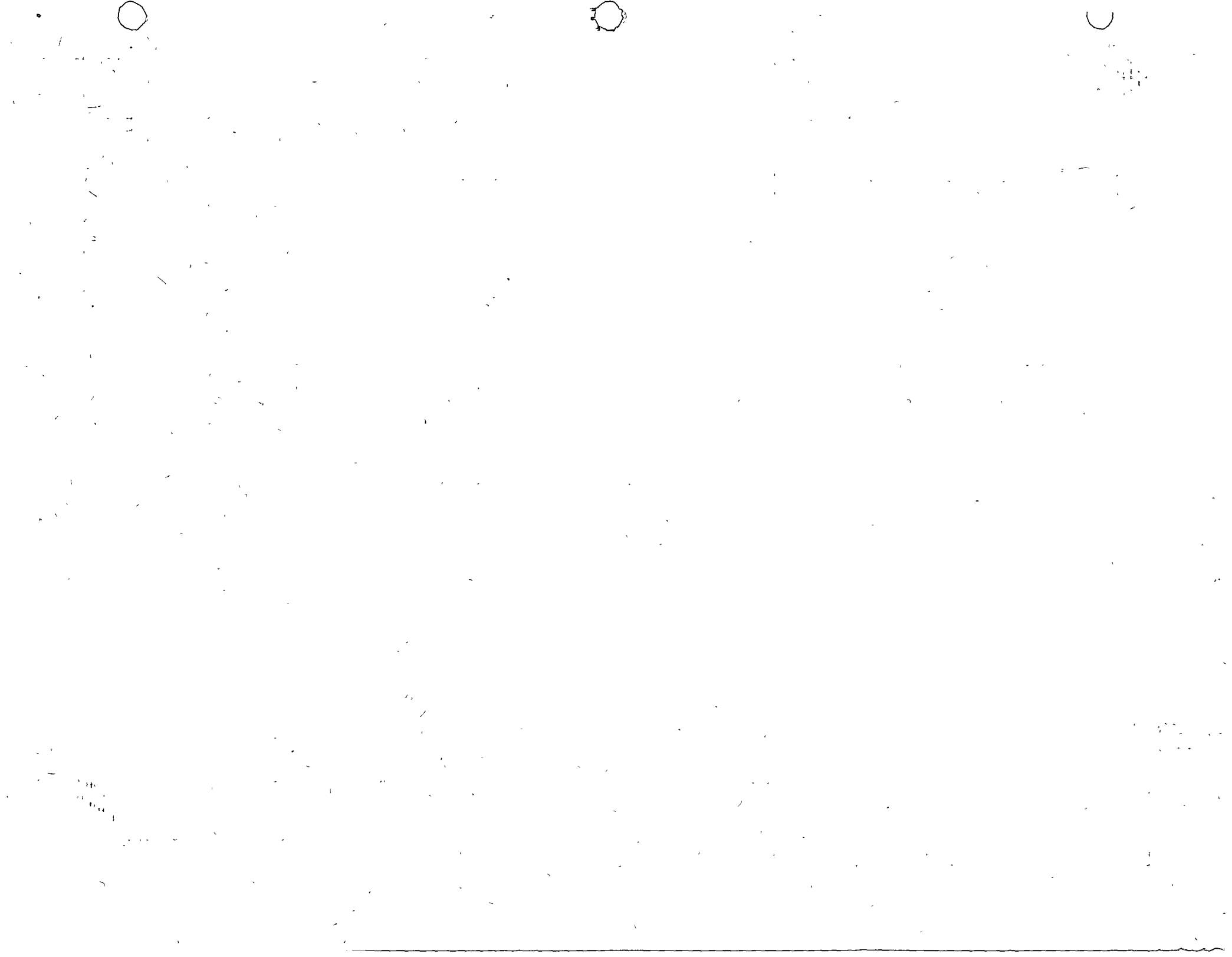
$S = 0.05$

$t = 30 \text{ días}$

$$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$$

$$p = \frac{0.366 Q}{T}$$

INFLUENCIA DE LA TRANSMISIBILIDAD EN LA FORMA DEL CONO DE ABATIMIENTOS

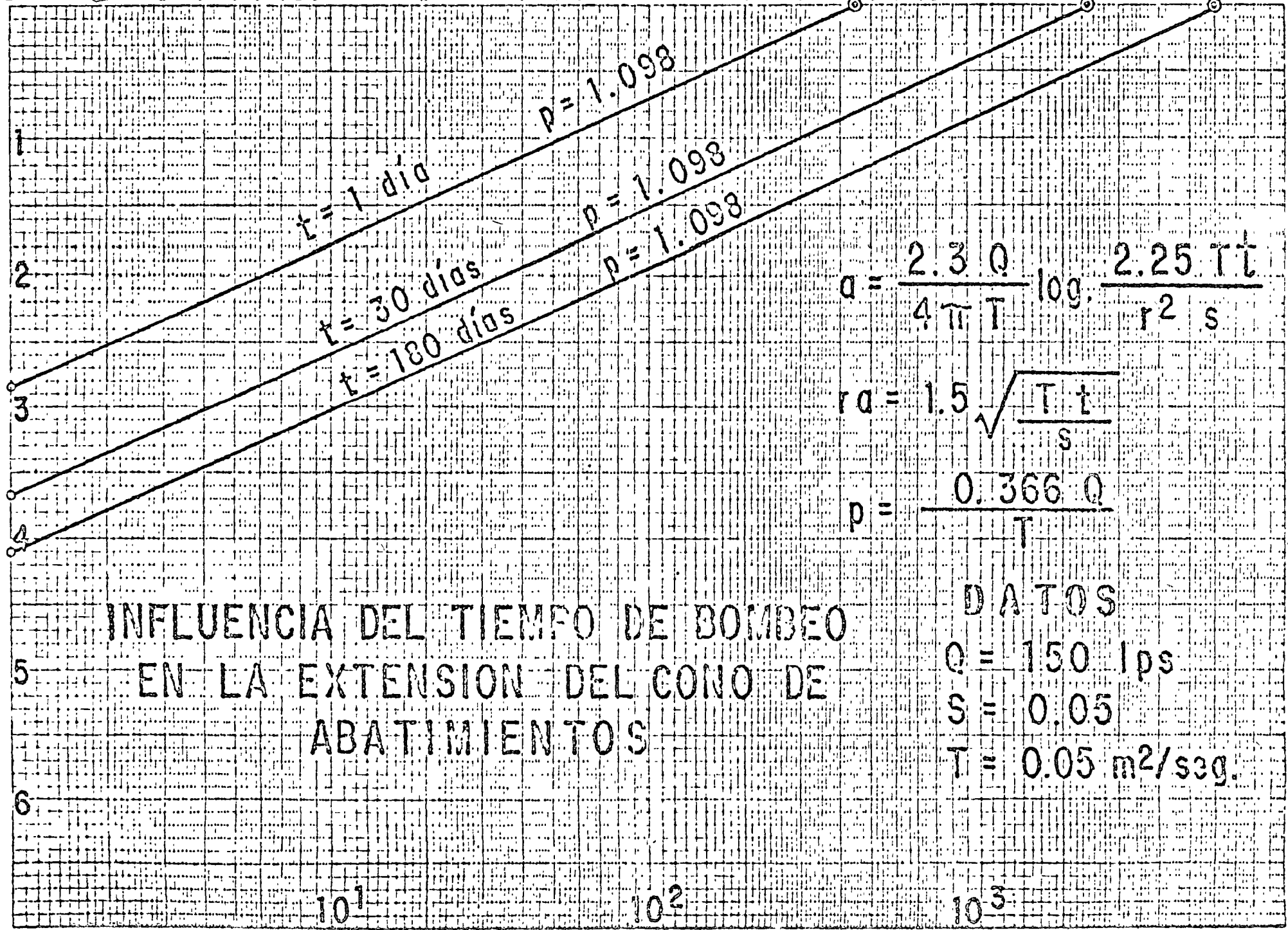








ABATIMIENTO EN METROS



$$a = \frac{2.3 Q}{4 \pi T} \log \frac{2.25 r t}{r^2 s}$$

$$ra = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{s}}$$

$$p = \frac{0.366 Q}{T}$$

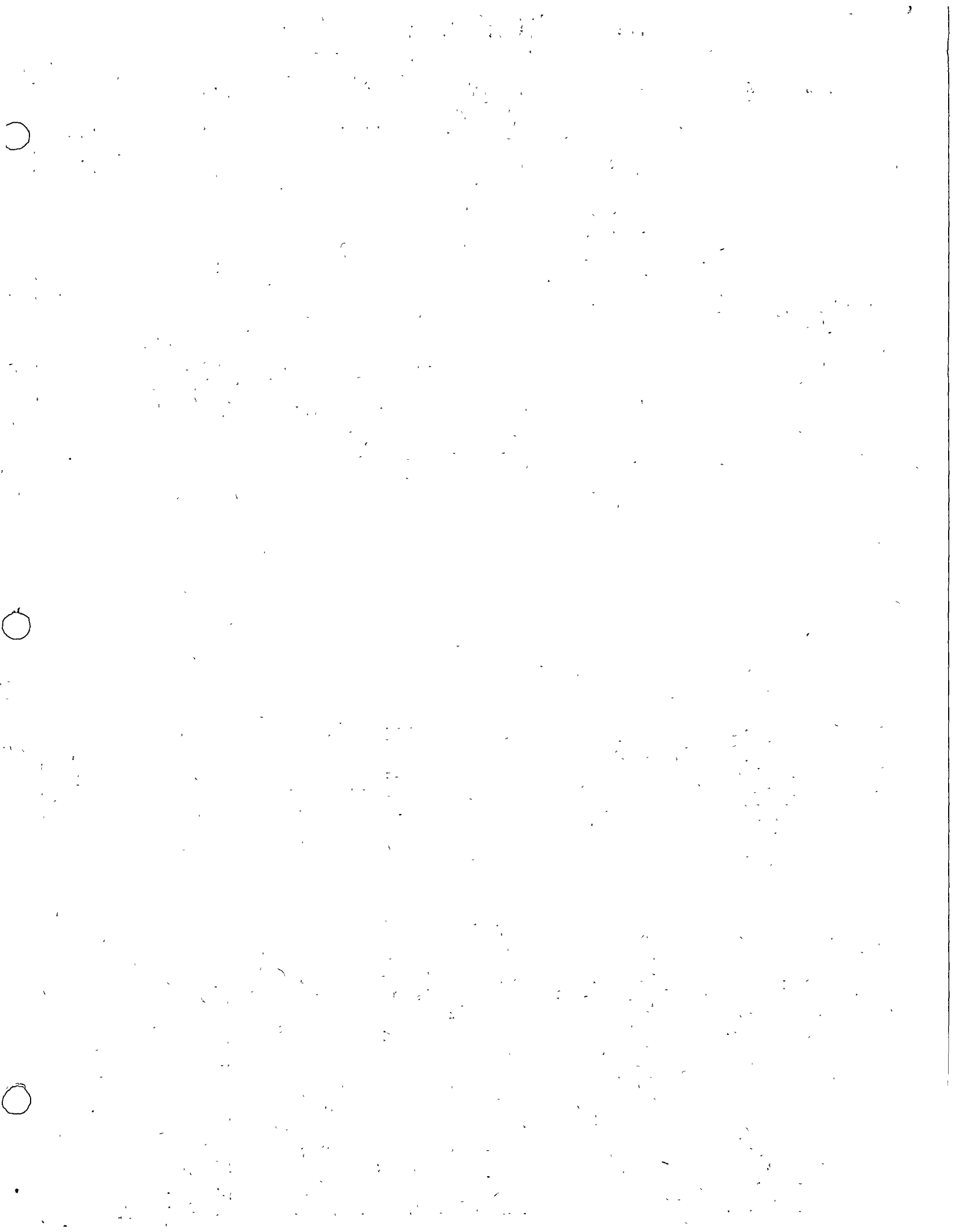
INFLUENCIA DEL TIEMPO DE BOMBEO  
EN LA EXTENSION DEL CONO DE  
ABATIMIENTOS

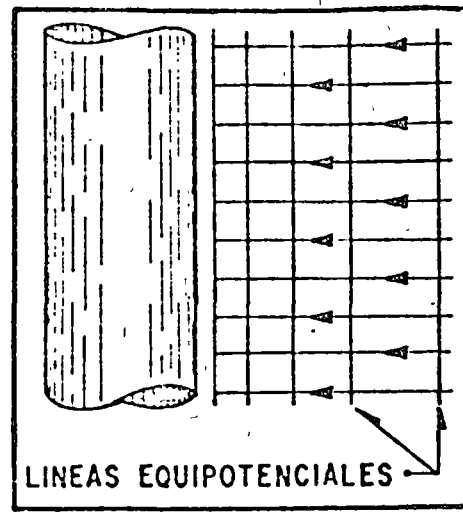
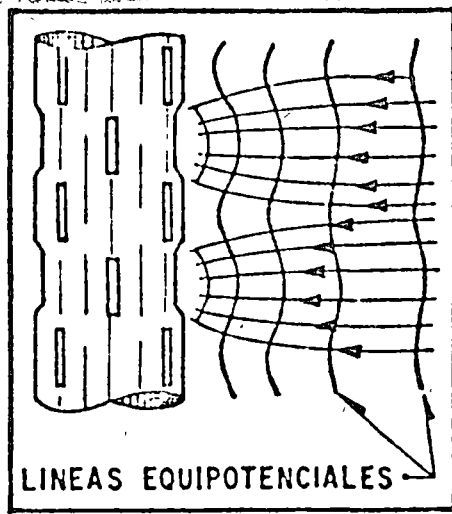
DATOS

Q = 150 lps

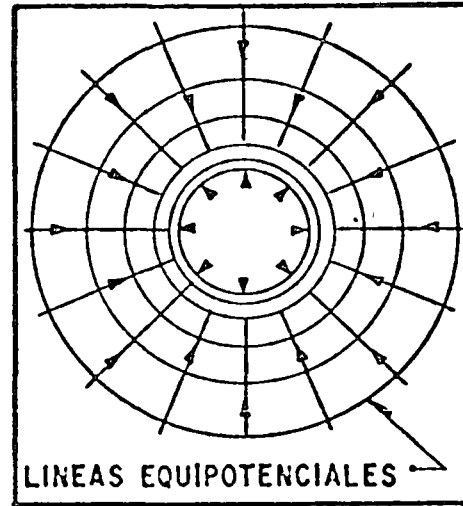
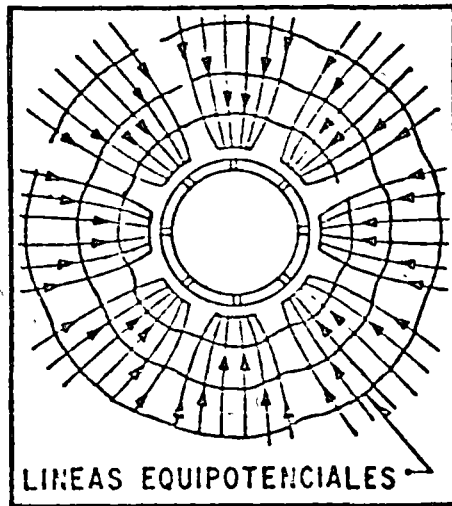
S = 0.05

T = 0.05 m<sup>2</sup>/seg.



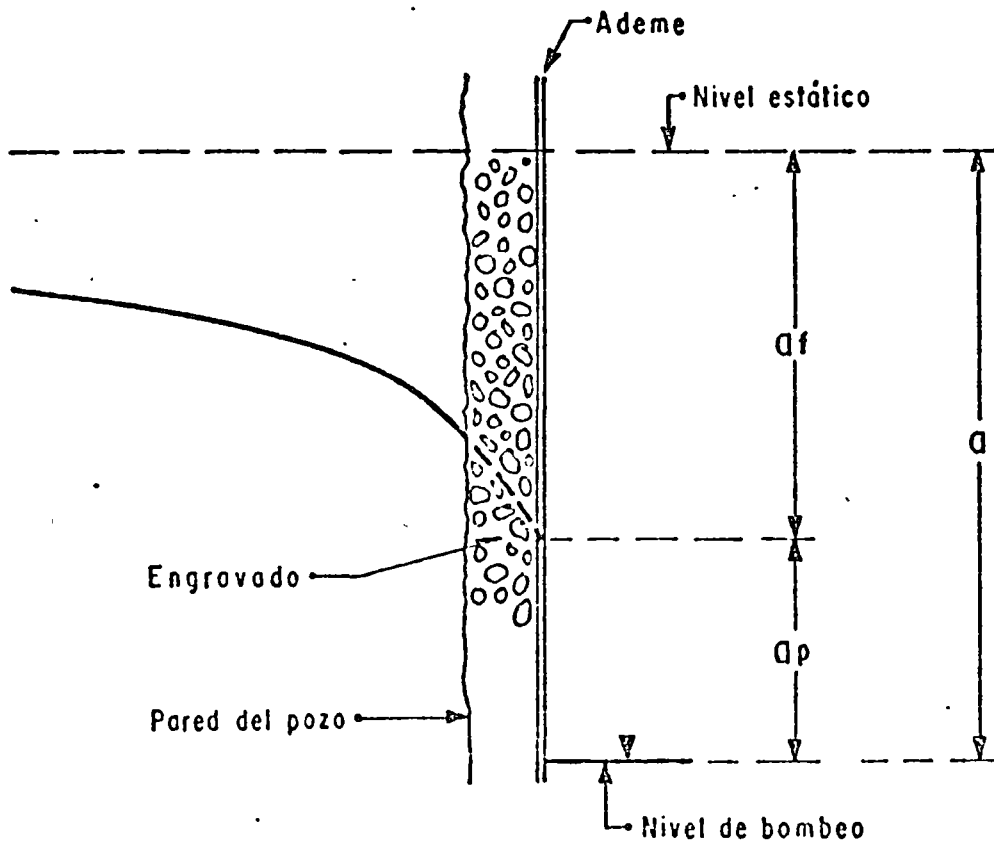


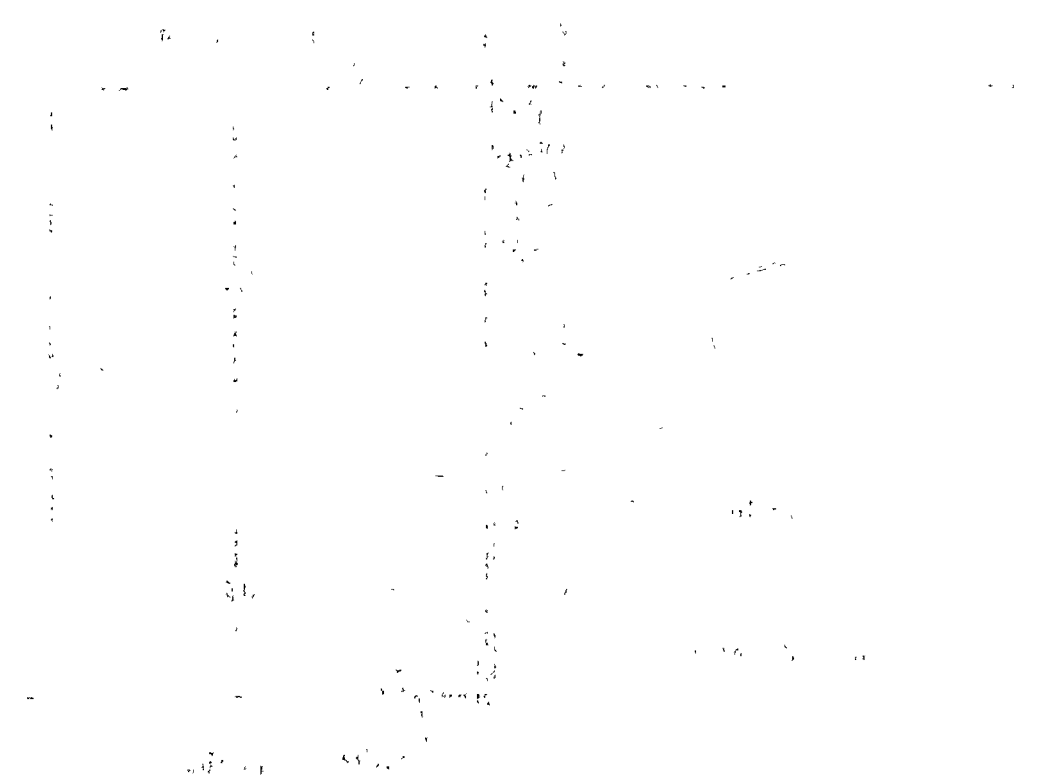
C O R T E



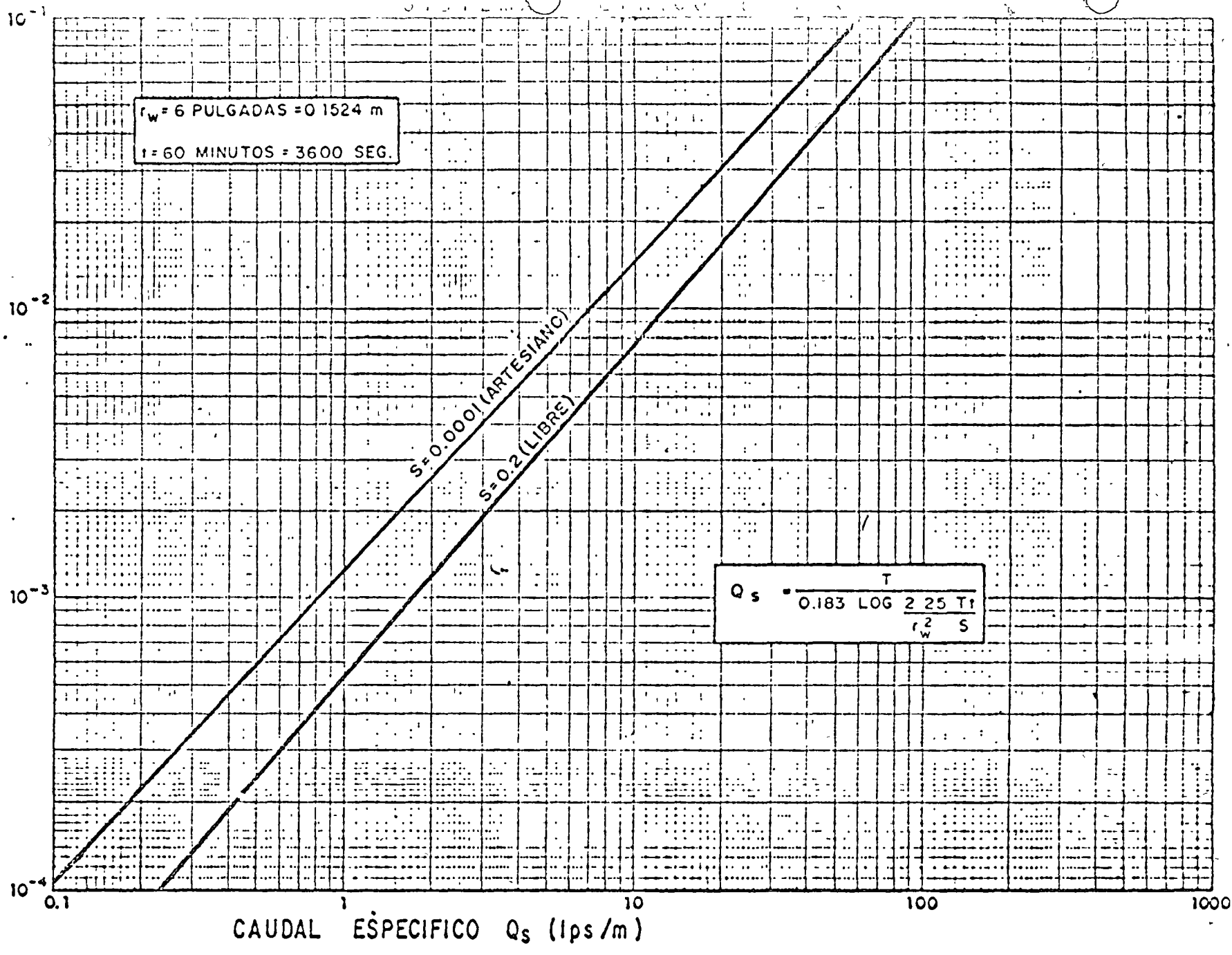
TUBERIA RANURADA

P L A N T A





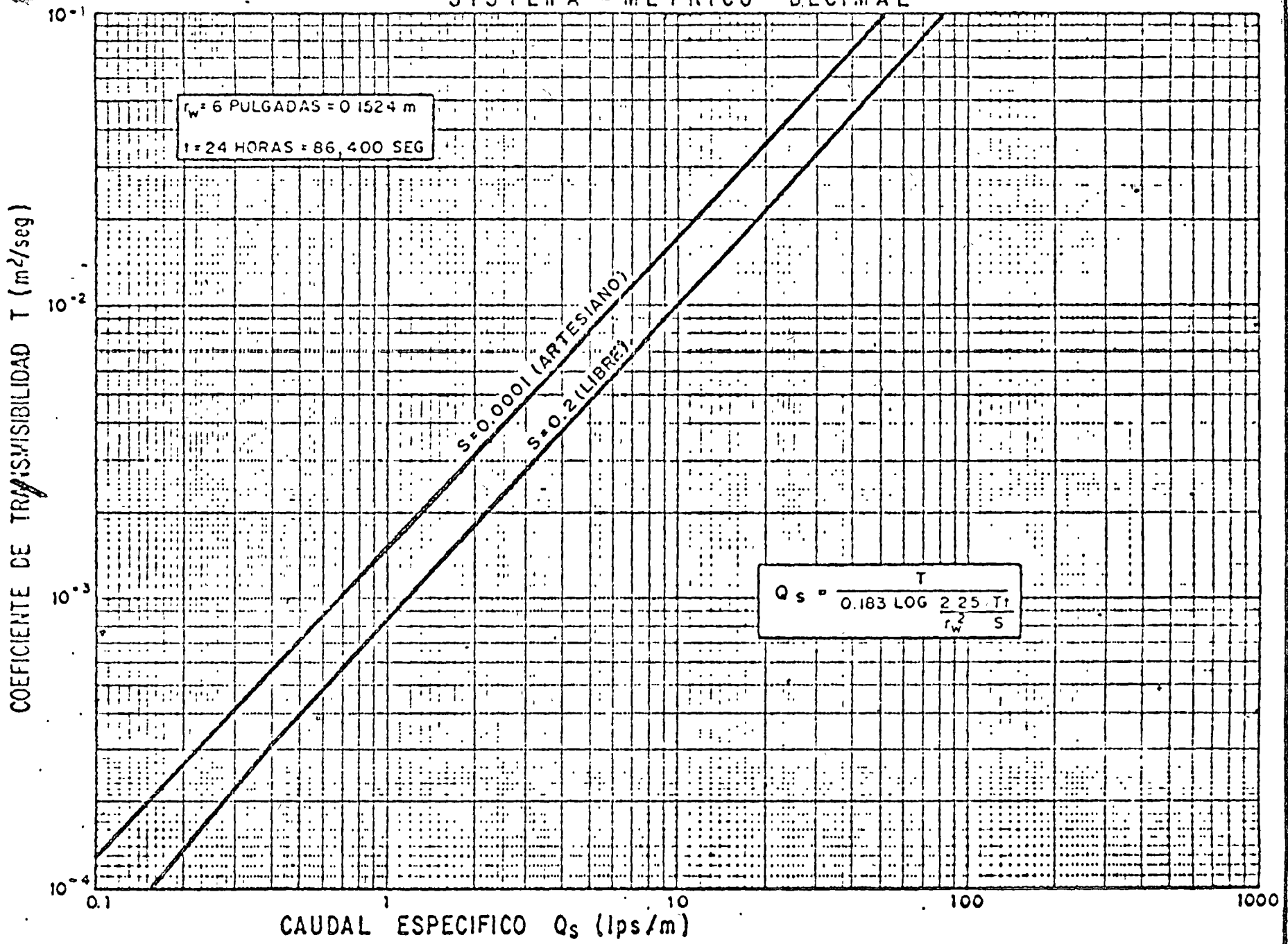
COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD T (m<sup>2</sup>/seg)





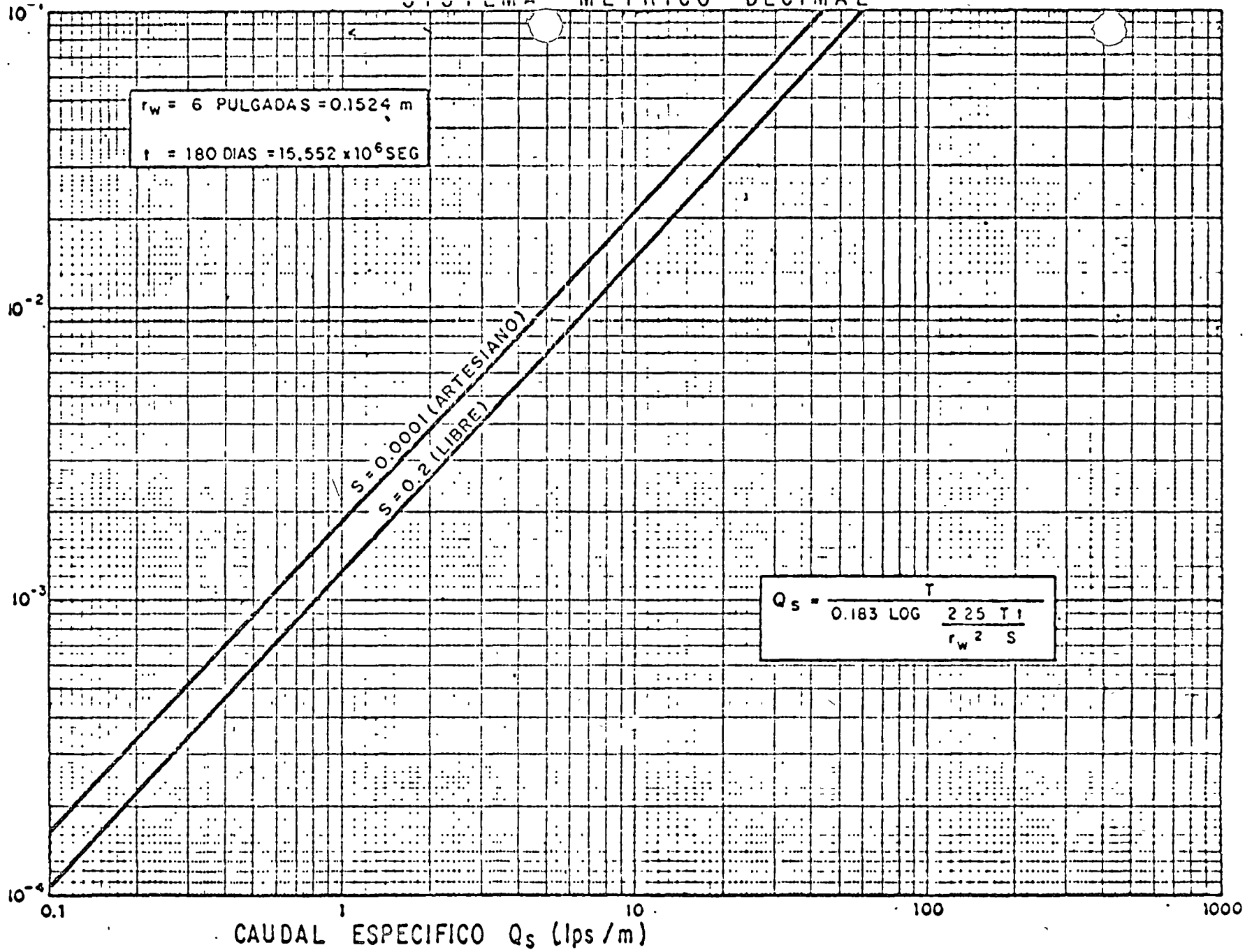


SISTEMA METRICO DECIMAL

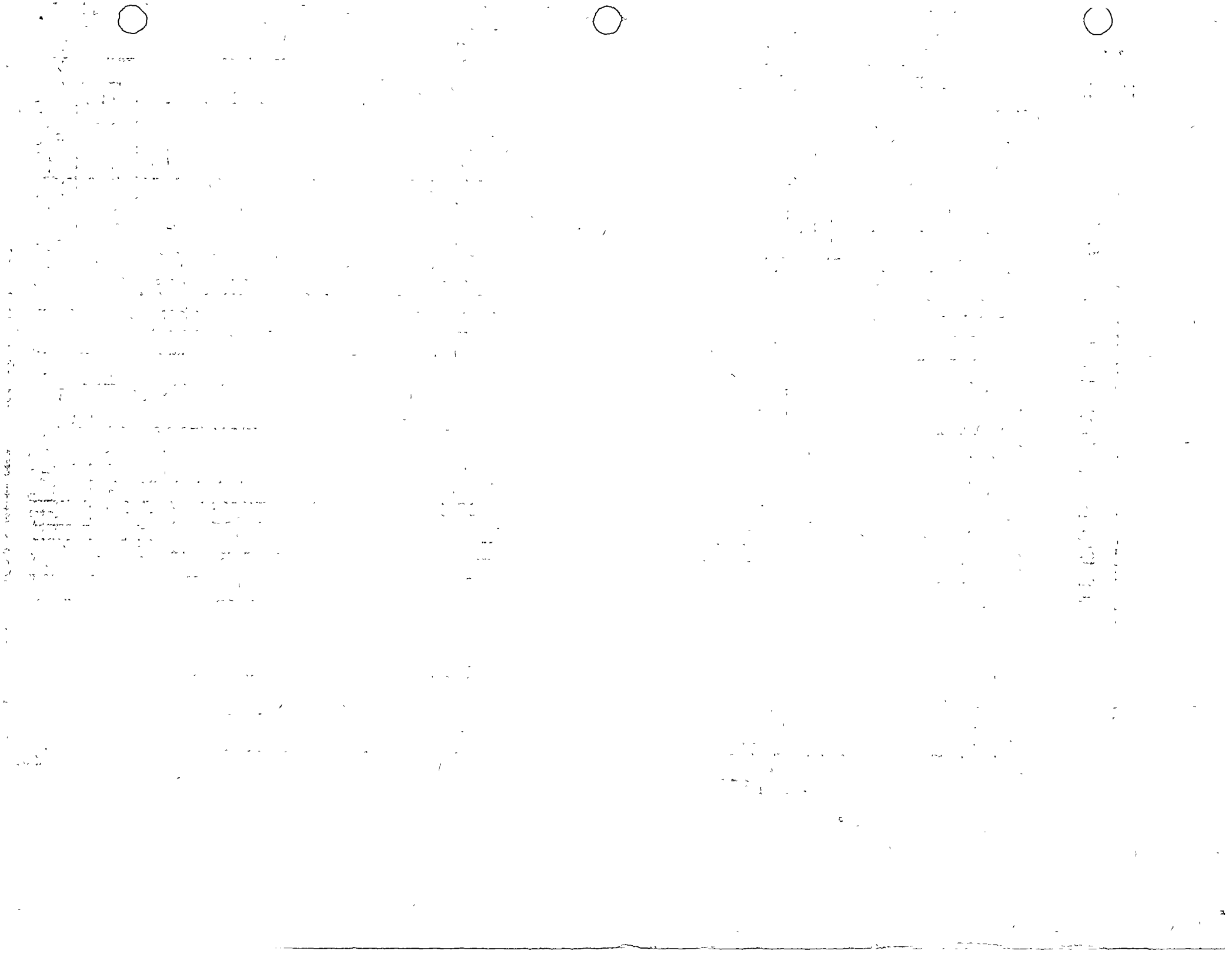


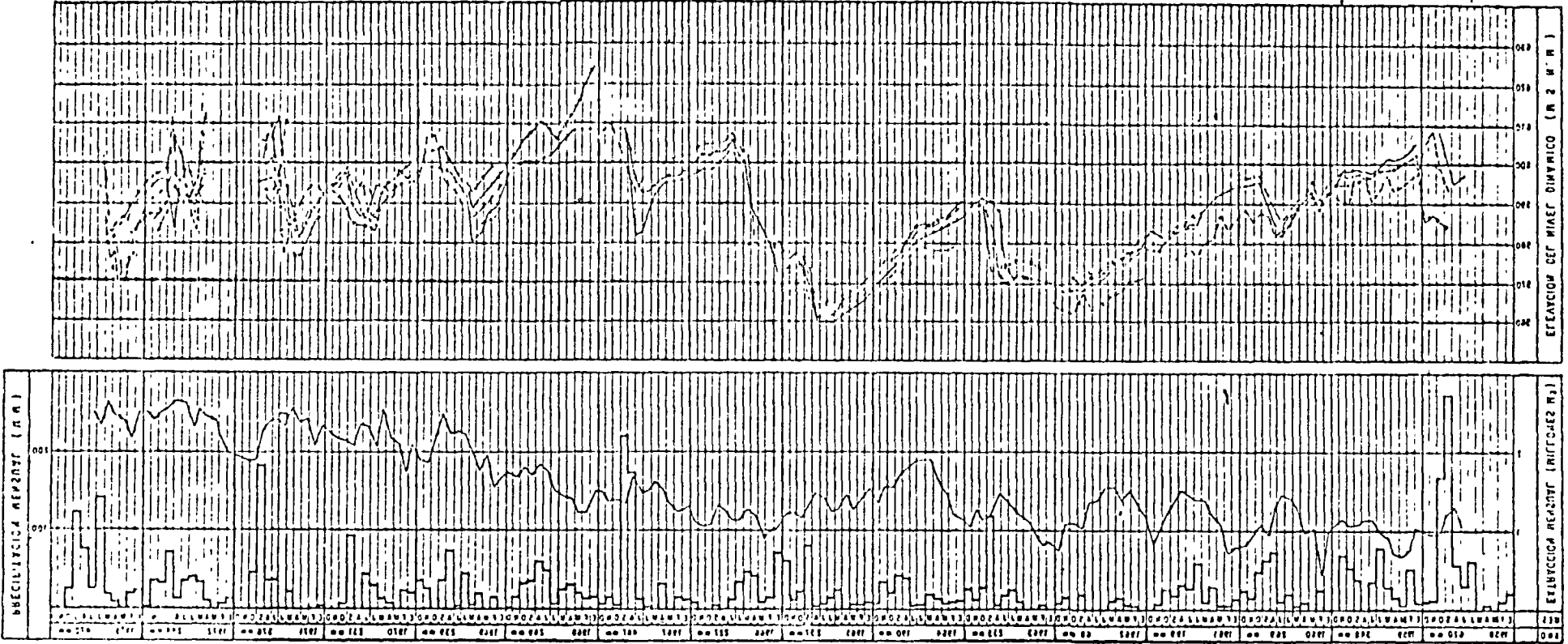


COEFICIENTE DE TRANSMISIBILIDAD T (m<sup>2</sup>/seg)



CAUDAL ESPECIFICO  $Q_s$  (lps / m)





NOTA: Datos de precipitación obtenidos de estación climatológica Minca.

POZO	ELEVACION DE BOCAL (m. n. m.)	SIMBOLOGIA
MINA 1	604.50	—
MINA 2	611.50	- - - - -
MINA 3	618.00	- - - - -
MINA 6	627.70	- - - - -
MINA 7	600.20	- - - - -
MINA 10	620.00	- - - - -

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
 EVOLUCION PIEZOMETRICA, VOLUMENES  
 DE EXTRACCION Y PRECIPITACION PLUVIAL  
 CAMPO DE POZOS MINA MONTERREY N. L.  
 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA ESTACION  
 DE MONITOREO DE LOS POZOS MINA MONTERREY N. L.

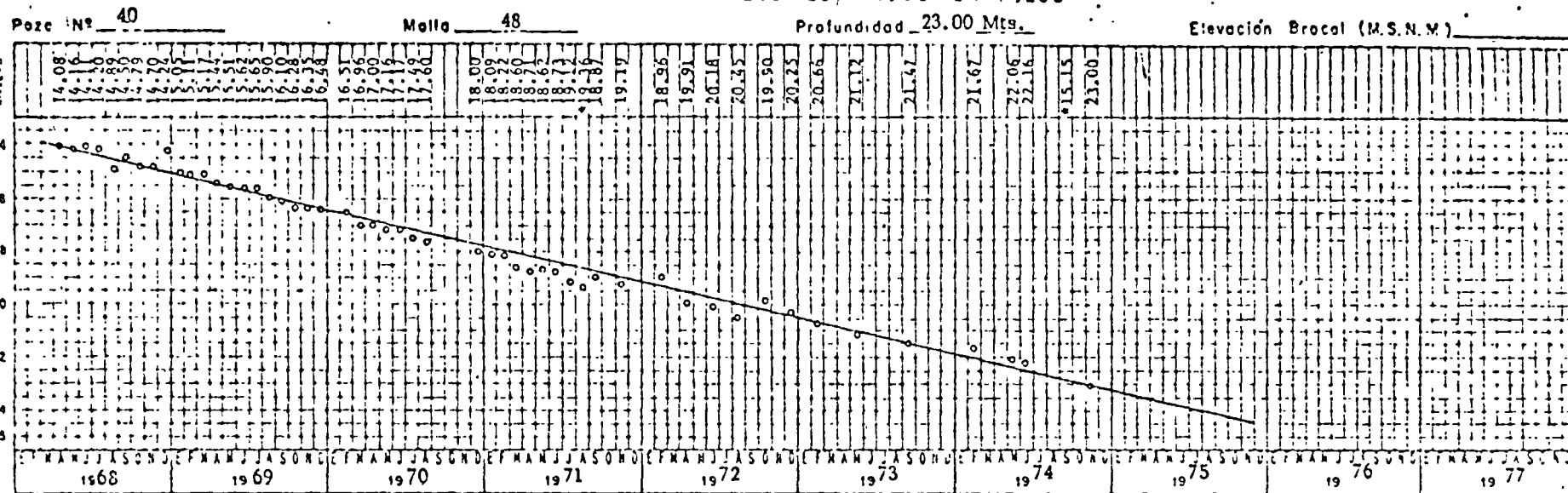
Escala: 1:1000  
 Dibujo: 1000  
 1920



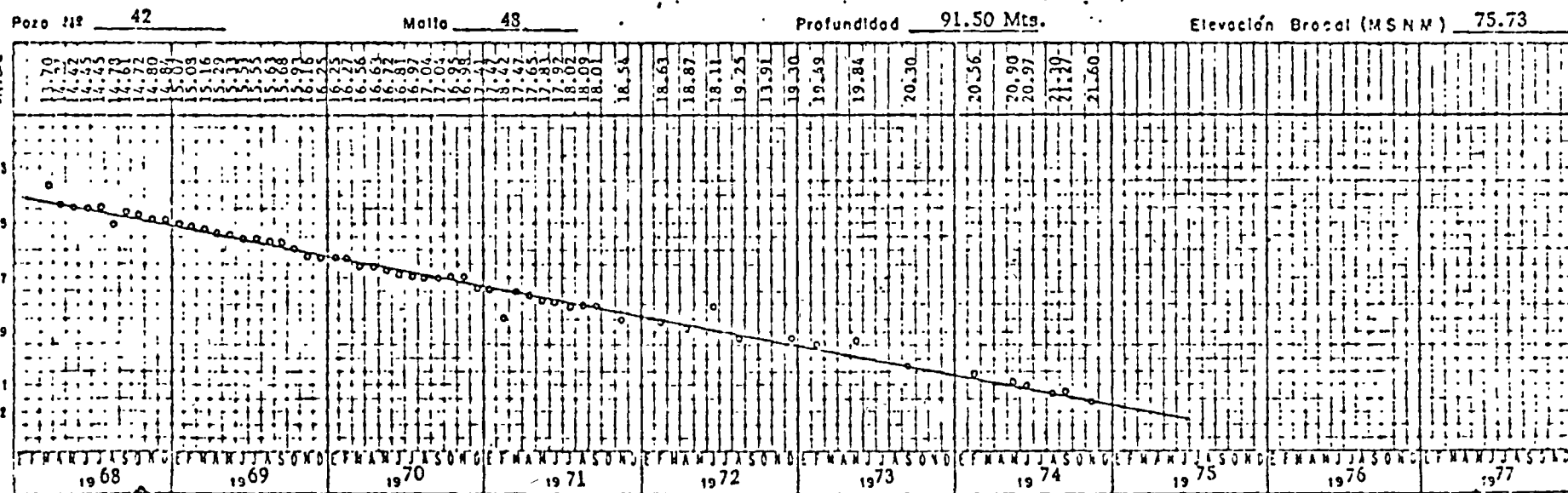
# TECNICAS MODERNAS DE INGENIERIA S.A.

## ESTUDIO GEOHIDROLOGICO DEL VALLE DE SAN JOSE DEL CABO

REGISTRO DE NIVELES ESTATICOS EN POZOS



Gráfica V.2.3



Gráfica V.2.4



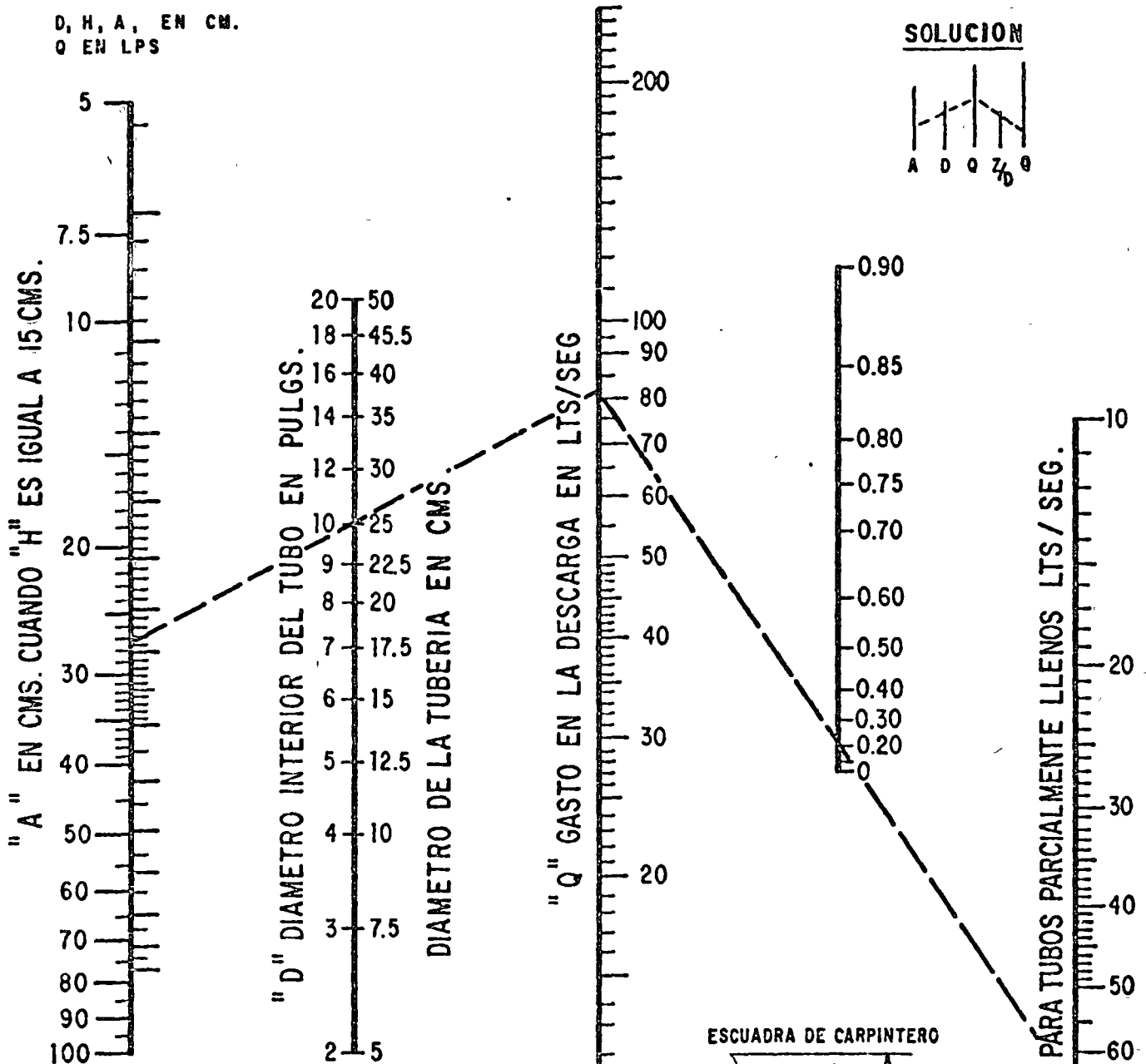


# NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL GASTO A TRAVES DE UN TUBO

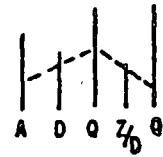
FORMULA RESUELTA

$$Q = 0.0174 \frac{A D^2}{\sqrt{H}}$$

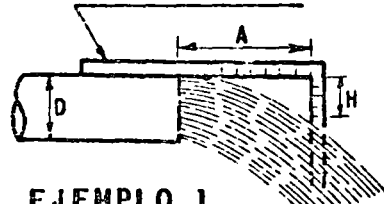
D, H, A, EN CM.  
Q EN LPS



SOLUCION



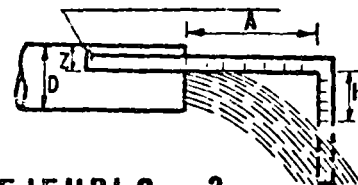
ESCUADRA DE CARPINTERO  
O REGLA PLEGADIZA



**EJEMPLO 1**  
**TUBO LLENO**

- ) EL DIAMETRO DEL TUBO 25 (10")
- ) "A" = 27.5 cm.
- ) "H" = 15 cm.
- ) "Q" = 81 LTS./SEG.

ESCUADRA DE CARPINTERO



**EJEMPLO 2**  
**TUBO PARCIALMENTE LLENO**

- ) EL DIAMETRO DEL TUBO 25 (10")
- ) "A" = 27.5 cm.
- ) "H" = 15 cm.
- ) "Z" = 5 cm.

$$Z/D = \frac{\text{FALTANTE}}{\text{DIAMETRO}} = \frac{5}{25} = \frac{1}{5} = 0.20$$

Q = 68 LTS/SEG.

7-21-77

[The body of the document contains extremely faint and illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is scattered across the page and does not form any recognizable words or sentences.]



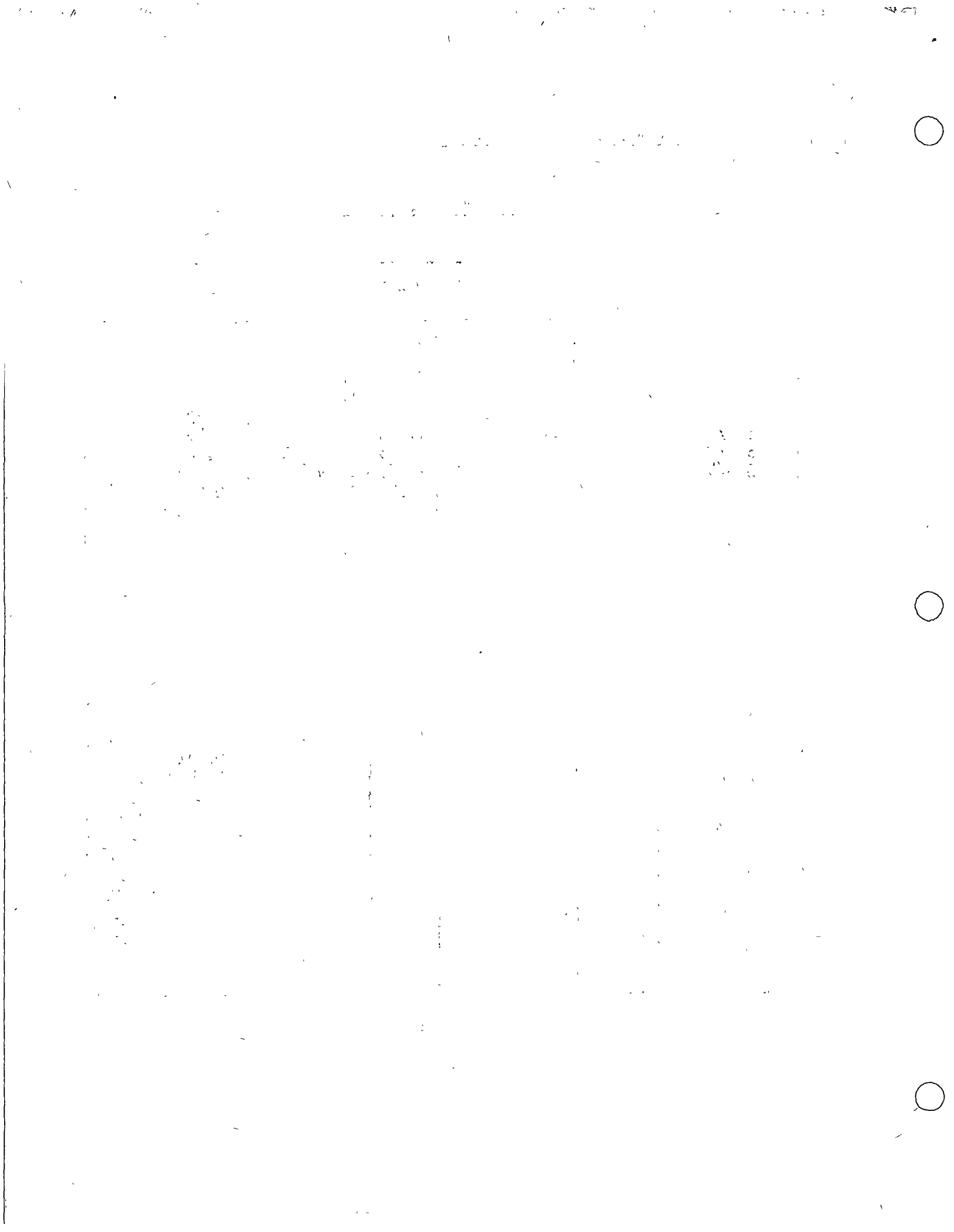
VALORES DEL COEFICIENTE  
DE  
DESCARGA K' EN TUBERIAS

DIAMETRO DE ORIFICIO (")	DIAMETRO DE DESCARGA EN PULGADAS							
	3	4	5	6	7	8	10	12
2	0.639	0.453	0.562	0.553				
2 1/4	0.892	0.960	0.716	0.706	0.697			
2 1/2	1.243	0.973	0.901	0.881	0.870	0.859		
2 3/4		1.256	1.117	1.074	1.057	1.048		
3		1.862	1.365	1.298	1.276	1.253	1.231	
3 1/4		2.406	1.666	1.553	1.503	1.482	1.461	
3 1/2			2.014	1.845	1.767	1.736	1.706	
3 3/4			2.306	2.165	2.061	2.005	1.963	1.939
4			3.097	2.546	2.387	2.308	2.248	2.220
4 1/4				2.979	2.759	2.648	2.558	2.513
4 1/2				3.575	3.172	3.021	2.890	2.830
4 3/4				4.206	3.615	3.420	3.240	3.162
5				4.973	4.177	3.854	3.606	3.531
5 1/4					4.862	4.350	4.024	3.904
5 1/2					5.259	4.889	4.476	4.310
5 3/4					6.572	5.546	4.954	4.749
6						6.356	5.479	5.192
6 1/4						7.280	6.019	5.698
6 1/2						8.299	6.650	6.213
6 3/4							7.303	6.794
7							8.042	7.396
7 1/4							8.883	8.008
7 1/2							9.931	8.686
7 3/4							11.047	9.405
8							12.334	10.185
8 1/4							13.533	10.996
8 1/2								11.930
8 3/4								13.016
9								14.301
9 1/4								15.523
9 1/2								17.454
9 3/4								18.667
10								19.893

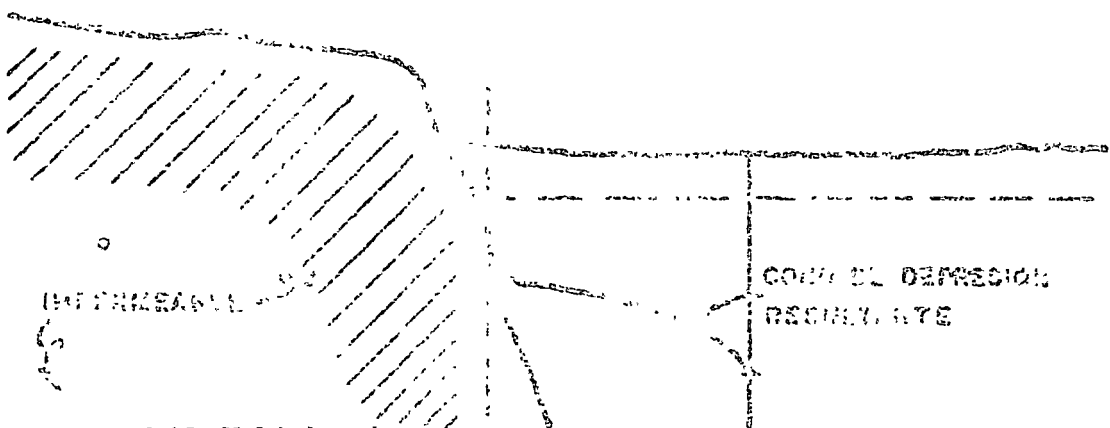
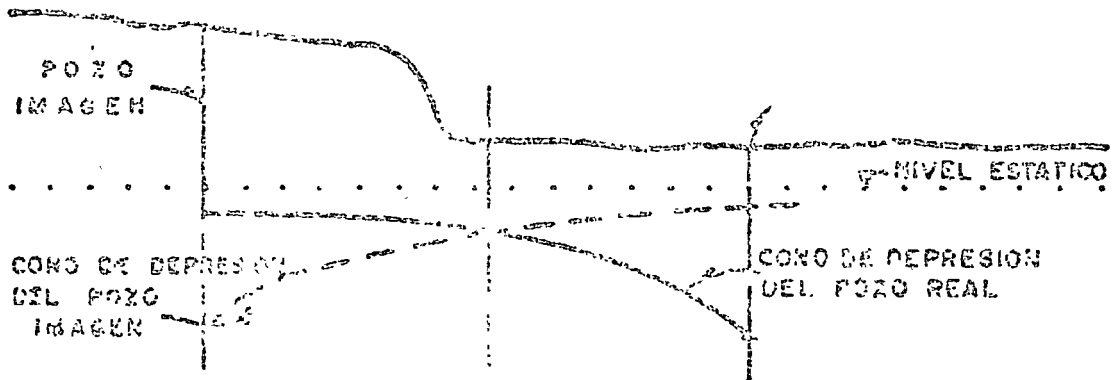
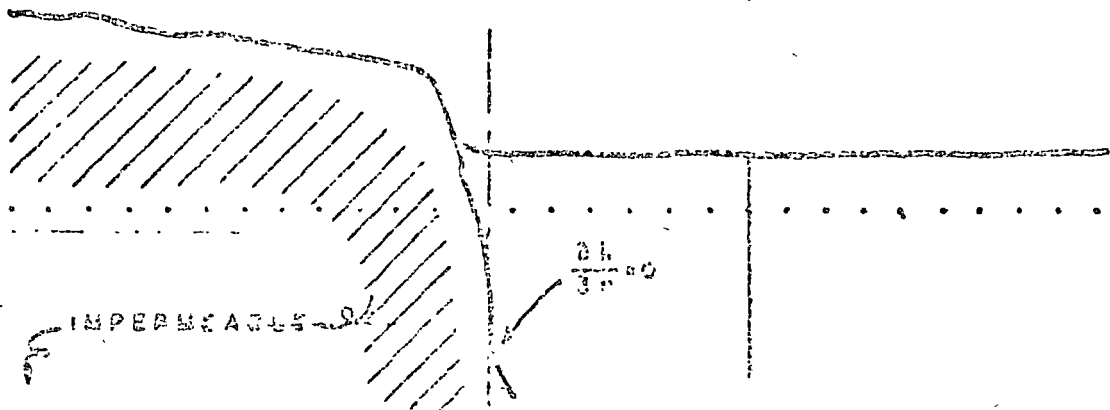
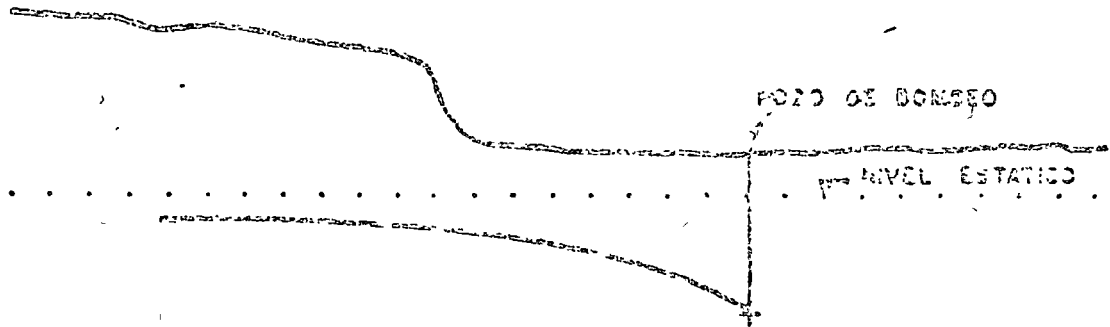
$$Q = K' h$$

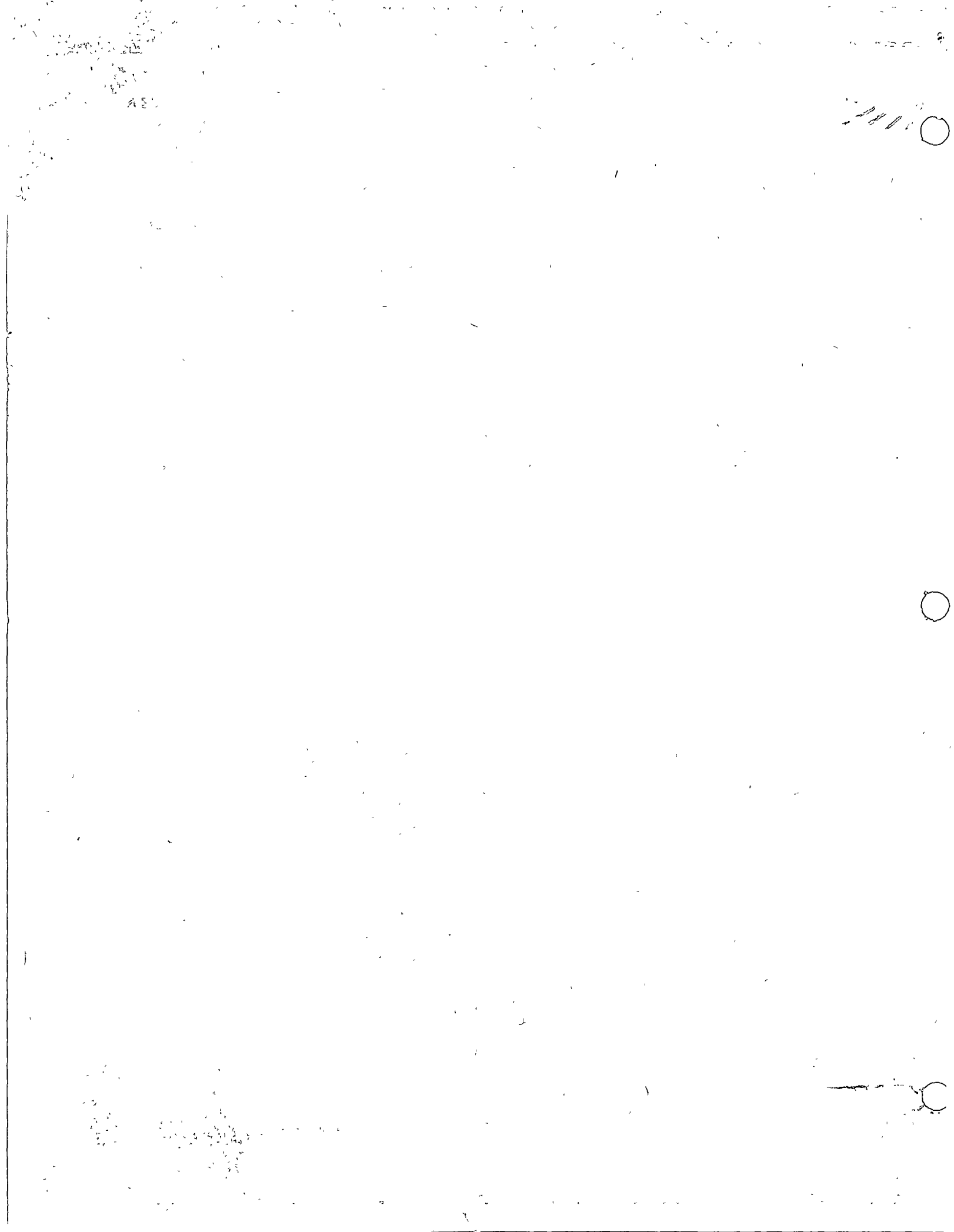
Q en lps

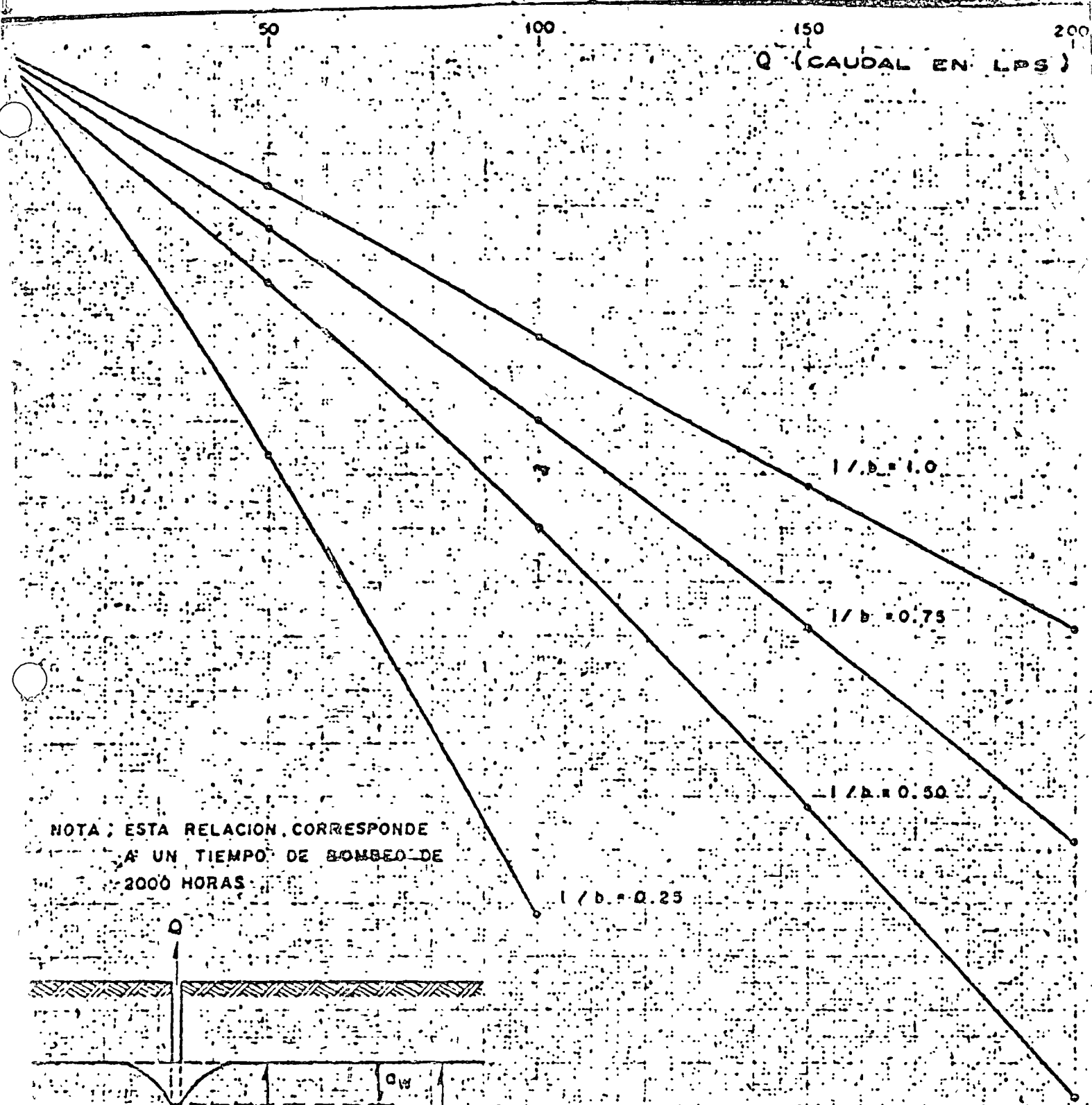
h en cm.



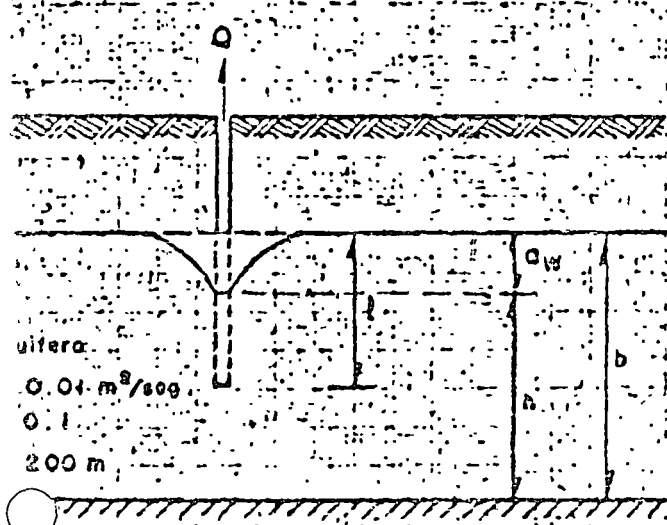
# EFFECTO DE UNA FRONTERA LATERAL SOBRE EL CONO DE DEPRESION DE UN POZO





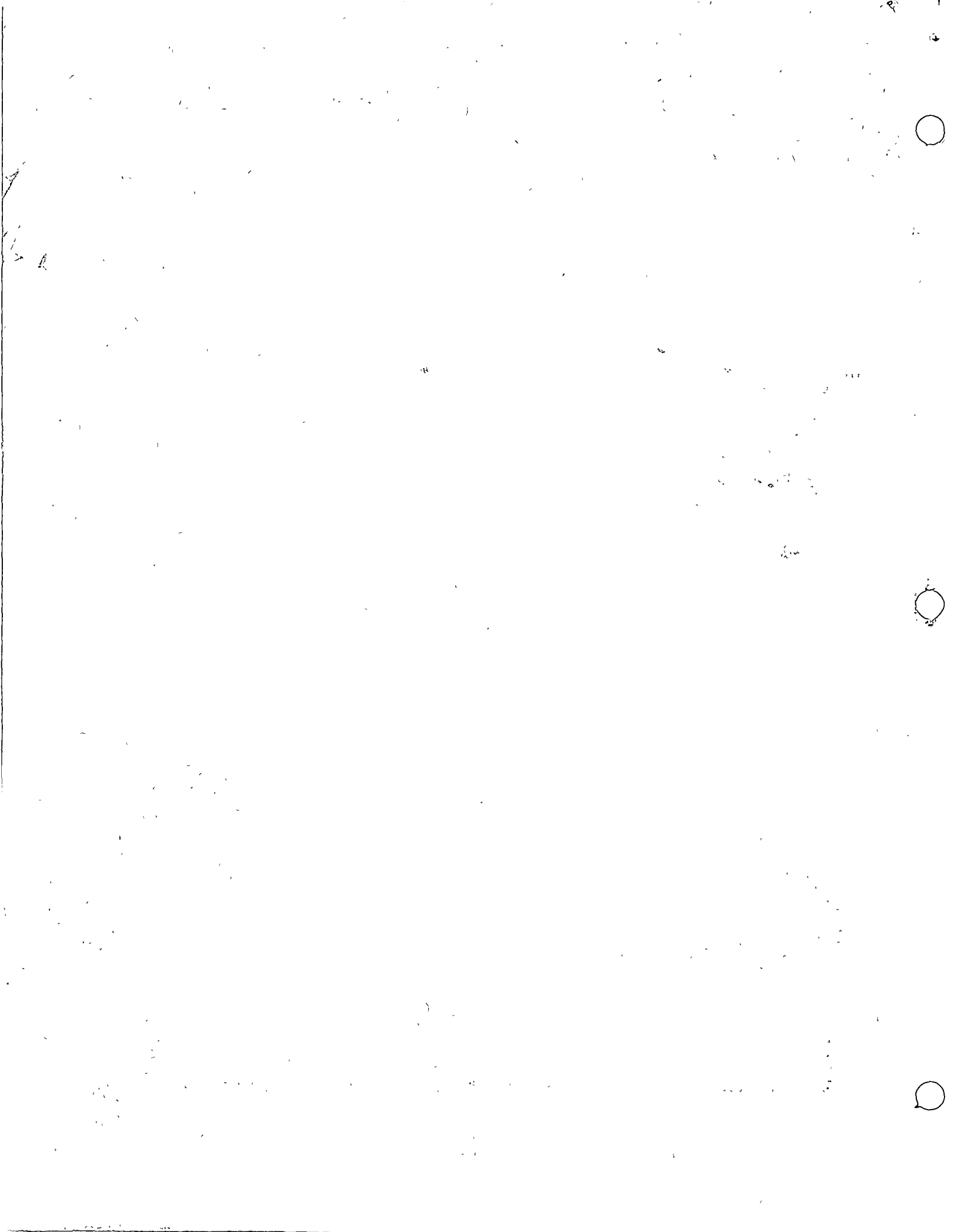


NOTA: ESTA RELACION CORRESPONDE  
A UN TIEMPO DE BOMBEO DE  
2000 HORAS.

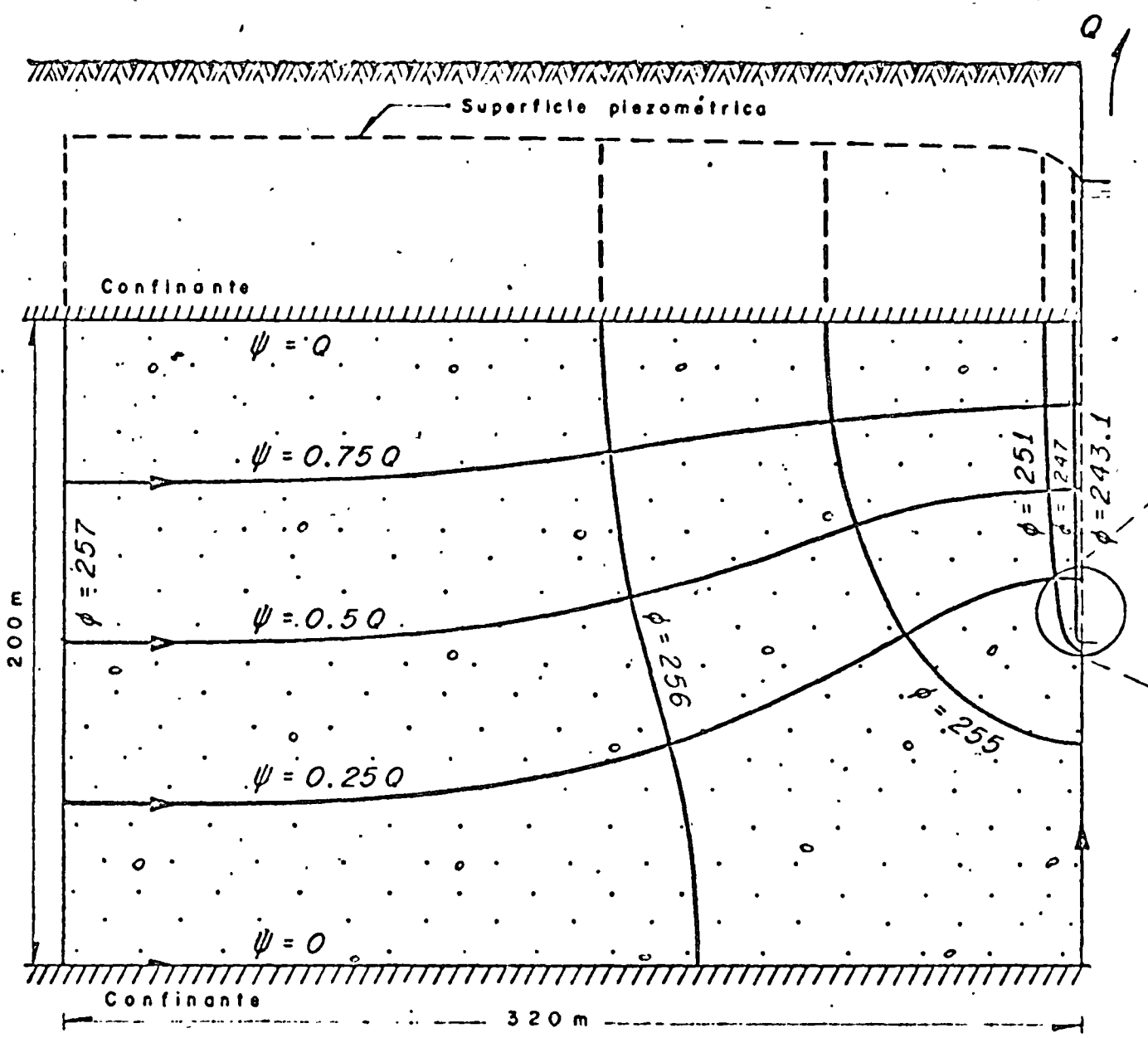


Acuifera:  
 $0.04 \text{ m}^2/\text{seg}$   
 0.1  
 200 m

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS JEFATURA DE IRRIGACION Y CONTROL DE RIOS DIRECCION DE AGUAS SUBTERRANEAS
POZOS PARCIALMENTE PENETRANTES RELACION $Q - Q_w = l/b$ ACUIFERO LIBRE
Confirma: _____ EL DIRECTOR

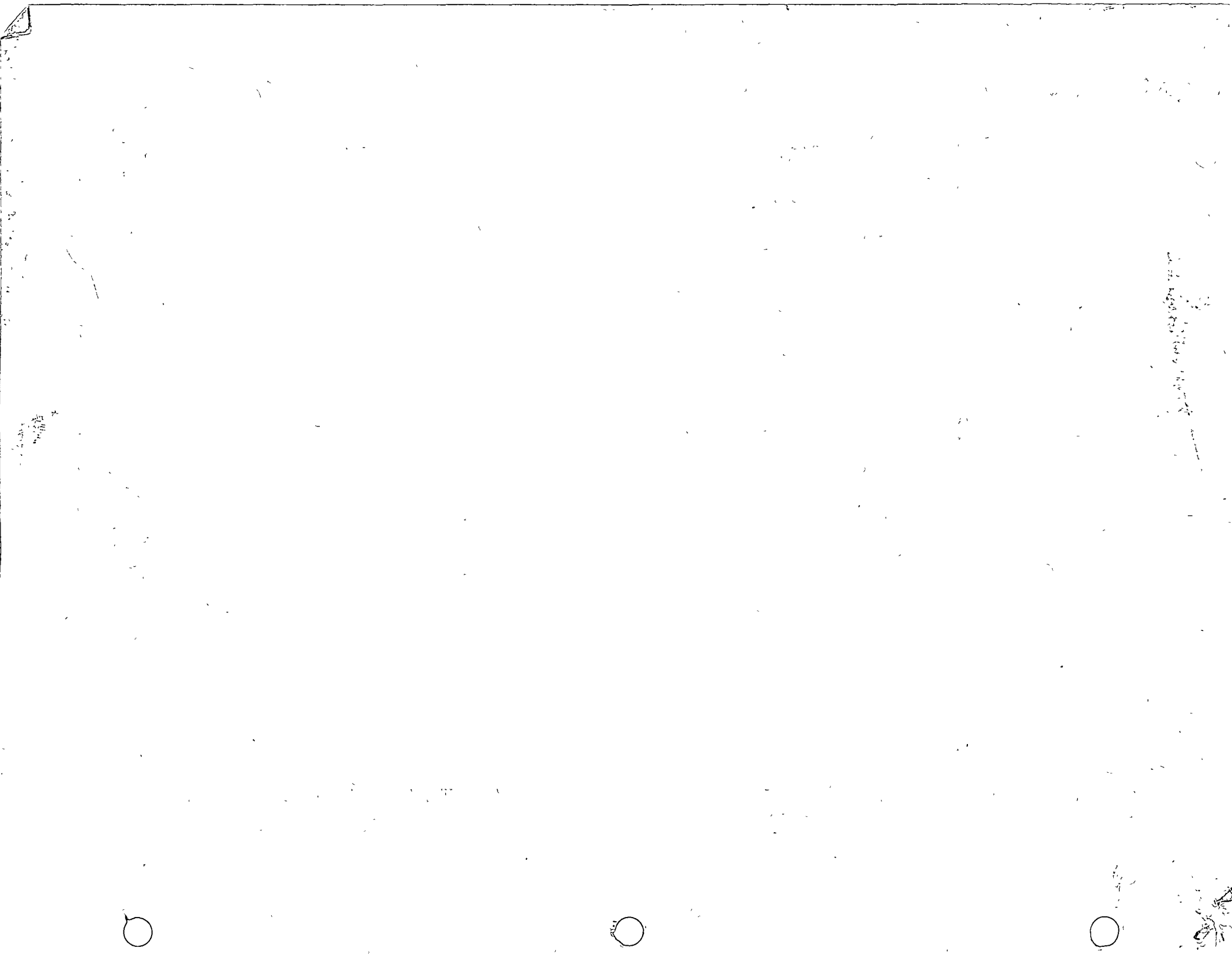






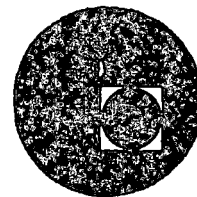
ESCALA 1 : 2000

NOTA : La red de flujo corresponde a un tiempo de bombeo de 2000 días, con un caudal constante de 150 lps. en un acuífero de -





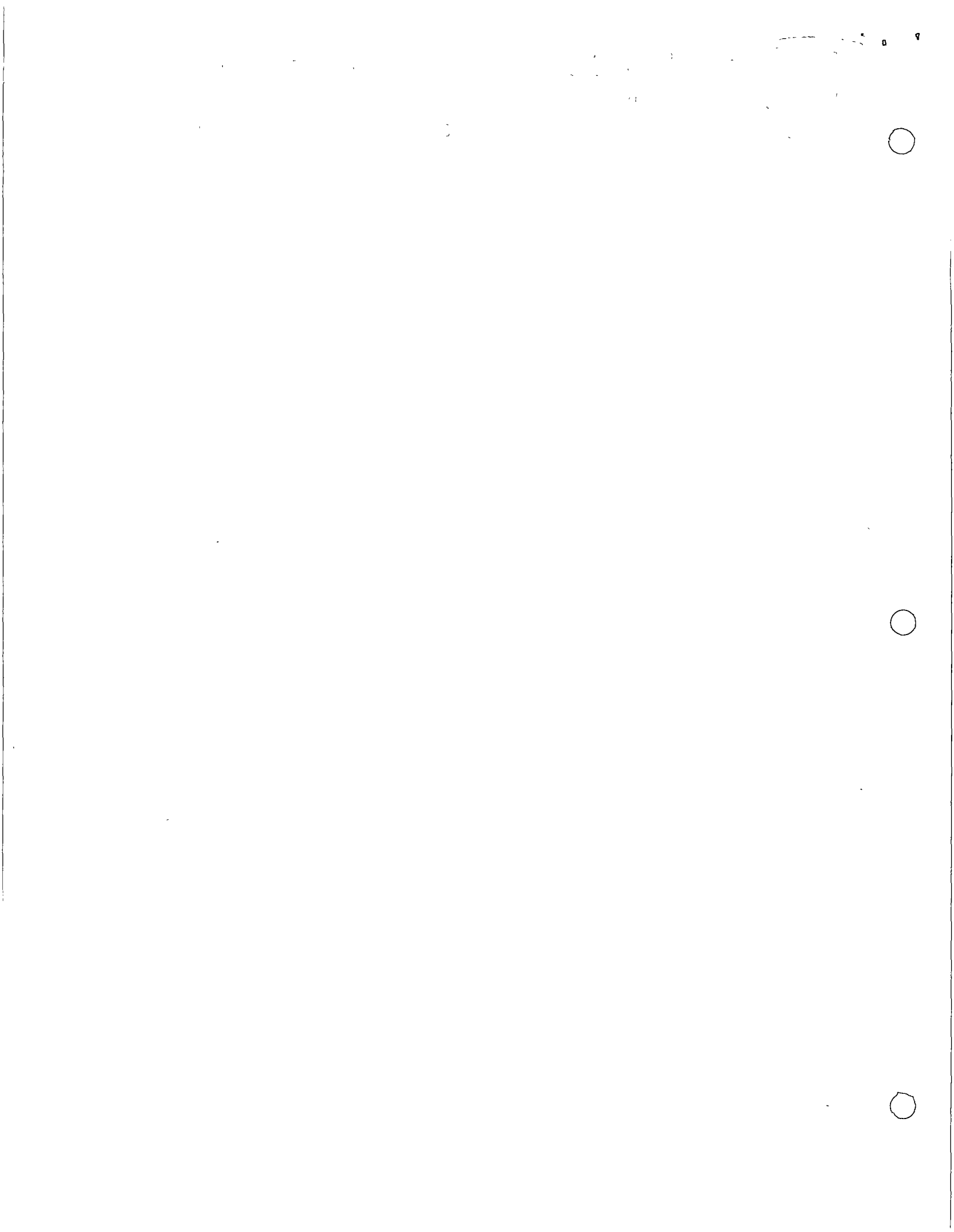
centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUBTERRANEA

Planeación de los Recursos Hidráulicos Subterráneos

Dr. Pedro Reyes Ortega



## PLANEACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUBTERRANEOS

### Los Recursos Hidráulicos Subterráneos y el Desarrollo Económico

#### 1. La actual concepción del Desarrollo Económico

- \* Eficiencia y crecimiento
- \* Depauperización de la población y nivel de empleo
  - Consumos privados y sociales
- \* Estabilidad económica.

#### 2. Limitaciones del desarrollo

- \* Inversión - ahorro
- \* Gastos de gobierno y Sistema Tributario
- \* Sector externo
  - \*\* Balanza comercial y precios de intercambio
  - \*\* Balanza de capitales
  - \*\* Deuda
- \* Recursos tecnológicos
- \* Recursos energéticos
- \* Recursos hidráulicos
  - Plan Nacional Hidráulico. Uso de aguas subterráneas.

#### 3. Planeación económico - social integral, y el porqué de su existencia.

4. Planeación nacional y métodos regionales.

Ventajas de este nivel de agregación frente a los globales y frente a los muy específicos; características para definir una regionalización.

5. Métodos sectoriales : I-0.

Análisis de actividades.

6. Necesidad de contar con análisis, oferta - demanda sectoriales y regionales de bienes y servicios, a partir de un plan nacional.

7. La ubicación de los recursos hidráulicos en los planes de desarrollo, y el papel de los recursos hidráulicos subterráneos actuales y potenciales en el sector agrícola y de servicios

- Características sobre su uso y restricciones.

8. Usos alternos y su posible evaluación; determinación de precios de los servicios.

9. Otra vez, importancia de la explotación racional de los recursos hidráulicos subterráneos; dos tipos : vía precios, vía cantidades y controles. Complementación con técnicas que ahorren el consumo y gasto de agua.

10. Financiamiento en la explotación : via precios, via créditos directos, via impuestos.

ANEXO: La Explotación de los Recursos Hidráulicos -  
Subterráneos (Criterios de Manejo).

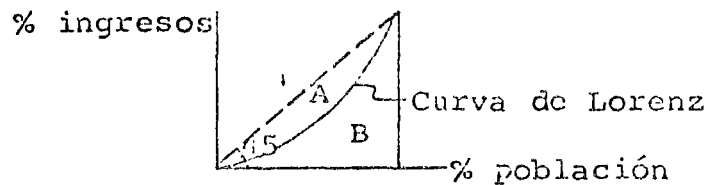
El tema que me toca desarrollar aquí con ustedes, es sobre lo que podríamos titular los recursos hidráulicos subterráneos en relación y su posición en el desarrollo económico del país.

En primera instancia, trataremos de dar algunas generalidades sobre la actual concepción del desarrollo económico, sus limitaciones y la ubicación de los recursos hidráulicos en este marco económico. Después, veremos la planeación económico-social de tipo integral, algunos métodos muy generales usados en ella y la ubicación dentro de estos métodos de los recursos aguas subterráneas; finalmente se verá algún tipo de evaluación y determinación de precios de los servicios atendidos por aguas subterráneas. Esencialmente el desarrollo económico ha <sup>en</sup> tenido/el país dos etapas muy bien marcadas, una de ellas se observa a partir de que toma la presidencia Miguel Alemán. Con él se estructura un tipo de desarrollo económico que más bien ha recibido el término de crecimiento económico para distinguirlo como vamos a verlo posteriormente, de la nueva connotación que se le ha dado. Esencialmente el desarrollo económico consistía en asignar una



cantidad de inversiones de tal magnitud, que vía su capitalización se lograrian tasas muy altas de crecimiento del producto nacional o del ingreso nacional. Asimismo, se suponía que en forma automática la tecnología, la modernización de las instituciones y la distribución del ingreso se iban a lograr en forma automática. Es decir, se necesitaba una inversión de tal magnitud que se lograra el famoso "despegue económico". Sin embargo, a través del tiempo se observa que la hipótesis que podríamos llamarle de depauperización - eficiencia no se ha aceptado; así, las mediciones que se han hecho desde 1950 a la fecha sobre la llamada distribución del ingreso muestran que cada vez va siendo más concentrado. Esto significa que la riqueza que se genera ( y a su vez el ingreso que esta riqueza genera ) no solamente expresada en unidades físicas como maquinaria, obras hidráulicas etc, sino también en riqueza de capital humano, en otras palabras educación, se ha concentrado en unos cuantos miembros de la población. Desde otro punto de vista, significa que en la medida que el tiempo transcurre los pobres van siendo cada vez más pobres, en términos relativos, y los ricos van concentrando una parte creciente del ingreso mencionado. Simplificadamente los métodos económicos se refieren a la curva -

de Lorenz y el coeficiente de Gini; así, se llevan en términos de porcentaje los valores acumulativos de la población y de los ingresos correspondientes. La línea de 45° representa la equidistribución o sea la mejor distribución del ingreso. Desafortunadamente para el país lo que está ocurriendo es que la curva de Lorenz cada vez más se ha separado de la línea de 45°.



$$\frac{A}{A+B} = \text{Coeficiente de Gini}$$

Es decir, que existe un mayor grado de concentración del ingreso en el país. Efectivamente, el coeficiente de Gini definido como el área A dividida por el área A + B (Ver figura) ha aumentado, así sus valores han sido aproximadamente de .5 para 1950 .54 para 1958 más o menos y así hasta llegar a .6 para 1972, lo que significa que definitivamente la tesis desarrollista ha sobrevivido por muchos sexenios después de Alemán. Ante esta realidad ha ocurrido que los campesinos, los obreros, cada vez ven el poder adquisitivo de sus salarios más bajo ( que significa que con

lo que ganan cada vez adquieren menos bienes de consumo). Este fenómeno llevado a un extremo puede dar lugar a una descomposición de tipo social que bien puede traducirse en movimientos que pueden ser de lo más pacíficos o movimientos armados. Por otro lado vean ustedes ha emergido una clase rica que concentra el ingreso y que además compra bienes en mercados que son definitivamente prohibitivos para un gran cúmulo de obreros y de campesinos. Esto es muy importante, porque así como ha ocurrido que existe una concentración de la riqueza y del ingreso, también ha dado como consecuencia por las finalidades de la inversión, que quienes están disfrutando fundamentalmente de la infraestructura que el sector público crea han sido los capitanes de empresa y nosotros que hemos aprovechado la infraestructura educativa creando inversión en capital humano; esto significa que los recursos hidráulicos no escapan del comportamiento enunciado. Así se puede constatar la existencia de una agricultura de riego contra una agricultura de subsistencia en donde verdaderamente apenas si se logra una producción a niveles tan bajos que apenas si alcanza para sobrevivir, y que agrupan al 34% de la población eco-

nómicamente activa dedicada a las labores del campo.

La concepción actual de desarrollo económico considera que el crecimiento y la depauperización se dan en forma conjunta. Desde este punto de vista existen dos formas de redistribuirlo básicamente: vía aumento de salarios y empleo que da lugar a que las familias incrementen su poder adquisitivo. La otra que también es fundamental, es la

llamada redistribución o distribución secundaria del ingreso, y que significa que el gobierno definitivamente debe actuar para que vía consumo-social aumente el bienestar de la población. Entendiéndo por consumo social los siguientes: niveles mínimos de educación, niveles mínimos de salud, vivienda, alcantarillado y agua potable. Esencialmente estos cuatro tipos de servicios, son a través de los cuales se refleja el consumo social que debe provenir del sector-gobierno. Concluimos diciendo que el desarrollo económico caracterizado en aquella época por ser "estabilizador" fué favorable para los inversionistas a los que además se les subsidió con materias primas baratas y precios estables.

## Limitaciones al desarrollo económico.

Esencialmente las restricciones se manifiestan a través de lo siguiente; tenemos como primer punto que actualmente el país en forma interna no es capaz de generar el ahorro suficiente que se pueda poner a disposición de los capitales de empresa o industriales o quien quiera que sean los innovadores, para que vía préstamos se conviertan en bienes de capital la acumulación de éstos, el crecimiento del producto nacional siga su ritmo o un ritmo mayor. Dado que somos un país que requerimos de altos niveles de importación del ingreso generado tiene que salir del país para pagar - bienes de capital que se compran y materias intermedias - que se adquieren y también pagar servicios de intereses y de deudas. Entonces aquí surge la grave crisis actual - que corresponde al famoso déficit tanto de la balanza comercial como de la balanza de pagos que incluye todos los servicios de la deuda. Es decir nuestras exportaciones - están llendo a tal ritmo que prácticamente las importaciones doblan su valor. Esto acumulado a través del tiempo - da lugar a un país totalmente endrogado, pero que tiene - que estar constantemente distrayendo una cantidad de recur

Los y de bienes que produce para pagar esa deuda. Lo que da lugar a que el ahorro interno se ve minimizado. El camino que se ha estado siguiendo para financiar el desarrollo es pedir prestado al exterior; pero qué significa, significa que otra vez vía balanza negativa de capitales se llega a tales niveles que hay que pedir prestado ya no para financiar nuestro desarrollo, sino para pagar intereses. Existen varias formas para salir que pueden ser desde una devaluación que se ha dicho por ejemplo que quizá funcione un par de años y después se recuperen los precios y seguimos igual, o bien un control de cambios, o bien definitivamente que es a lo que se tiene que tender a un mediano plazo es a fortalecer el sector productivo. En otras palabras la única forma de disminuir las importaciones es que el sistema productivo de la economía nacional se fortalezca, que las plantas trabajen su capacidad instalada, que se genere inversión. O puesto de otra forma, que estructuralmente dejemos de ser un país terriblemente dependiente no solo financieramente, sino también tecnológicamente. Así, pudiera ser que estuviésemos importando bienes de capital y como país petrolero en un momento dado se descubra un manto muy grande -

que sirva para financiar el desarrollo. De todos modos seguiremos teniendo una dependencia con características tecnológicas que ya en sí nos va a poner no en la vanguardia sino en la retaguardia del crecimiento. Otra limitación es que nuestro sistema fiscal, esencialmente el sistema tributario, no es capaz de captar en este momento el volumen de ingresos que en gran medida requiere no solamente para los consumos sociales que mencionamos, sino también para financiar una serie de obras de tipo de infraestructura que bien pudiera ser como ahora ustedes conocen el presupuesto, gran parte de él se ha dedicado a recursos hidráulicos, plan nacional hidráulico, etc. Es esencial, puesto que gran parte de los programas no alcanzan los niveles deseados, porque sencillamente nuestro sistema tributario no es capaz de generar los recursos suficientes que se destinan a esta parte del presupuesto. Comparativamente, en México aproximadamente el 11% del producto nacional bruto se colecta por el Estado, en Chile y Argentina alrededor del 15 al 20%; en el caso de Suecia, aproximadamente el 40%, esto significa que México debe contraer deudas para que se financien muchas de las obras y se satisfaga los consumos sociales mínimo. -

Finalmente quisiera mencionar dos puntos adicionales a estas limitaciones que en cierta forma anunciamos, que son - las limitaciones de energéticos y de recursos hidráulicos.

Nos referimos a los últimos. Primero, sabemos desafortu-  
nadamente para el país, <sup>que</sup> gran parte de nuestra energía eléc-  
trica ya no puede provenir de la explotación de servicios  
hidráulicos; punto número dos, somos un país con una de -  
las más grandes tasas de explosión demográfica y, la pro-  
ducción de productos agrícolas no ha seguido desafortunada-  
mente el ritmo que había seguido para mantener esta pobla-  
ción bajo ciertos estándares esencialmente porque los re-  
cursos hidráulicos ya en su aplicación o sea ya incluyendo  
las obras de infraestructura necesarias para ser usadas, -  
no son actualmente suficientes, y aun en el caso de que tu-  
viésemos el capital para tratar de hacerlo, no serían sufi-  
cientes con los fines de irrigación que se desean. Ac-  
tualmente hay cerca de 25 mil ejidos de los cuales unos -  
cuantos están sujetos a tener obras de riego. Por otra -  
parte, tenemos los otros dos tipos de vías del agua, funda-  
mental, servicios industriales y servicios urbanos, donde  
tenemos también una restricción muy fuerte e incluso uste-  
des la conocen a niveles de algunas ciudades. A nivel de



tipo industrial, el costo de llevar el agua, etc., ya supera el hecho de tener mejor una planta en tratamiento en algunas ciudades. Entonces ya es un recurso que no podemos considerar como libre, por lo que no se le puede dar un precio de cero.

Todo lo anterior nos lleva a que bajo el objetivo que tenemos de desarrollo (eficiencia y bienestar), y por otro lado bajo severas limitaciones solo se puede hacer planeación integral que busque hacer el uso más racional de los recursos que tengamos a nuestra disposición, esto es lo más importante o sea, si nosotros fijamos ciertas metas de crecimiento de la economía de nuestro país de bienestar social, de desarrollo económico social y si tenemos una serie de limitaciones, entonces cómo hacer que todos los recursos que existen a disposición rindan lo máximo. Lo más sensato es tratar de minimizar el uso de los recursos a nuestra disposición. Esa es una forma de ver el problema; la otra forma de ver el problema es, fijados los recursos, obtener el valor máximo de nuestros objetivos.

Las metodologías para hacer este tipo de investigación han sido muy variadas, solamente quisiera comentarles dos

tipos que han sido las más llámenle las más usadas, una -  
de ellas muy conveniente, es la matriz de insumo - produc-  
to y la otra es el análisis de actividades. El primero  
tiene la característica de poder usarse no solamente en -  
forma monetaria sino en forma de unidades físicos y permi  
te en un momento dado integrar una serie de planes a nivel  
les de tipo sectorial. El otro es más general porque -  
sus casos particulares son la matriz insumo - producto, la  
programación lineal y parte de la teoría de control.

También existe otro concepto que conviene aclarar, es el  
concepto famoso de la regionalización. Vean ustedes, -  
manejar un problema de tipo nacional, en donde tenemos -  
que ubicar necesariamente un recurso como es el agua -  
para el uso más racional que se pueda; puede verse de -  
muy diversas formas, puede verse a nivel muy agregado, -  
a nivel desde los puntos fundamentales de la economía; -  
sin embargo, la respuesta que obtendríamos no es sufi--  
ciente para derivar de él planes operativos. Si lo -  
trabajamos a nivel de detalle de proyecto por proyecto, -  
tampoco es operativo porque perderíamos la visión totali-  
zadora. Entonces la metodología de ver los problemas -

desde el punto de vista de la regionalización parece ser -  
la más adecuada, en otras palabras es conveniente en un mo-  
mento dado no tener ni una unidad tan grande, ni unidades  
tan pequeñas que hagan el problema de inmanejables; sino -  
tener un tipo de unidades de tamaño llámenlo medio, median-  
te el cual si se puedan derivar planes de tipo operativo.  
Aquí surge precisamente el concepto de la regionalización,  
que hace uso fundamentalmente de dos conceptos: la homo-  
geneidad de actividades que podrían realizarse dentro de -  
una región, y la interdependencia de las actividades de -  
una región. Entonces vean ustedes a partir del concepto  
dehomogeneidad, si se está tratando un problema de orden -  
zación .  
hidráulico, una regionali/ va a ser determinada por caracte-  
rísticas de tipo hidráulico que bien pueden referirse a la  
disponibilidad de los recursos hidráulicos o bien de algo  
que tenga que ver con ellos que bien pueden ser problemas  
de origen de tipo agrícola, irrigación o la combinación de  
estos. Si se está tratando un problema de orden fiscal,  
entonces conviene dividir el país en regiones que tengan -  
características homogéneas desde el punto de vista fiscal  
y desde el punto de vista tributario. Los conceptos de -  
interdependencia están referidos a actividades encadenadas  
esencialmente de tipo por ejemplo servicios gubernamentales,

o sea si se tiene una ciudad que tiene su área de influencia, existe una interdependencia de este centro o polo con las ciudades o localidades más pequeñas que están en su hinterland. En el plan nacional hidráulico se sigue fundamentalmente un concepto de tipo de homogeneidad. Se hace con fines de tener una definición de regionalización funcional, no nos espante que exista en la república como dicen algunos, ciento y tantas regionalizaciones. Me espantaría si tuviésemos en algún momento dado no una regionalización de orden hidráulico, sino que tuviéramos 100, eso sí sería catastrófico porque quizá las 99 anteriores no serían tan buenas o la última tampoco. Pero si se tienen 99 ó 100 problemas o los que quieran ustedes, para hacerlos operativos, una regionalización para cada una de ellas no tiene nada de raro, por el contrario es una forma de ver las cosas adecuadamente. Desde luego, esto tiene una desventaja, que sería la de no poder integrar un plan de desarrollo nacional.

## Matriz de Insumo Producto

$$\frac{X_{ij}}{X_j} = a_{ij}$$

$X_{ij}$  = insumo  $i$  usado en  $j$   
 $X_j$  = producción del sector  $j$   
 $a_{ij}$  = coeficiente tecnológico

$I$  = matriz identidad

$$(I - A)^{-1} y = X$$

$y$  = vector de demanda final  
 $X$  = vector de producción bruta

Uno de los renglones es el recurso hidráulico.

## Programación Lineal

$$\text{Max } \sum P_i X_i, P_i = \text{precios de los productos}$$

S. A. ,  $X_i$  = cantidad producida de  $i$

$$A x \leq b, b = \text{vector de disponibilidades de recursos}$$
$$x \geq 0, A = \text{matriz tecnológica.}$$

Si se agregan restricciones por ejemplo del uso de recursos -  
hidráulicos:

$Bx \leq d$ , donde  $d$  es el vector de usos máximos que -  
para el caso de los acuíferos subterráneos está en función de  
la recuperabilidad del recurso (la explotación máxima sin que  
se produzca salinidad o deterioro del acuífero). El no in--  
cluir las condiciones de la matriz  $B$  se ha usado en forma -  
intuitiva, dando lugar a un criterio de tipo privado.

Si además de las restricciones  $Bx \leq d$  se substituye la función objetivo por otra que incluya la maximización de la generación de empleo, el programa está orientado a ser de orden social. Desde el punto de vista social no conviene maximizar la utilidad personal del individuo, quizá conviene maximizar el volumen de empleos a crear y el pago de esos empleados (llámenles jornaleros); entonces con vendría por ejemplo, maximizar un índice de utilidad social, y la utilidad social la voy a definir como una combinación de niveles de empleo y en sueldos y salarios. - Esta función a maximizar estaría sujeta a consideraciones de tipo tecnológico. ¿Qué - significa esto en términos corrientes?, significa que si yo tengo un proyecto de explotación de aguas subterráneas, que además puedo estar usando en otra proporción otro tipo de aguas caso "normal" o importar incluso, si en la can tidad de recursos que voy a disponer, o que quiero disponer es exactamente la misma para cinco proyectos, y uno - de ellos es el que me produce el mayor nivel de empleo o los mayores volúmenes de mis salarios, ese es el criterio fundamental para decidirme por ese proyecto; cualquier - otro proyecto no reuniría las condiciones típicas de estar maximizando un beneficio social. Incluso vean ustedes -

el beneficio social puede lograrse a costa de obtener utilidades cero.

En un gran número de casos, lo que podría ser el caso general, se trata de cambiar óptimamente el gasto de los recursos subterráneos, el abastecimiento "normal" y la de importación del líquido de otras regiones. Esto nos conduce ahora a la pregunta de que a qué precio debemos dar este tipo de servicios?, la respuesta es el dual del modelo de programación lineal. En el caso de solamente explotar el acuífero, un precio mínimo es aquel que corresponde al costo de producción. Sin embargo, esto conduce a no obtener el excedente del productor, por ejemplo y si anteponemos las características de un desarrollo económico compartido, se caería en una contradicción especialmente en los usos de tipo agrícola. ¿Entonces qué otra forma o qué otra característica tendríamos o qué metodología podríamos sugerir para estimar el precio de venta del servicio que estamos dando?, esta pregunta la tendremos que contestar en términos de lo que ocurre a los precios del producto del agricultor. La respuesta está en llevarse el excedente del productor. La idea es irle elevando los precios hasta

el momento en que él prefiera dejar de comprar el insumo. En este momento se obtendría el precio máximo al que puede venderle cada  $m^3$  demandado y que dependerá de los precios de su producto y de la utilidad que obtenga. Esta construcción de tarifas corresponde a lo que se denomina como la discriminación de precios. Otra forma de capturar parte de sus utilidades es imponiéndole un impuesto al uso del líquido o al precio de su producto. Sin embargo, esta forma, tiene la característica de que el productor en un momento dado, si es grande, es capaz de transmitir este impuesto al consumidor.

Ahora vamos a plantear otra pregunta, desde el punto de vista del estado y sería lo siguiente, a partir del plan de desarrollo, se necesitan tantos miles de toneladas de este producto agrícola y de ese otro, etc., y además se conocen las zonas con sus características productivas en cuanto a tierra, humedad, etc. para la producción de esos productos. ¿Cómo se puede orientar la producción nacional por productos hacia lo que se planea? Desde el punto de vista de acuíferos, si a alguien se le ocurre sembrar el maíz en una región de trigo, y se ha considerado que esa región de trigo debe cumplir con ciertos requerimientos de produc



ción etc, y el productor insiste; no se le puede forzar -  
compulsivamente a que siembre trigo. Una forma es elimi-  
nar el crédito al producto no deseado. Sin embargo, si  
tiene recursos y le da la gana sembrar maíz existe otro -  
modo de limitar su producción de maíz y orientarlo al tri-  
go; consiste en manipular los precios del acuífero, o sea  
en una zona el  $m^3$ , los primeros 10 ó 20  $m^3$  de gasto sema-  
nal o mensual, van a costar A, si la producción se --  
orienta al trigo; y si la producción se orienta al maíz -  
le va a costar 5 veces más.

Con esto último se da por terminada esta plática. Espe-  
ro que de alguna forma les sea provechosa, gracias.

PRO.

LA EXPLOTACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUBTERRANEOS  
(Criterios de Manejo)

Se distinguen fundamentalmente dos filosofías en los proyectos de planeación para explotar los acuíferos, que son:

- i) La explotación de los acuíferos se realiza bajo el criterio de RENDIMIENTO SEGURO
- ii) La explotación de los acuíferos se realiza con el criterio de SOBREEXPLOTACION.

Se entiende por rendimiento seguro cuando la explotación de los acuíferos se realiza en la forma de que la extracción anual es menor o igual a la recarga promedio anual.

Sin embargo, cualquier explotación de subterránea causa un abatimiento en los niveles estáticos; en el caso de la explotación bajo rendimiento seguro, los niveles del agua se abatirán lentamente hasta alcanzar una nueva posición de equilibrio puede tomar muchos años, incluso cientos de años.

Este criterio se utiliza cuando el volumen almacenado de los acuíferos es muy pequeño; existe peligro inmediato de intrusión de aguas salinas, o bien, cuando el abastecimiento de agua tiene que ser permanente y a perpetuidad, y las posibi-

lidades de rescate con otra fuente alternativa, son remotas, por lo que el tiempo de planeación en estos casos es infinito.

En este caso el acuífero se considera como una corriente que se recarga en ciertas áreas específicas denominadas de recarga, fluye a través del acuífero y descarga en alguna salida natural; el volumen de agua aprovechable es generalmente un poco menor a esta recarga debido a diversos factores técnicos y físicos como discrepancia espacial y temporal de recursos y necesidades de agua, distribución de las obras de captación, etc.

Desde el punto de vista económico social, este criterio no permite que se obtengan altos beneficios como en la sobreexplotación principalmente al inicio de la etapa de desarrollo debido al proceso de maduración del propio proyecto.

En la práctica mundial, el desarrollo agrícola e industrial de cualquier zona árida, requiere de un volumen de agua mayor que la disponibilidad que se puede obtener del almacenamiento anual de aguas superficiales y de recarga de aguas subterráneas, por lo que a corto y mediano plazo se opta por

explotar el volumen almacenado de los acuíferos y a largo -  
plazo de los recursos hidráulicos locales tienen que auxi-  
liarse con recursos alternativos como son la importación de  
agua de otras regiones, tratamiento y reuso de aguas negras,  
desalinización de agua del mar o bien; reducir la explota-  
ción al rendimiento seguro. En este caso, el acuífero se  
puede considerar como una presa de almacenamiento que contie-  
ne un volumen almacenado de agua y, este volumen puede divi-  
dirse en dos tipos de reserva:

- j) Reservas dinámicas
- jj) Reservas de minado.

Las reservas dinámicas son aquellas que se encuentran arriba  
de la salida natural de los acuíferos, y; las reservas de mi-  
nado son las que se encuentran por debajo de dicha salida na-  
tural

La alternativa de explotar estas reservas almacenadas de los  
acuíferos se denomina "sobrexplotación de los acuíferos"; y  
se distinguen tres tipos de sobreexplotación:

- EO) La sobreexplotación de los acuíferos se realiza en un  
proyecto de planeación infinito con una fuente alter-  
nativa de rescate, por lo que el volumen de almacena-

miento es usada como una fuente provisional de recursos; antes de que las fuentes alternativas sostengan el proyecto a largo plazo y la sobreexplotación cese.

E1) Cuando se tenga un proyecto de planeación infinito - sin fuente alternativa de rescate y el agua subterránea es el único o principal recurso. La sobreexplotación sostenida a largo plazo y de ahí en adelante - la explotación se reducirá al rendimiento seguro. - Implica prácticamente explotar las reservas dinámicas y poco o nada de las reservas de minado.

E2) Un proyecto de horizonte finito de planeación sin fuente alternativa, en donde sobreexplotar el acuífero es el único recurso; cuando se agotan dichos recursos el proyecto termina.

El grado de sobreexplotación de un acuífero está dado por - condiciones hidrológicas y relaciones económicas principalmente.

Desde el punto de vista hidrológico la sobreexplotación de - los acuíferos se puede llevar a tres niveles de sobreexplotación

- a) Explotación de las reservas dinámicas y de ahí en adelante la explotación se reduce al rendimiento seguro y el acuífero no sufre en forma práctica algún daño.
- aa) La explotación del acuífero va más allá de este límite y se explota parte de las reservas de minado, el acuífero experimenta algún daño, pero mientras este daño sea controlable y existe factibilidad de repararlo, se podría hablar en este caso, de sobreexplotación no destructiva cuando se detiene la sobreexplotación al acuífero, no debe pasarse en forma inmediata al rendimiento seguro, pues es necesario un cierto tiempo de recuperación para volver a ser explotado al nivel de rendimiento seguro.
- aaa) Cuando la sobreexplotación se lleva hasta hacer prácticamente inexplotable por un tiempo previsible, se lleva la sobreexplotación al nivel destructivo del acuífero.

La sobreexplotación puede efectuarse en forma temporal, al inicio o a mediano plazo de la etapa de desarrollo. También la sobreexplotación puede ser cíclica, por varios pe-

ríos considerados en la etapa de planeación; o bien, como auxiliar para situaciones de emergencia que puedan presentarse.

#### RESTRICCIONES IMPUESTAS A LA PLANEACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

En la planeación existen restricciones impuestas por las condiciones económicas internas y externas, así como también la operación del propio sistema de recursos hidráulicos. Las principales restricciones para proyecto de desarrollo de una zona son: la escasez de recursos, falta de mano de obra experta y grado de confiabilidad en la información. En la fase de operación hay restricciones en la demanda de bienes y servicios, mercados externos limitados y falta de habilidad en el manejo de los recursos.

Las restricciones hidrológicas generalmente están relacionadas con la profundidad de los niveles estáticos y de bombeo. La calidad del agua es otro limitante, especialmente cuando se tiene el peligro de invasión o inmigración de agua de pobre calidad de acuíferos adyacentes o del mar.

#### ANALISIS PRIVADO PARA LA EXPLOTACION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS SUBTERRANEOS

La eficiencia económica de un proyecto se puede expresar por relaciones:

- c) beneficio - costo
- cc) Tasa de rendimiento interno
- ccc) Beneficio neto (Excedentes de beneficios).

c) Relación Beneficio - costo.- Esta relación se utiliza para grandes proyectos por un periodo de vida muy largo en los cuales es muy difícil determinar los beneficios indirectos e intangibles. Este criterio ( B/C ) involucra una comparación cuantitativa entre todos los beneficios económicos netos atribuidos al proyecto y los costos reales del proyecto.

Desde luego en todos los proyectos debe usarse en valores actualizados y la relación B/C debe ser mayor que la unidad, entre mayor sea esta relación mayor será la prioridad y beneficio del proyecto.

cc) Tasa de Rendimiento Interno.- La tasa de rendimiento interno permite conocer qué proyecto recupera más rápido la inversión, se obtiene para cuando la relación beneficio/costo se hace igual a la unidad cuando se utilizan diferentes tipos de intereses de descuento.



ccc) El beneficio neto se obtiene de restar los beneficios brutos obtenidos de la producción del proyecto y de los costos totales involucrados en las fases de construcción y operación del mismo.

Los costos de las inversiones de los recursos alternativos son diferidos debido al uso de las aguas subterráneas, pero condiciona un pago rápido en las inversiones de las instalaciones de bombeo de aguas subterráneas porque tienen una vida útil corta.

Los beneficios y costos que deben conocerse son:

- $B_O$  - Beneficios anuales iniciales
- $B_M$  - Beneficios anuales al final de la etapa de sobreexplotación
- $B_R$  - Beneficios anuales en la etapa de recuperación
- $B_S$  - Beneficios anuales en la etapa de estabilidad
- $CG_O$  - Costos iniciales anuales de la explotación del agua subterránea
- $CG_M$  - Costos anuales de la explotación del agua subterránea en el nivel de sobreexplotación
- $CG_R$  - Costos anuales de la explotación del agua subterránea al principio de la etapa de recuperación

- 37
- CG<sub>R</sub> - Costos anuales de la explotación del agua subterránea en el nivel de recuperación
  - CG<sub>S</sub> - Costos anuales de la explotación del agua subterránea en la etapa estable
  - CA<sub>T</sub> - Costos anuales de los recursos alternativos al principio de la etapa de recuperación
  - CA<sub>S</sub> - Costos anuales de los recursos alternativos en la etapa estable
  - PD<sub>C</sub> - Costos totales del desarrollo primario (incluyendo las instalaciones de agua subterránea y abastecimiento)
  - ARC - Costos totales de los recursos alternativos
  - SDC - Costos del desarrollo secundario
  - TDC - Costos del desarrollo terciario
  - GWC - Costos totales de las instalaciones de agua subterránea requeridas durante la etapa estable.

El beneficio neto que aporta cada unidad de agua aplicada en cualquier proceso de producción, se puede representar en función del tiempo bajo dos condiciones:

La primera cuando la recarga al acuífero es igual a la extracción.

$$R = B.$$

$$P = P_o - F_o - C_m \cdot h_o.$$

donde

$P_0$  es el beneficio bruto que se percibe de cualquier actividad productiva por unidad de agua usada en el proceso

$F_0$  es el costo fijo por unidad de agua aplicada

$C_m$  es el costo marginal del bombeo a largo plazo, en este caso se considera constante.

$h_0$  es el nivel de bombeo cuando  $R = B$

La segunda condición es cuando  $R \neq B$

$$P(t) = P_0 - F_0 - C_m (h_0 + h(t)).$$

donde  $h(t)$  es el incremento de la profundidad del bombeo en función del tiempo.

Para determinar el volumen económicamente óptimo que puede ser extraído del almacenamiento en común con la recarga.

$$A_m = \frac{P_0 - F_0}{C_m S} - \frac{R}{\gamma}$$

donde

$S$  es considerado como el factor de respuesta del acuífero al bombeo, o sea, para fines prácticos el rendimiento específico

$R$  es la recarga anual promedio

$\gamma$  es el factor de interés (en por ciento)

El tiempo de agotamiento se calcula con la fórmula:

$$t_a = \frac{2 (P_o - P_o)^{1/2}}{Cm T}$$

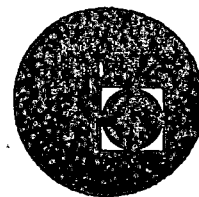
donde

T es la transmisibilidad del acuífero.

PRO.



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



## HIDROLOGIA SUBTERRANEA



ING. PEDRO MARTINEZ LEYVA

JULIO DE 1976.

bV

RECEIVED  
FEBRUARY 1964  
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE  
WASHINGTON, D.C.



# Modelo matemático "DAS" para el estudio del comportamiento de acuíferos

Por Carlos CRUICKSHANK V.  
y Rubén CHAVEZ GUILLEN  
Ingenieros Civiles

## NOTA PRELIMINAR

Por el Ing. Ignacio SAINZ ORTIZ \*

*El inventario de las aguas subterráneas tiene por objeto determinar la presencia, distribución y cuantía de ese recurso en las diversas regiones del país, mediante los estudios hidrológicos necesarios apoyados en las disciplinas técnicas que pueden aportar información aprovechable, tales como la geología, la geofísica, la geoquímica, etc. Una vez alcanzado ese objetivo, podrán explotarse los acuíferos en forma racional.*

*La explotación de las aguas subterráneas no debe realizarse necesariamente a un ritmo fijo compatible con la recarga media a los acuíferos y según una distribución de pozos preestablecida, sino que podrá estar sujeta, en un momento dado, a variaciones de acuerdo con las condiciones generales que prueben en la región que se estudia. Estas alternativas de explotación deberán analizarse para prever las consecuencias que pueden acarrear en el comportamiento de los acuíferos.*

*El análisis directo de cada alternativa de explotación representa un trabajo abrumador que sólo se justificaría en casos excepcionales. Afortunadamente, con el advenimiento de las computadoras electrónicas, el análisis puede realizarse sencilla y rápidamente mediante modelos, que pueden ser analógicos o matemáticos, según que la computadora sea analógica o digital. Los modelos analógicos, si bien podrían considerarse como más objetivos, resultan costosos y difíciles de calibrar; por el contrario, los modelos matemáticos son baratos y su calibración más sencilla.*

*Aprovechando que esta Secretaría de Recursos Hidráulicos adquirió una computadora digital*

\* Director de Aguas Subterráneas. Jefatura de Irrigación y Control de Ríos.

*CDC 3100, los ingenieros Carlos Cruickshank Villanueva y Rubén Chávez Guillén, de la Dirección de Aguas Subterráneas, desarrollaron un modelo matemático para el estudio de los acuíferos, el cual se presenta detalladamente en el presente artículo junto con su aplicación práctica al estudio de diversas alternativas de explotación para el acuífero que actualmente se aprovecha en la Costa de Hermosillo, Sonora.*

## I. INTRODUCCION

### 1.1. OBJETO DEL MODELO

La etapa más avanzada en el estudio de un acuífero consiste en el establecimiento de un modelo que reproduzca su comportamiento.

El modelo tiene por objeto estudiar el comportamiento dinámico o respuesta del acuífero a las sollicitaciones a que se le somete. En otras palabras, permite conocer la variación en sus condiciones piezométricas, producida por un determinado régimen de explotación o alimentación.

Es posible, entonces, una vez que se ha logrado la calibración del modelo, predecir cuales serán las condiciones piezométricas del acuífero para diferentes condiciones de explotación en el tiempo y diversas distribuciones de las extracciones; esto permitirá optimizar el aprovechamiento de los recursos del acuífero.

### 1.2. FORMACION DEL MODELO

Para el planteo del modelo se requiere, principalmente, conocer la geometría del acuífero (extensión, fronteras, etc.) y sus características físicas (transmisibilidad y almacenamiento). Otros datos adicionales, especialmente útiles para calibrar e

modelo, son: su "historia piezométrica" en un periodo dado y los regímenes de extracción y alimentación en ese mismo periodo.

La geometría puede conocerse mediante estudios geológicos, perforaciones de exploración, registros eléctricos, etc.

Las características físicas pueden obtenerse con pruebas de bombeo; sin embargo, el costo de las pruebas necesarias para obtenerlas con el detalle requerido en un modelo, es demasiado alto; por esta razón sus valores se suponen, inicialmente, basándose en capacidades específicas, pruebas de bombeo aisladas, tipo de acuífero (libre, confinado...), etc., y se van corrigiendo por un procedimiento de tanteos, hasta encontrar un grupo de valores que permitan reproducir, con aproximación razonable, la historia piezométrica del acuífero partiendo de condiciones piezométricas iniciales y de los regímenes de extracción y alimentación conocidos en el periodo elegido para la calibración del modelo.

Según sea el procedimiento utilizado en la solución de las ecuaciones que representan matemáticamente el comportamiento dinámico del acuífero, los modelos pueden ser:

#### Modelo analógico eléctrico

En este modelo se utiliza la analogía que existe entre el flujo de corriente eléctrica en un conductor y el flujo de agua en un medio poroso. El acuífero se representa por una red de resistencia y condensadores; la corriente eléctrica, el potencial y la capacitancia, son análogos al caudal de flujo de agua subterránea, la elevación piezométrica y el almacenaje del acuífero, respectivamente. La respuesta del acuífero se obtiene midiendo el potencial en los nodos de la malla, el cual representa la elevación piezométrica a una escala previamente definida.

La principal ventaja de este tipo de modelo es su objetividad, ya que la malla de elementos eléctricos puede construirse sobre un tablero en el que se reproduzca fotográfica o esquemáticamente la zona en estudio, teniendo así, por lo menos aparentemente, una relación más directa con el problema, pero son costosos y laboriosa su calibración.

#### Modelo matemático

En este modelo las ecuaciones de movimiento son reemplazadas por un sistema equivalente de ecuaciones simultáneas, cuya solución da los valores de la elevación piezométrica en los nodos de la malla. Como en general el número de ecuaciones es muy grande, la solución del sistema se lleva a cabo en computadoras digitales, utilizando técnicas de integración numérica.

Las ventajas de estos modelos radican en su bajo costo, facilidad de manejo y mayor rapidez en su calibración, ya que puede intentarse, incluso, una calibración directa eliminando el procedimiento de tanteos.

## II. DESARROLLO DEL MODELO

### 2.1. ECUACION DEL MOVIMIENTO

La ecuación del movimiento transitorio en un acuífero está basada fundamentalmente en la ley de Darcy y el principio de la conservación de la masa. La ley de Darcy en forma diferencial se expresa:

$$V_r = -K_r \frac{\partial H}{\partial r} \quad (2.1)$$

donde:

$V_r$  = velocidad en el sentido de un eje de distancias  $r$ .

$K_r$  = permeabilidad del medio en la dirección  $r$ .

$H$  = carga o altura piezométrica en el punto considerado.

El principio de conservación de la masa indica que el flujo neto de entrada a un volumen  $V$ , más una cierta masa generada dentro del volumen por unidad de tiempo, es igual al incremento de masa, dentro del volumen, por unidad de tiempo. Lo anterior se expresa por la siguiente ecuación:

$$-\oint \bar{v} \cdot d\bar{a} + \iiint_V \rho F dV = \iiint_V S_s \frac{\partial H}{\partial t} dV \quad (2.2)$$

donde:

$\rho$  = masa específica del fluido.

$\bar{v}$  = velocidad del fluido a través del elemento  $d\bar{a}$  de la superficie que rodea el flujo (sentido positivo hacia afuera del elemento volumétrico).

$F$  = volumen del fluido creado por unidad de volumen y por unidad de tiempo.

$S_s$  = almacenamiento específico del medio, o sea: el volumen del fluido que queda almacenado en un volumen unitario del medio, debido a un aumento unitario de carga.

$t$  = tiempo.

La primera integral de (2.2) está llevada sobre toda la superficie que rodea al volumen considerado y representa la masa neta de fluido que entra por dicha superficie en la unidad de tiempo.

La segunda integral representa la masa "creada" dentro del volumen por unidad de tiempo; la conveniencia de introducir este término en el tratamiento de acuíferos se verá en el inciso siguiente.

La integral del miembro derecho de (2.2) representa el cambio de masa por unidad de tiempo dentro del volumen considerado.



La solución de las ecuaciones (2.1) y (2.2) en casos reales, en los que existe una variación no expresable funcionalmente de características del medio y de efectos exteriores, conviene efectuarla por métodos numéricos. Normalmente el cálculo se plantea a partir de las ecuaciones diferenciales de movimiento y se procede por incrementos finitos sobre una malla de puntos en la región considerada. Otro enfoque es el de partir directamente de la expresión integral (2.2) y aplicarla a elementos de volumen finitos dentro de la región en estudio; la variación con el tiempo se debe tratar por incrementos finitos, por lo que en cada intervalo de tiempo se calculan valores medios del miembro izquierdo de (2.2).

### 2.2. PLANTEO DEL MODELO EN ACUIFEROS POR EL METODO DE INCREMENTOS FINITOS EN EL TIEMPO SOBRE ELEMENTOS VOLUMETRICOS FINITOS

El flujo de agua dentro de un acuífero puede considerarse, en la gran mayoría de los casos, como un flujo laminar plano; para tomar en cuenta la variación tanto de permeabilidad como de espesor de flujo, se introduce un parámetro que los engloba a ambos, llamado Coeficiente de Transmisibilidad, definido como:  $T_r = K_r b$ , donde  $b$  es el espesor de flujo.

En esta forma los elementos finitos para el tratamiento de acuíferos pueden considerarse celdas planas (en realidad columnas de altura variable como se indica en la fig. 1), en las que el flujo considerado en la primera integral de (2.2) tiene lugar a través del perímetro que limita a la celda.

En la realidad existen flujos normales a la superficie considerada, tales como extracciones por bombeo, infiltraciones a lo largo de ríos y canales, alimentaciones de otros acuíferos, etc.; este tipo de flujos constituyen las influencias externas al acuífero cuyos efectos se tratan de evaluar por medio del modelo; para tomarlos en cuenta se introduce la segunda integral de la ecuación (2.2), y los flujos normales a la superficie plana del elemento se consideran como "generados" dentro del elemento.

De acuerdo con lo anterior, al suponer constante la masa específica del agua, la expresión (2.2) se transforma en:

$$-\oint_p b \bar{v} \cdot dp + \iint_A b F \, dA = \iint_A S \frac{\partial H}{\partial t} \, dA \tag{2.3}$$

donde:

$S$  = coeficiente de almacenamiento del acuífero ( $= S_r b$ ).

$p$  = perímetro.

La integral de superficie se ha transformado en una integral de línea, y las integrales de volumen se transforman en integrales de superficie.

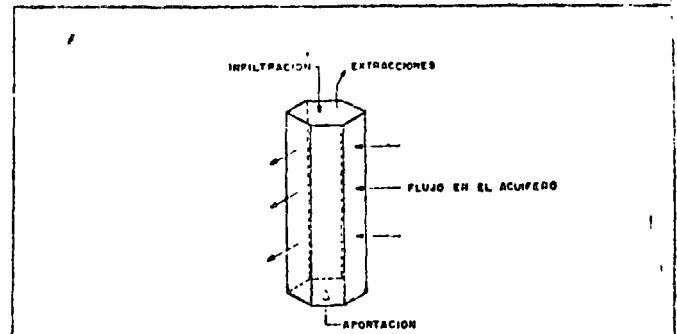


FIG. 1 - ESQUEMA DE UN ELEMENTO VOLUMETRICO.

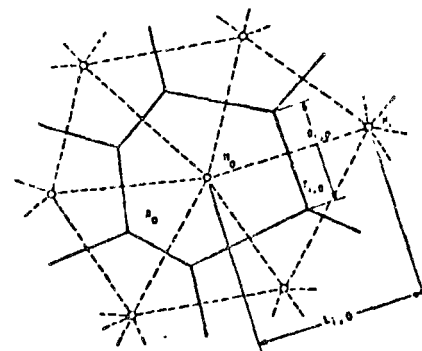


FIG. 2 - ELEMENTO PLANO

La evaluación numérica de las integrales de (2.3) para cada elemento depende de su forma y de las hipótesis que se supongan válidas dentro de él. Por ejemplo, Zienkiewicz,<sup>2</sup> en un análisis de esfuerzos planos y de flujo plano en medios porosos, utiliza elementos triangulares y supone una distribución lineal de desplazamientos y alturas piezométricas, respectivamente; para fijar las ecuaciones de movimiento utiliza el principio del trabajo mínimo.

Una forma conveniente de hacer el cálculo numérico de los términos de la ecuación (2.3), es la de escoger los elementos finitos como polígonos de influencia de puntos adecuadamente localizados en la zona en estudio. Este arreglo fue introducido por MacNeal,<sup>3</sup> y adoptado por Tyson y Weber<sup>4</sup> en modelos de acuíferos; se supone en este esquema, que cada elemento tiene características representativas del área que cubre.

Tanto el elemento triangular como el poligonal tienen la ventaja de formar un arreglo simétrico e irregular que permite disminuir la amplitud de la malla donde sea necesario, como en lugares de fuerte extracción, fronteras irregulares, zonas de fuerte gradiente, etc.

En lo que sigue, se adoptará el esquema poligonal (fig. 2) en el desarrollo del modelo matemático. Para su trazo se procede inicialmente a cu-

brir la zona estudiada con una malla de triángulos aproximadamente equiláteros, de tamaño variable, elegido según el detalle que se desee obtener en la configuración; es decir, los de menor área se trazan en zonas de fuertes evoluciones piezométricas, cambios bruscos de las características físicas, etcótera; los localizados en la periferia de la zona cubierta, se trazan de manera que sus lados sigan aproximadamente las fronteras previamente definidas.

A continuación se traza el polígono de influencia de cada nudo, definiendo sus vértices por las intersecciones de las mediatrices de los triángulos que tienen como vértice común al nudo considerado.

Al utilizar este esquema, la primera integral de 2.3 se convierte en una suma de caudales de la forma:

$$b\bar{v} \cdot \Delta\bar{p} = bK_r \frac{\partial H}{\partial r} \Delta\bar{p} = T_r \frac{\partial H}{\partial r} \Delta p$$

ya que el gradiente hidráulico es normal al segmento de perímetro  $\Delta p$  de la celda. El gradiente se calcula como el cociente de la diferencia de alturas piezométricas en dos elementos contiguos entre la longitud del segmento que une sus centros; en un intervalo de tiempo, el gradiente se toma como el promedio de sus valores al inicio y al final del mismo intervalo. El coeficiente de transmisibilidad se calcula como el promedio de los valores representativos de las dos celdas.

De acuerdo con lo anterior, el primer término de la ecuación (2.3) se puede escribir:

$$-\oint_p b\bar{v} \cdot d\bar{p} = \frac{1}{2} \sum_1^n Y_{i_0} [H_{i,k+1} - H_{o,k+1} + H_{i,k} - H_{o,k}] \quad (2.4)$$

en la que:

$$Y_{i_0} = \frac{1}{2} (T_1 + T_o) \frac{B_{i_0}}{L_{i_0}}$$

$T_o$  = transmisibilidad del elemento o.

$T_1$  = transmisibilidad del elemento  $i$ .

$i_0$  = segmento  $i_0$ .

$L_{i_0}$  = longitud del segmento  $i_0$ .

$B_{i_0}$  = longitud del lado del polígono normal al segmento  $i_0$  (ancho de flujo).

$H_{i,k}$  = altura piezométrica del nudo  $i$  en el instante  $k$ .

$n$  = número de elementos adyacentes al elemento o.

El segundo término de la ecuación, que toma en cuenta los flujos normales a la superficie considerada, se substituirá por un caudal,  $Q_{o,k}$  (caudal neta medio, normal al elemento o, en el intervalo de tiempo  $k$ ), valuado en cada elemento de acuer-

do con las extracciones por bombeo, aportación por infiltración vertical, etc.

Finalmente, el miembro de la derecha de (2.3) que representa la variación del almacenamiento dentro del volumen considerado, por unidad de tiempo, se valorará como:

$$\frac{A_o S_o}{\Delta t} [H_{o,k+1} - H_{o,k}] \quad (2.5)$$

en la que:

$A_o$  = Área del elemento o.

$S_o$  = Coeficiente de almacenaje del elemento o.

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo.

Substituyendo en (2.3) las expresiones (2.4) y (2.5) se tiene:

$$\frac{1}{2} \sum_1^n Y_{i_0} [H_{i,k+1} - H_{o,k+1} + H_{i,k} - H_{o,k}] + Q_{o,k} = \frac{A_o S_o}{\Delta t} [H_{o,k+1} - H_{o,k}] \quad (2.6)$$

en la que todos los términos han sido definidos anteriormente.

Aplicando la expresión (2.6) a todos los elementos del área en estudio, se obtiene un sistema de ecuaciones lineales donde las incógnitas son las alturas piezométricas en el instante  $k + 1$ , supuestas conocidas las características del acuífero, los caudales de extracción y aportación, y la distribución de alturas piezométricas en el instante  $k$ .

### 2.3. METODO DE SOLUCION

El sistema de ecuaciones resultante constituye un esquema implícito de solución de la ecuación del movimiento (Ecuación de difusión).<sup>5</sup> Este esquema tiene la ventaja de ser convergente (la solución aproximada tiende a la solución exacta al disminuir el tamaño de la malla) y estable (los errores de redondeo de cifras se amortiguan al aplicar el esquema hacia adelante en el tiempo) para cualquier tamaño de la malla espacial (área de los elementos) y de la malla temporal (intervalo de tiempo).

El método más conveniente para resolver el sistema es el iterativo de Gauss-Seidel. Para dar una primera aproximación a la solución y disminuir el número de iteraciones, es conveniente introducir como valores iniciales a los obtenidos en la solución explícita:

$$H_{o,k+1} = \frac{\Delta t}{A_o S_o} \left[ -Q_{o,k} + \sum_1^n Y_{i_0} (H_{i,k} - H_{o,k}) \right] + H_{o,k} \quad (2.7)$$

Dicha solución puede aplicarse directamente, pero tiene la limitación de ser válida (convergente y estable) aproximadamente para valores de:

$$r = \frac{T \Delta t}{S A} < \frac{1}{n}$$

#### 2.4. PROGRAMA PARA COMPUTADORA DIGITAL

El programa elaborado para ejecutar el planteo y solución del sistema de ecuaciones en una computadora digital, consta, principalmente, de dos secuelas de cálculo: en la primera de ellas se define la geometría del modelo y en la segunda se plantea y resuelve el sistema de ecuaciones.

##### 2.4.1 Entrada de datos

Los datos que deben proporcionarse a la computadora para el desarrollo de las secuelas, se enlistan a continuación:

Número total de nudos.

Número de nudos que definen las fronteras impermeables.

Número de nudos que definen las fronteras de carga constante.

Número de nudos localizados dentro de las fronteras.

Número del último nudo.

Tolerancia en la solución del sistema de ecuaciones.

Intervalos de tiempo considerados.

Duración de cada intervalo.

Coficiente de sobrerrelajación.

Para cada nudo:

Coordenadas y elevación piezométrica inicial; número de vértices de su polígono de influencia y número de los nudos adyacentes, y

Coficientes de transmisibilidad y almacenaje.

Número de nudos que definen el perímetro de la zona estudiada.

Número de los nudos exteriores.

Caudal de extracción en su área de influencia, para cada uno de los intervalos de tiempo.

##### 2.4.2. Definición de la geometría del modelo

Para cada nudo se ejecuta la secuela siguiente:

a) Cálculo de las coordenadas de los vértices del polígono de influencia, definidos por las intersecciones de las mediatrices de los triángulos que tienen por vértice común al nudo considerado.

b) Cálculo del área del polígono de influencia en función de las coordenadas de sus vértices.

Las áreas de los polígonos se van acumulando conforme se calculan, obteniendo al final el área

total de la zona estudiada. Se proporciona a la computadora una secuela de cálculo para obtener el área total en función de las coordenadas de los nudos que definen el perímetro, con objeto de verificar la calculada por acumulación de áreas parciales.

##### 2.4.3. Planteo y solución del sistema de ecuaciones

Inicialmente se calcula para cada nudo o elemento:

a) Caudal de flujo a través de cada lado del polígono de influencia, para una diferencia unitaria de carga piezométrica. El cálculo se efectúa utilizando la expresión:

$$Y_{10} = \frac{1}{2} (Tr_i + Tr_o) \frac{B_{10}}{L_{10}}$$

b) Volumen de almacenaje del elemento poligonal correspondiente, para una variación unitaria de la carga piezométrica, utilizando la expresión:

$$\text{Almacenaje} = A_o \times S_o$$

En seguida se procede al planteo y solución del sistema de ecuaciones para el primer intervalo de tiempo, aplicando la expresión (2.6) a cada elemento.

Como primera aproximación a la solución del sistema, se calculan las cargas piezométricas al final del intervalo  $H_{o,k+1}$  utilizando la expresión (2.7), en la que  $H_{o,k}$  es la carga piezométrica inicial.

Con esta primera aproximación, se aplica el método de Gauss-Seidel con el número de iteraciones necesarias para que la solución quede dentro de la tolerancia fijada. La relajación de las incógnitas, efectuadas de acuerdo con dicho método, se afecta de un coeficiente de sobrerrelajación al que se da un valor entre 1 y 2.

Finalmente se imprimen los valores calculados de las cargas piezométricas en los nudos, las cuales constituyen los valores iniciales para la solución del sistema correspondiente al siguiente intervalo de tiempo.

El diagrama de flujo que representa esquemáticamente las secuelas de cálculo descritas, se presenta en la figura 3.

### III. APLICACION AL ACUIFERO LIBRE DE LA COSTA DE HERMOSILLO, SON.

#### 3.1. DESCRIPCION

La zona conocida como Costa de Hermosillo se encuentra localizada en la parte central del estado de Sonora, al oeste de la ciudad de Hermosillo.

En esta planicie se estableció el Distrito de Riego Núm. 51, aprovechando las aguas de la presa

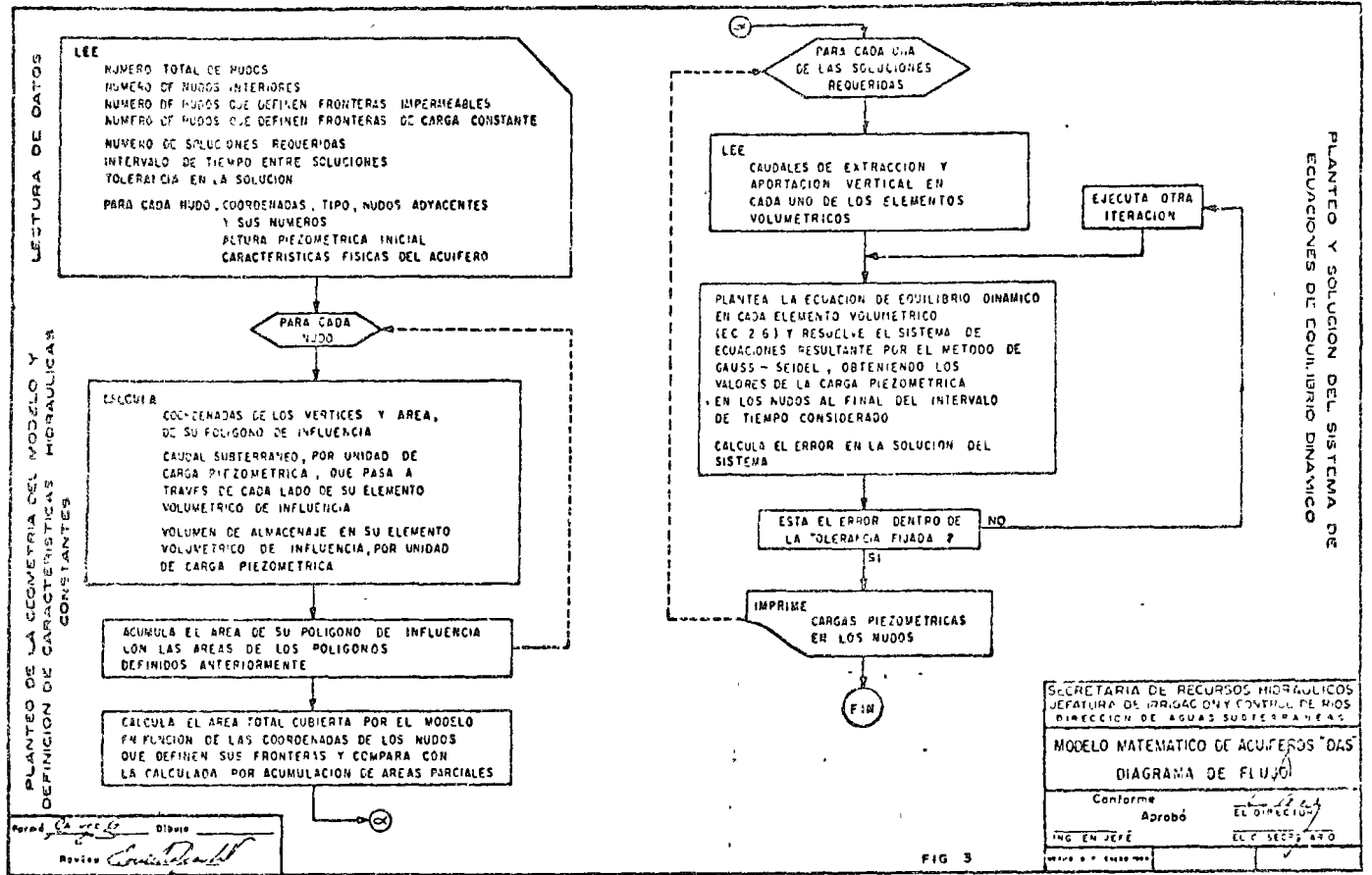


FIG 3

Abelardo L. Rodríguez y, principalmente, las aguas extraídas del subsuelo por medio de pozos profundos.

Las explotaciones se han venido efectuando en un acuífero libre, constituido por los depósitos aluviales del río Sonora. Estos depósitos cubren grandes extensiones, formando la planicie costera; tienen un espesor aproximado de 180 a 200 m. y se encuentran sobreyaciendo a un manto arcilloso que constituye, probablemente, la frontera inferior del acuífero explotado.

La recarga del acuífero proviene principalmente de las partes altas de las cuencas de los ríos Sonora y Bacoachi, existiendo también una alimentación por la infiltración de aguas de riego y de aguas meteóricas precipitadas sobre la planicie.

### 3.2. REGIMEN DE EXPLOTACION Y CONDICIONES PIEZOMETRICAS

La explotación del acuífero se inició en 1945 con un volumen anual de 18 000 000 de m.<sup>3</sup>, aproximadamente, el cual fue aumentando casi linealmente hasta el año de 1956 en el que las extracciones fueron de 760 000 000 de m.<sup>3</sup>. A partir de entonces las extracciones se incrementaron hasta un máximo de 1 137 000 000 de m.<sup>3</sup>, en 1964.<sup>6</sup> En ese año se impusieron restricciones, reduciéndose la explotación gradualmente hasta alcanzar un volu-

men de 760 000 000 en el ciclo agrícola 1967-1968.

Como consecuencia del bombeo excesivo, se produjeron abatimientos de los niveles piezométricos regionales hasta de 40 m. con respecto a las condiciones iniciales, al grado de que en algunas zonas los niveles estáticos se encuentran actualmente a 25 m. bajo el nivel medio del mar.

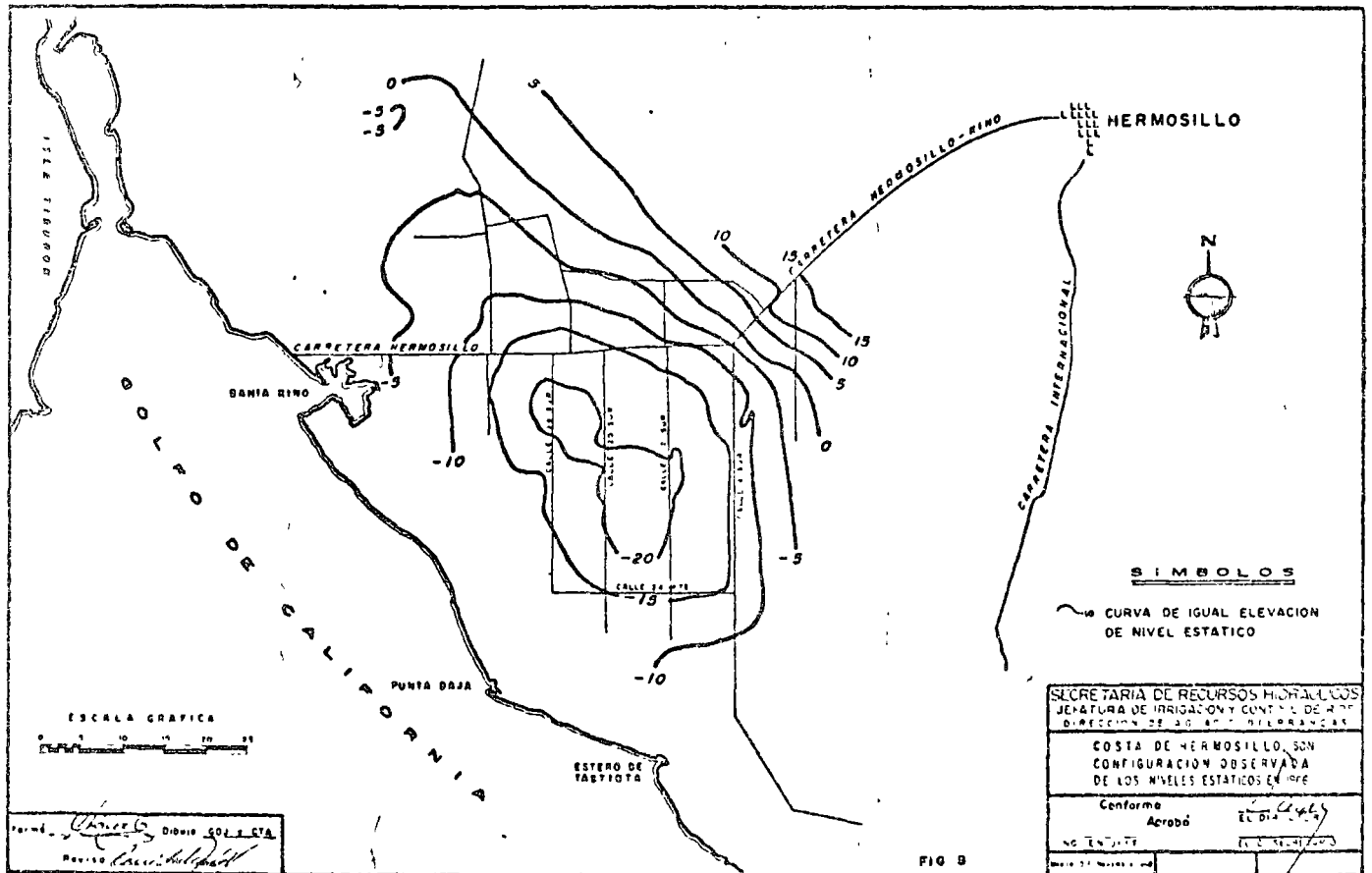
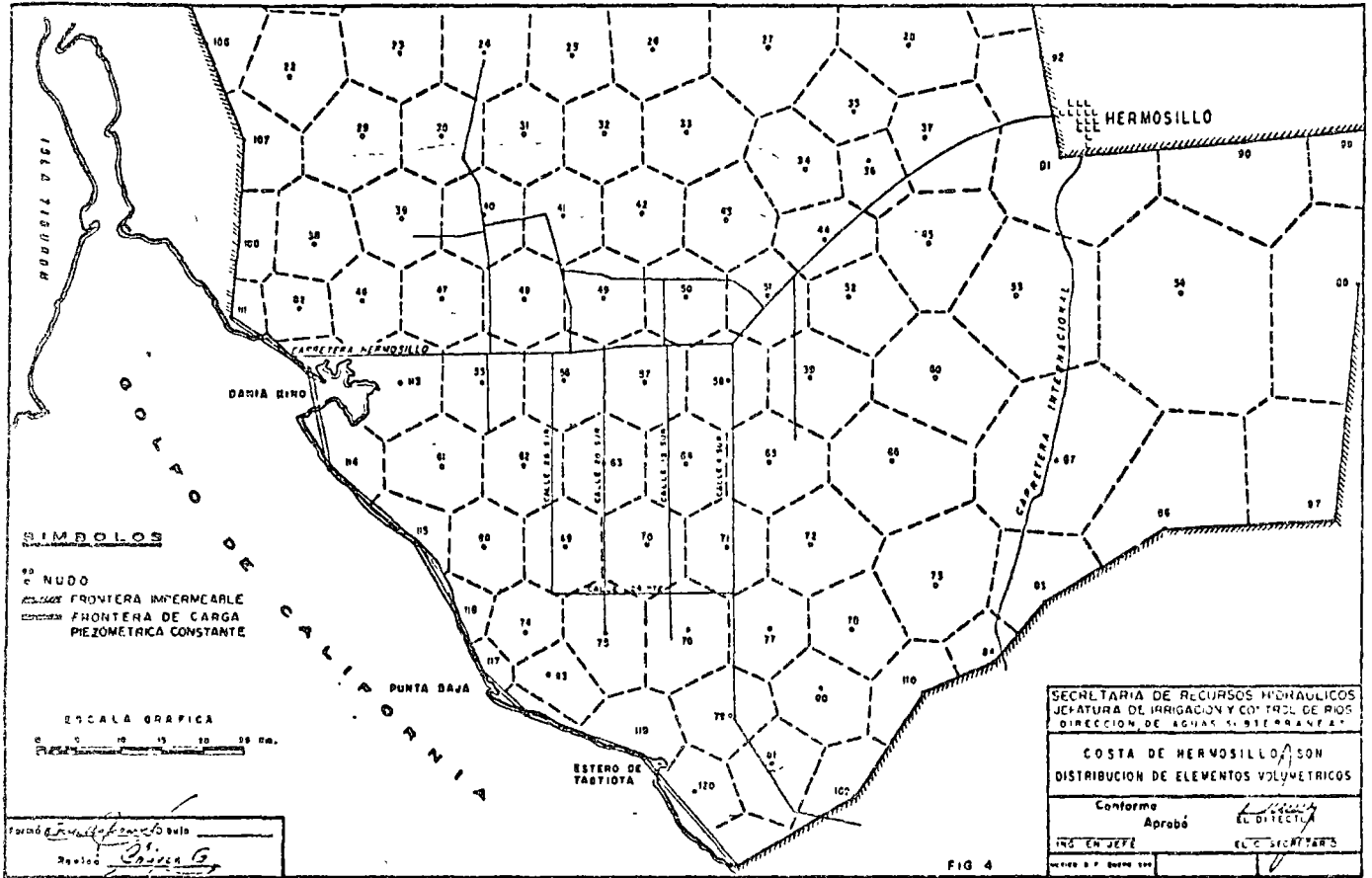
El efecto más nocivo producido por esta sobreexplotación ha sido la intrusión del agua de mar. En un estudio hidrogeológico preliminar, se llegó a la conclusión de que si se continúa el bombeo con la misma intensidad, la intrusión salina invadirá una extensa zona inutilizando gran número de pozos cercanos a la costa; recomendándose, por tal motivo, reducir las extracciones a un volumen de 350 000 000 de m.<sup>3</sup> anuales, equivalente a la recarga media anual y relocalizar parte de los pozos en una zona más alejada de la costa.

### 3.3. PLANTEO DEL MODELO

#### 3.3.1. Geometría

Tomando en cuenta las condiciones piezométricas y geológicas de la zona por estudiar, se definieron sus fronteras de la manera siguiente:

a) Al sur y sureste por el litoral del Golfo de California, cuyo nivel medio se consideró como frontera de carga constante de elevación cero.



b) Al oeste y este por poligonales que siguen aproximadamente el contacto entre la planicie costera y los macizos montañosos que la limitan. Estas fronteras se consideraron como impermeables dadas las características geológicas de los macizos mencionados.

c) No conociendo los límites del acuífero hacia el norte, la zona estudiada se limitó en esa dirección por una poligonal considerada como frontera impermeable, localizada de tal manera que quedara fuera del área de influencia del sistema de pozos.

Seguidamente se cubrió la región limitada con una malla de triángulos, trazando los de menor área en la zona de mayores evoluciones piezométricas. Los polígonos frontera se definieron con los lados exteriores de los triángulos localizados en la periferia de la región. Finalmente se trazaron las áreas de influencia de los nudos (fig. 4).

**3.3.2. Condiciones piezométricas iniciales**

Para la calibración del modelo se adoptó como condición piezométrica inicial la configuración de los niveles estáticos correspondiente a 1954, que es la más antigua confiable, y se intentó reproducir la configuración de niveles estáticos del año 1966 (fig. 5), y la evolución ocurrida en ese pe-

riodo a partir de las extracciones conocidas en ese intervalo de tiempo.

**3.3.3. Extracciones**

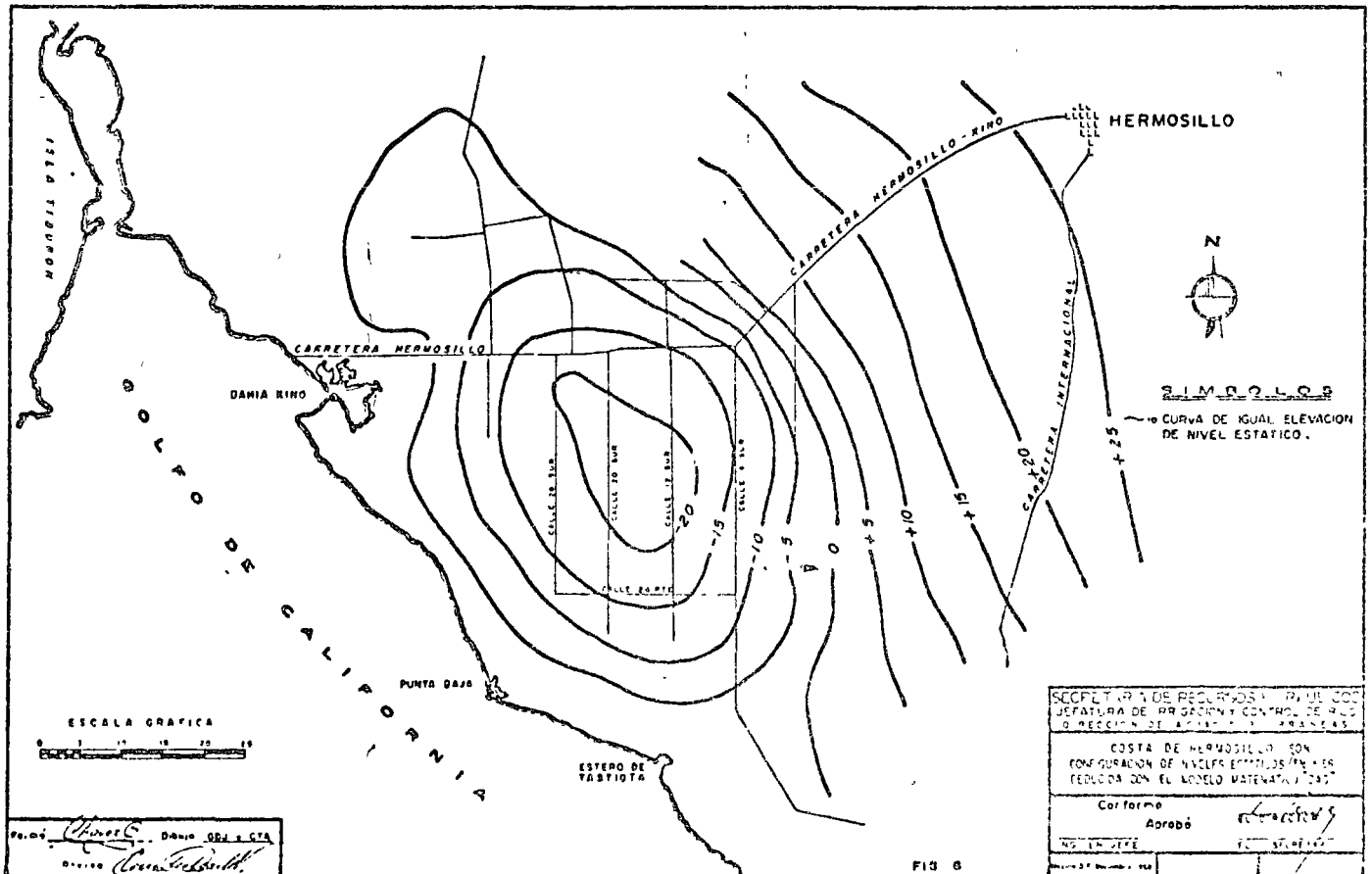
A partir de 1963 los volúmenes anuales de extracción del sistema se conocen con precisión, ya que en ese año se instalaron medidores en todos los pozos. Para años anteriores, dichos volúmenes son aproximados, ya que se estimaron con base en áreas cultivadas y lánimas de riego.

Ya que los únicos datos disponibles eran las extracciones anuales del sistema de pozos, el volumen anual de extracción por pozo tuvo que ser estimado tomando en cuenta su caudal instalado. Los volúmenes estimados para todos los pozos se sumaron para obtener la extracción anual de todo el sistema, haciendo ajustes para llegar al valor conocido.

En el modelo el volumen de extracción en cada nudo, para un año considerado, se calculó como la suma de los volúmenes extraídos, en ese año, por los pozos localizados en su área de influencia.

**3.3.4. Características hidrodinámicas**

Haciendo la suposición de que el acuífero se comporta esencialmente como un acuífero libre, se dio a las características físicas los valores iniciales.



$$T = 0.05 \text{ m.}^2/\text{s.}$$

$$S = 0.08$$

en todos los nudos.

### 3.3.5. Comparación de resultados y calibración

Con el modelo planteado como se indica en los incisos anteriores y utilizando el programa elaborado para la computadora digital, se calcularon las elevaciones piezométricas en los nudos para los años 1955 a 1966. Seguidamente se trazaron las configuraciones respectivas y las curvas de evolución calculadas para algunos vértices.

En la primera etapa de calibración, los abatimientos y gradientes deducidos con el modelo matemático, resultaron mayores que los reales y la zona de abatimientos máximos apareció en la configuración calculada con un desplazamiento con respecto a su posición en la configuración real; sin embargo, la forma y posición del cono de abatimientos coincidió prácticamente en ambas configuraciones. Por otra parte, comparando las curvas de evolución calculada con las de evolución observada en algunos nudos, se observaron discrepancias muy apreciables, no sólo en el valor absoluto de los abatimientos sino también en la ley seguida por los mismos.

La calibración del modelo consistió en variar, en forma más o menos arbitraria, las características supuestas inicialmente, de manera que la evolución obtenida se fuera ajustando a la historia piezométrica observada.

En la figura 6 se presenta la configuración reproducida después de la octava etapa de la calibración; se presenta también, en las figuras 7 a 10, la evolución observada y la evolución calculada en algunos nudos. Considerando que con los datos disponibles no es posible lograr un mejor ajuste, se aceptaron los valores de T y S de la última etapa de la calibración y se procedió a utilizar el modelo para predecir el comportamiento del acuífero para diferentes alternativas de explotación futura.

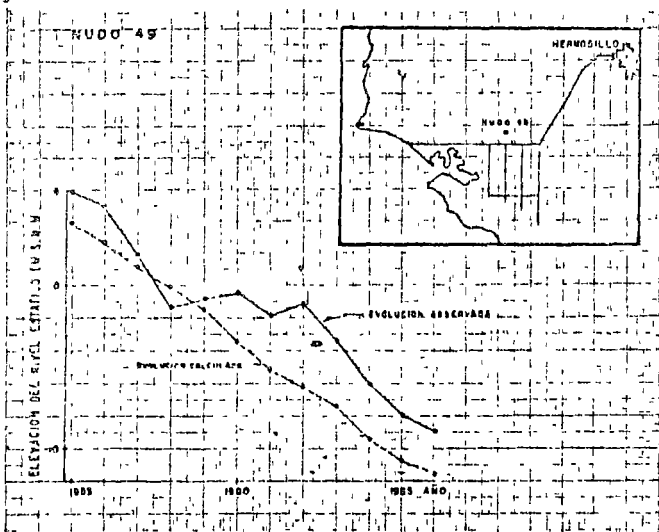


Figura 7

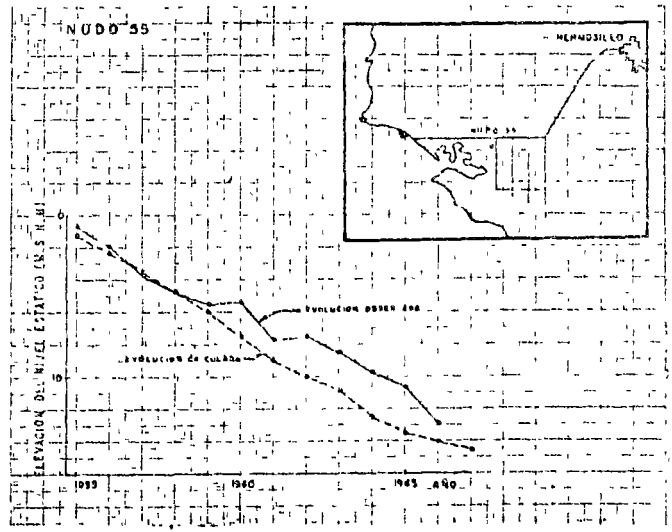


Figura 8

### 3.3.6. Aplicaciones

Se ha llegado a la conclusión, en estudios realizados, de que la única forma de sostener el volumen actual de extracciones sin aumentar los efectos perjudiciales ya descritos, es cambiando la distribución actual de las extracciones, relocalizando parcial o totalmente el campo de pozos en otra zona más alejada de la costa. Se presenta a continuación, con fines ilustrativos, la aplicación del modelo matemático para deducir el comportamiento del acuífero bajo las cuatro alternativas de redistribución de las extracciones siguientes:

**Alternativa 1.** Mantener el volumen de extracción de 800 000 000 de m.<sup>3</sup>/año, con la distribución actual de pozos.

**Alternativa 2.** Suspender gradual y uniformemente el bombeo de 220 de los pozos más cercanos a la costa, relocalizándolos en otra zona localizada al norte de la explotada actualmente. La operación se efectúa en ocho años a partir de 1969. El caudal de extracción de los pozos relocalizados es del orden de 320 000 000 de m.<sup>3</sup>/año.

**Alternativa 3.** Suspender gradual y uniformemente el bombeo de 320 pozos, relocalizándolos al norte de la zona explotada actualmente. La operación se efectúa en ocho años a partir de 1969. El caudal de extracción de los pozos relocalizados es del orden de 600 000 000 de m.<sup>3</sup>/año.

**Alternativa 4.** Igual a la anterior, con la diferencia de que el traslado de pozos se efectúa en cuatro años a partir de 1969.

El efecto que cada una de estas alternativas producirá en la evolución de los niveles piezométricos, se determinó para un periodo que alcanza hasta el año de 1976. Las configuraciones piezométricas obtenidas con cada alternativa, para ese año de 1976, se presentan en las figuras 11 a 14.

La observación de esas figuras permite hacer las siguientes consideraciones:

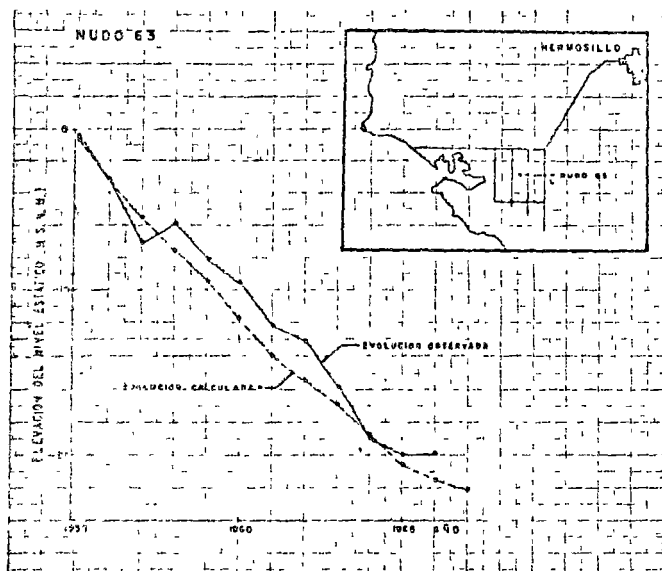


Figura 9

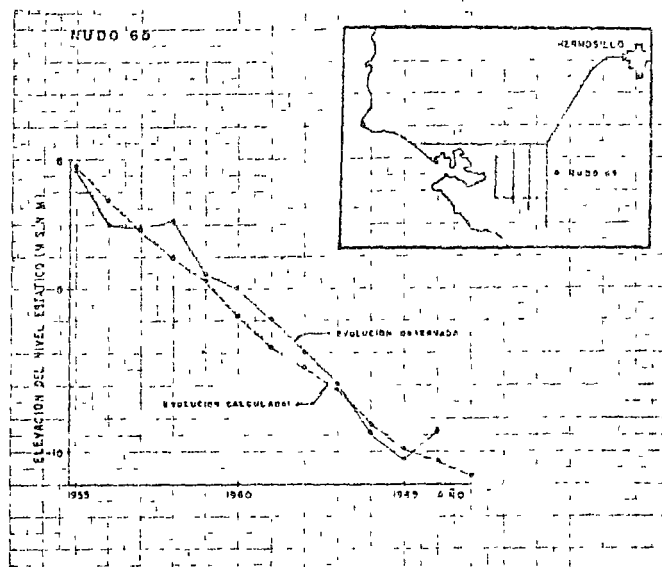


Figura 10

a) La alternativa 1 (fig. 11) no opera en la práctica, ya que la zona más deprimida se amplía considerablemente, dando como consecuencia un incremento sustancial en el gradiente desde la costa. Esto producirá, a su vez, una aceleración en el avance de la intrusión salina, que actualmente se estima del orden de un kilómetro por año, obligando a suspender anualmente la operación de un creciente de pozos que se irán salando.

b) Con la alternativa 2 (fig. 12) la zona más deprimida se reduce apreciablemente y se corre hacia el nordeste. Como consecuencia, el gradiente desde la costa se reduce un 30 por ciento con respecto al de 1966; la velocidad de la intrusión salina disminuye en proporción semejante y la vida útil de los pozos restantes se alarga.

c) Con la alternativa 3 (fig. 13) se producen recuperaciones en la zona deprimida hasta de 10 m., lo cual reduce el gradiente desde la costa en un 40 por ciento y también la velocidad de la intrusión salina. Como en la zona deprimida ya no habrá pozos, no existirá riesgo de extraer el agua salada, ampliándose así la vida útil del acuífero por más de 50 años.

d) Con la alternativa 4 (fig. 14) el efecto de recuperación es más notable y la vida útil del acuífero se alarga aún más.

Las alternativas anteriores se han estudiado con propósitos ilustrativos y habrá que estudiar otras para determinar cuál es el ritmo más adecuado para la relocalización de los pozos, atendiendo a las consideraciones socioeconómicas pertinentes.

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La utilidad del estudio en modelo de acuíferos se ve claramente en la aplicación hecha al acuífero superior de la Costa de Hermosillo. La obtención del modelo, basado en el comportamiento observado, ha permitido apreciar el efecto de diferentes alternativas futuras de operación, lo que

constituye el primer paso para poder escoger la alternativa óptima. Un resultado de utilidad inmediata es la posibilidad de alargar la vida útil del acuífero, mediante la relocalización de las explotaciones.

Una vez calibrado el modelo, cada alternativa puede estudiarse en dos o tres días, incluyendo su presentación gráfica, mientras que el cálculo directo representaría un trabajo tan abrumador que no sería práctico realizarlo.

Durante la operación del modelo matemático empleado, se han hecho palpables sus ventajas sobre los modelos de analogía eléctrica. La calibración del modelo de la Costa de Hermosillo se realizó en ocho tanteos, en los que fue posible variar las características de cada uno de los nudos y de las fronteras del acuífero con simples cambios en los datos del programa para computadora. Esta flexibilidad y rapidez no la tienen los modelos de analogía eléctrica. La red empleada tiene, además, la ventaja de adaptarse fácilmente a fronteras irregulares.

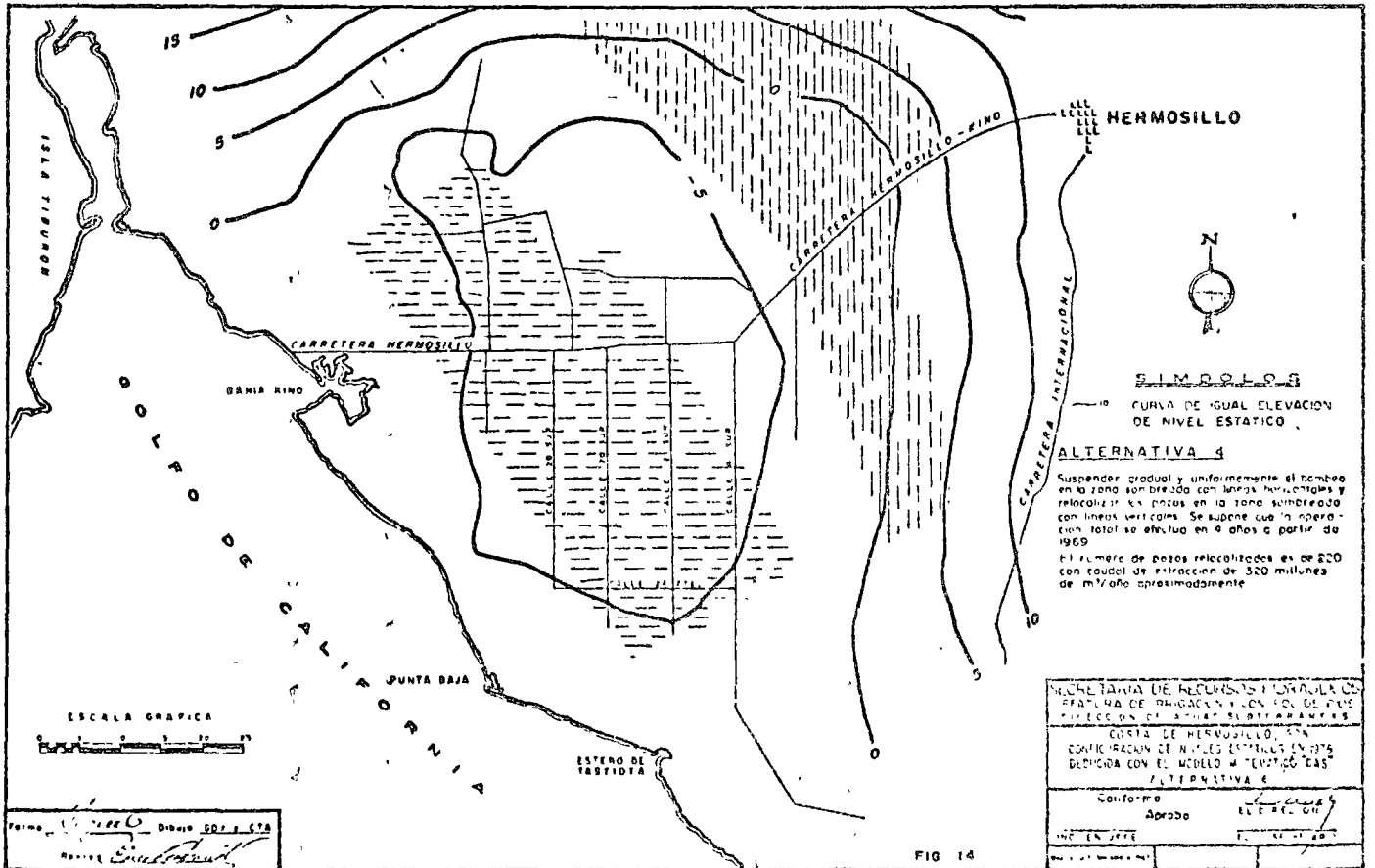
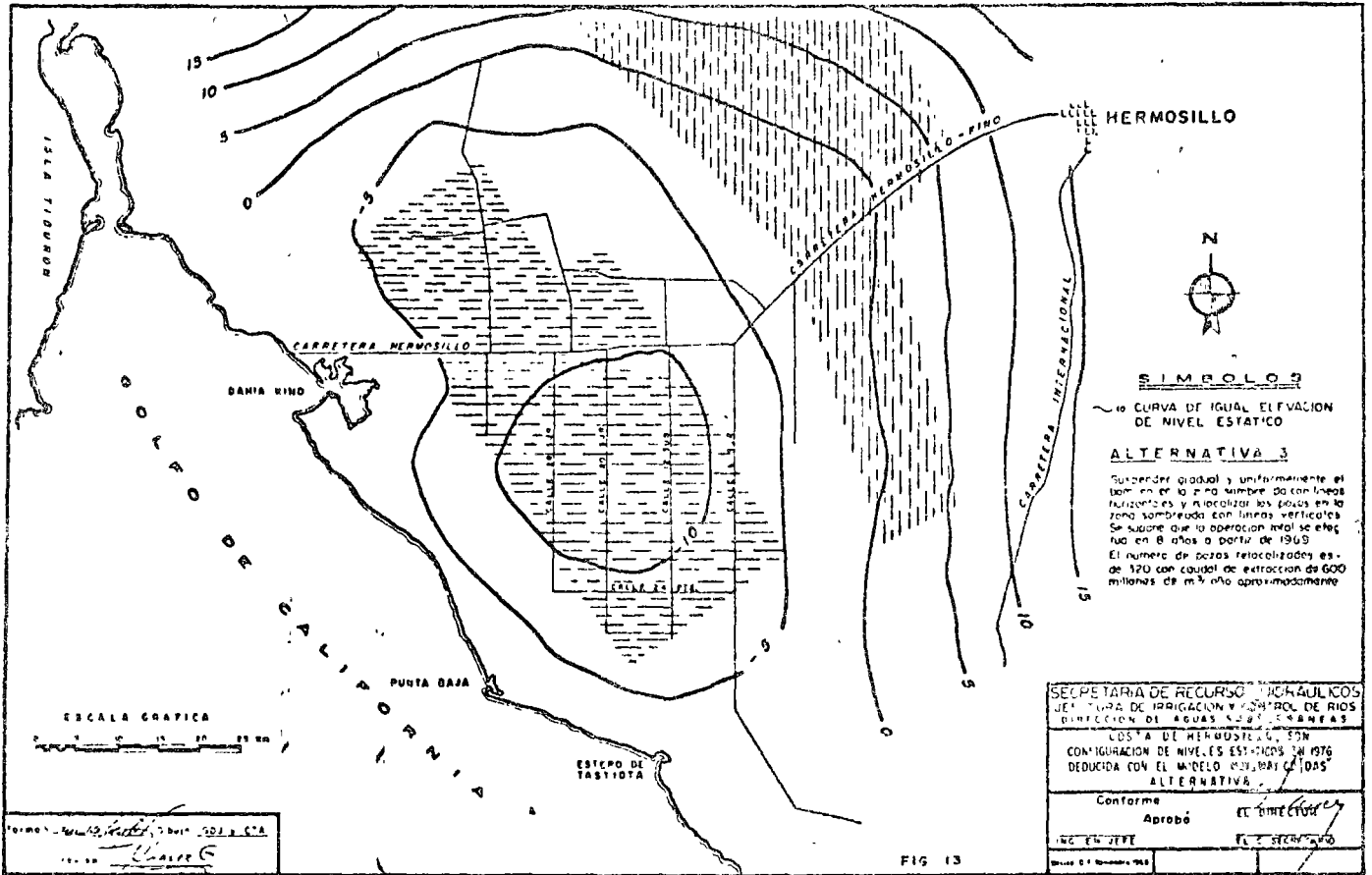
Por último, se quiere hacer resaltar la importancia que tiene contar con una historia de evolución piezométrica e hidrometría de las extracciones para calibrar el modelo.

#### BIBLIOGRAFIA

1. HANTUSH, MAHDI S. *Advances in hydroscience*. Vol. 1, cap. 5. Academic Press, 1964.
2. ZIENKIEWICZ, O. C. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. McGraw-Hill, 1967.
3. MacNEAL, R. H. "An asymmetrical finite difference network" *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. XI, Num. 3, 1953.
4. TYSON, H. N., y E. M. WEBER "Ground-water management for the nation's future computer simulation of ground-water basins" *Proceedings of the ASCE, Journal of the Hydraulics Division* July 1964.
5. SMITH, G. D. *Numerical solution of partial differential equations*. Oxford Mathematical Handbooks, 1965.
6. Construcciones Aiel, S. A. Estudio hidrogeológico preliminar de los acuíferos de la costa de Hermosillo, Son.







# THE EFFECT OF PUMPING OVER AN AREA

by

*Robert E. Glover*

Professor of Civil Engineering  
Colorado State University  
Fort Collins, Colorado

## Synopsis

Lowering of the water table due to operation of pumps in the area can be estimated in terms of the drawdown at the corner of a rectangle over which pumping is uniformly distributed. A chart is presented giving the drawdown at the corner of a pumped rectangle in terms of the width to length ratio  $W/L$  and the dimensionless parameter  $L/\sqrt{4\alpha t}$  where  $\alpha$  and  $t$  represent the aquifer constant and time. Combinations of rectangles can be used as the basis of an estimate of the drawdown at points inside or outside of either a rectangular area or an area of irregular outline.

## Introduction

Accumulation of geologic information and a continuing search for water by an expanding population has disclosed the presence of aquifers underlying wide areas with permeabilities and saturated depths which will provide well flows of capacities suitable for irrigation.

A considerable investment is required to install a well and a sufficiently long period of usefulness must be assured if these costs are to be recovered. Formulas are available for estimating the drawdown produced by pumping the well [1] but there remains the possibility that the water table may be lowered by operation of other wells in the area. The chart described in the following paragraphs may be used to estimate the sinking of the water table which may need to be allowed for in setting the pump.

## Idealization

If the location and pumping rates for all of the wells in an area were known it would be possible to use available formulas [1] for estimating the drawdown to be expected at some given location. Although this procedure would be straightforward it would be time consuming if there were large numbers of wells to be considered. This type of approach could be expected to be hindered also by a lack of the detailed information needed to make it or by the tedious and expensive collection of the needed data if records could be located.

The areas over which pumping is being done and data on the total amounts of water pumped will generally be available however, and it will be advantageous to introduce the assumption that the pumping is uniformly distributed over the area. A further assumption is made that the pumping is distributed over the area of a rectangle. The drawdown is then computed at the corner.

By combining rectangles the drawdown due to distributed pumping may be computed for locations either inside or outside of the pumped area. Some examples are presented later.

### Development of Formulas

The drawdown produced by a single well, at the radius  $r$  from the well, when pumped steadily at the rate  $Q$  for the time  $t$  is given by the relation (1)

$$s = \frac{Q}{2\pi KD} \int_{\frac{r}{\sqrt{4at}}}^{\infty} \frac{e^{-u^2} du}{u} \quad (1)$$

The integral appearing in formula (1) has been tabulated [1]. The drawdown at the center of a circular area of outer radius  $R$  may be expressed in terms of formula (1) by the integral

$$s_1 = \int_0^R \frac{w2\pi r dr}{2\pi KD} \left( \int_{\frac{r}{\sqrt{4at}}}^{\infty} \frac{e^{-u^2} du}{u} \right) \quad (2)$$

An integration by parts, arranged in such a way that the integral of formula (1) is differentiated, yields the result:

$$s_1 = \frac{wt}{V} \left[ 2\left(\frac{R^2}{4at}\right) \int_{\frac{R}{\sqrt{4at}}}^{\infty} \frac{e^{-u^2} du}{u} + 1 - e^{-\frac{R^2}{4at}} \right] \quad (3)$$

In terms of the tabulated exponential integral [3,4] this relation can be put into the following form, which has some advantages for computation:

$$s_1 = \frac{wt}{V} \left[ \left(\frac{R^2}{4at}\right) \int_{\frac{R^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} + 1 - e^{-\frac{R^2}{4at}} \right] \quad (4)$$

The quantity  $(wt/V)$  is identifiable as the rate at which the water table would sink if lateral flow were prevented. The expression within the brackets is a function of the dimensionless parameter  $(R^2/4at)$ .

The drawdown at the apex of a narrow sector of angular width  $d\phi$  is:

$$ds_2 = \frac{B_1 d\phi}{2\pi}$$

The drawdown at the corner of a rectangle may now be computed by integrating this expression for the two triangles into which the rectangle is divided by the diagonal drawn from the corner. Integration difficulties may be overcome by using Simpson's rule to make a numerical evaluation or by using a planimeter to make a graphical evaluation over the right angle between the two sides adjacent to the corner. Both of these procedures were used in constructing the chart of Figure 1.

### Examples

The method of using the chart of Figure 1 will be illustrated by the following example: An area covering two townships has an aquifer under it with the properties  $K = 0.001$  ft/sec;  $D = 150$  ft;  $V = 0.15$ ;

$a = \frac{KD}{V} = 1$  ft<sup>2</sup>/sec. Water lifted by pumps is consumed at a rate which would, if distributed over the area, accumulate to a depth of 0.2 ft each year. Then  $w = 0.2$  ft/year or  $6.349(10)^{-9}$  ft/sec. The length  $L$  in the east-west direction is 12 miles or  $(12)(5280) = 63360$  feet. It is desired to estimate the drawdown at various points in the area after 20 years of pumping.

### Solution

Twenty years is equivalent to  $(20)(31536000) = 630,720,000$  seconds.

If the boundaries of the area were impermeable the sinking of the water table at the end of this period would be:

$$\frac{wt}{V} = \frac{(6.349)(10)^{-9}(0.63072)(10)^9}{0.15} = 26.67 \text{ ft}$$

Also:

$$\frac{L}{\sqrt{4at}} = \frac{(12)(5280)}{\sqrt{(4)(1.0)(630720000)}} = \frac{63360}{50228} = 1.262$$

Then from the chart, with  $(W/L) = 0.5$ ;  $s/\frac{wt}{V} = 0.198$  and the drawdown at the corner of the area is:

$$s_2 = 0.198 \frac{wt}{V} \text{ or } s_2 = (0.198)(26.67) = 5.28 \text{ ft}$$

The drawdown at the center of the area would be given by the sum of the drawdowns at the corners of the four rectangles formed by passing an east-west

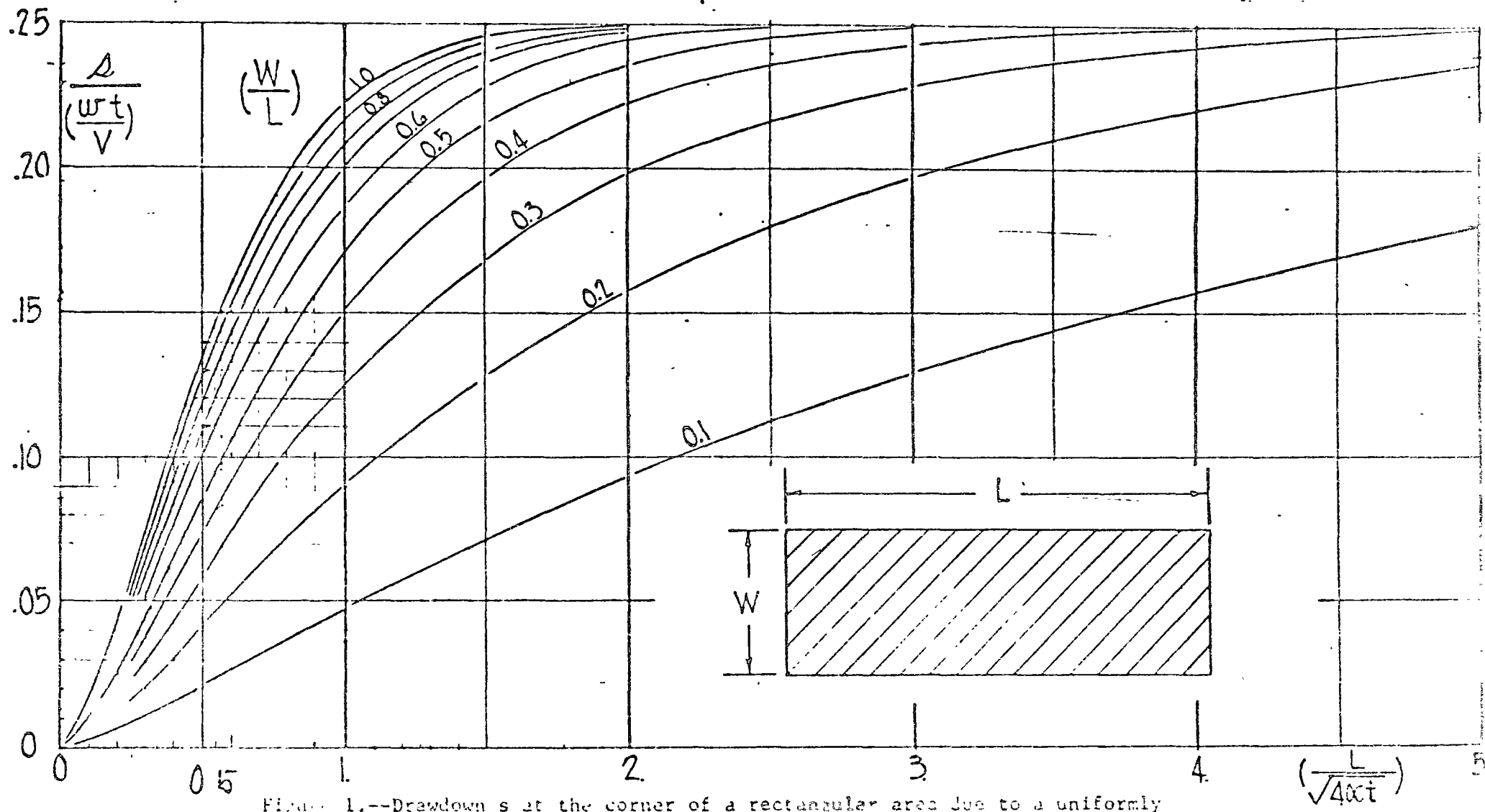


Figure 1.--Drawdown  $s$  at the corner of a rectangular area due to a uniformly distributed pumping at the rate  $w$ .

and a north-south line through the mid point of the area. The (W/L) values for these rectangles are the same as for the entire area but

$$(L/\sqrt{4at} = 0.631 \text{ and } s/\frac{wt}{V} = 0.112.$$

The drawdown at the center of the area is therefore:

$$s_c = (26.67)(0.112)(4) = 11.95 \text{ ft.}$$

At the middle of the north or south side the two rectangles cornering on the point are 6 miles square and the ratio W/L = 1.0. Then with:

$$\frac{L}{\sqrt{4at}} = \frac{(6)(5280)}{50228} = 0.631 \text{ the chart yields}$$

$$s/\frac{wt}{V} = 0.167$$

The drawdown at the middle of the south side is then:

$$s_m = (2)(0.167)(26.67) = 8.91 \text{ ft}$$

At the middle of the east and west sides a similar computation yields:

$$s_m = 5.97 \text{ feet.}$$

At a point 9 miles south of the center of the area the drawdown would be computed by adding the drawdowns produced by pumping in two areas 6 by 9 miles on a side and deducting the effect of pumping over two areas 6 miles on a side.

For the 6 by 9 mile areas

$$\frac{W}{L} = 0.667, \frac{L}{\sqrt{4at}} = \frac{(9)(5280)}{50228} = \frac{47520}{50228} = 0.946$$

From the chart

$$s/\frac{wt}{V} = 0.189$$

Then the drawdown at this point is:

$$s_{9s} = 2(0.189 - 0.167)(26.67) = 0.59 \text{ ft}$$

At a point 12 miles east of the center of the area a similar computation yields:

$$s_{12e} = 0.53 \text{ ft}$$

At a point 9 miles south and 12 miles east of the center of the area the draw-down is estimated by adding the effect of a rectangle 12 by 18 miles on a side deducting the effect of pumping in rectangles 6 by 12 miles on a side and 6 by 18 miles on a side, respectively. Since the effect of an area 6 miles on a side has been deducted twice in this process it will be necessary to add back the effect of the pumping in this area. For the area 12 by 18 miles on a side:

$$\frac{W}{L} = 0.667 \quad \frac{L}{\sqrt{4at}} = 1.892 \quad s/\frac{wt}{V} = 0.244$$

For the area 6 by 18 miles on a side

$$\frac{W}{L} = 0.333 \quad \frac{L}{\sqrt{4at}} = 1.892 \quad s/\frac{wt}{V} = 0.202$$

For the area 6 by 12 miles on a side

$$\frac{W}{L} = 0.5 \quad \frac{L}{\sqrt{4at}} = 1.262 \quad s/\frac{wt}{V} = 0.198$$

For the area 6 by 6 miles on a side

$$\frac{W}{L} = 1.00 \quad \frac{L}{\sqrt{4at}} = 0.631 \quad s/\frac{wt}{V} = 0.167$$

Then

$$s_{12e9s} = (0.244 - 0.202 - 0.198 + 0.167) 26.67 = 0.29 \text{ ft}$$

The results of these computations can be summarized as follows:

Point	drawdown (feet)
At center of the area	11.95
At center of the north and south sides	8.91



At center of the east and west sides	5.97
At the NE, NW, SW and SE corners	5.28
At a point 9 miles south of the center of the area	0.59
At a point 12 miles east of the center of the area	0.53
At a point 12 miles east and 9 miles south of the center of the area	0.29

### Conclusions

A generalized chart has been developed giving the drawdown at the corner of a rectangular area in which pumping can be idealized as being uniformly distributed over the area. The results are given in terms of the ratio  $W/L$  and the dimensionless parameter  $(L/\sqrt{4at})$ . By adding, or adding and subtracting, the drawdowns produced by pumping over suitably chosen rectangles the drawdown at selected points either inside of or outside of the area of interest can be estimated. A pumped area of irregular shape can be represented, approximately, by a sum of rectangles. To get the total drawdown at a selected well the drawdown produced by this well [1,2], must be added to the drawdown produced by the distributed pumping.

### Notation

The following notation is used:

- D represents the saturated thickness of the aquifer (ft)
- K the permeability of the aquifer (ft/sec)
- KD the transmissivity of the aquifer (ft<sup>2</sup>/sec)
- L the length of a rectangle within which a sufficient number of wells are operated so that approximation of their effect can be reasonably idealized as being uniformly distributed (ft)
- Q the flow of a well (ft<sup>3</sup>/sec)
- r radius (ft)
- R an outer radius (ft)
- s drawdown due to pumping (ft)
- t time (seconds)
- u a variable of integration (dimensionless)

- V the ratio of the drainable voids to the gross volume (dimensionless)
- w the uniformly distributed pumping rate. It is equal to the total pumping in the area divided by the area  $w = (Q/WL)$  (ft/sec)
- W the width of the pumped area
- $\alpha = \frac{KD}{V}$  the aquifer constant (ft<sup>2</sup>/sec)

Consistent notation is used. The chart will work in any unit system so long as only one unit of a kind is permitted. The two units involved are length and time.

#### References

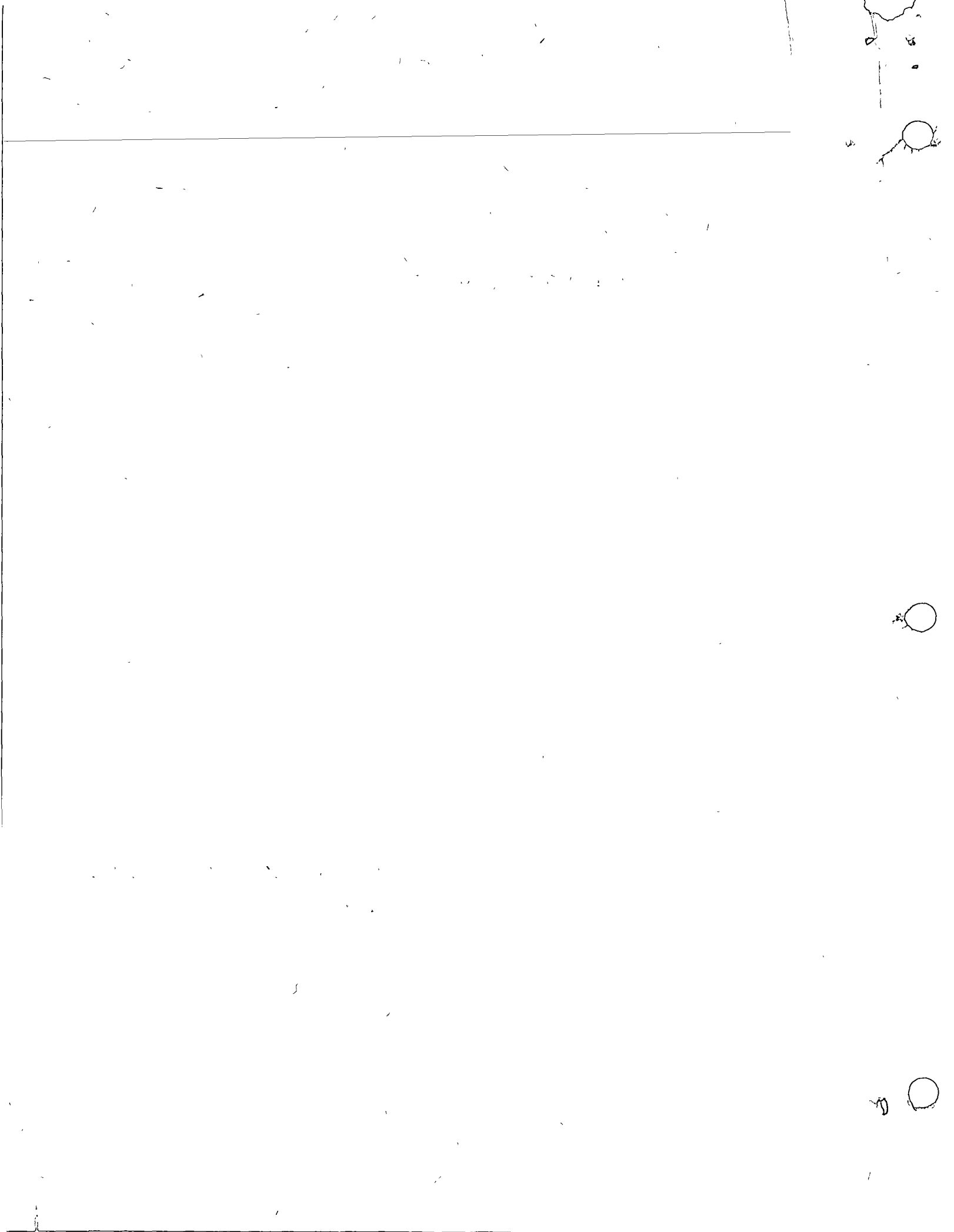
- [1] Glover, R. E., Ground water Movement - Engineering Monograph No. 31 - Second printing 1966 - Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- [2] Glover, R. E., and M. W. Bittinger, Drawdown due to Pumping from an Unconfined Aquifer - Trans. ASCE., Vol. 126, Part III 1961. Paper No. 3142, pp. 176-183 incl.
- [3] Jahnke, E., and F. Emde, Tables of Functions, Dover 1945.
- [4] National Bureau of Standards - Tables of Functions and Zeros of Functions - Applied Mathematics Series 37 - 1954.

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

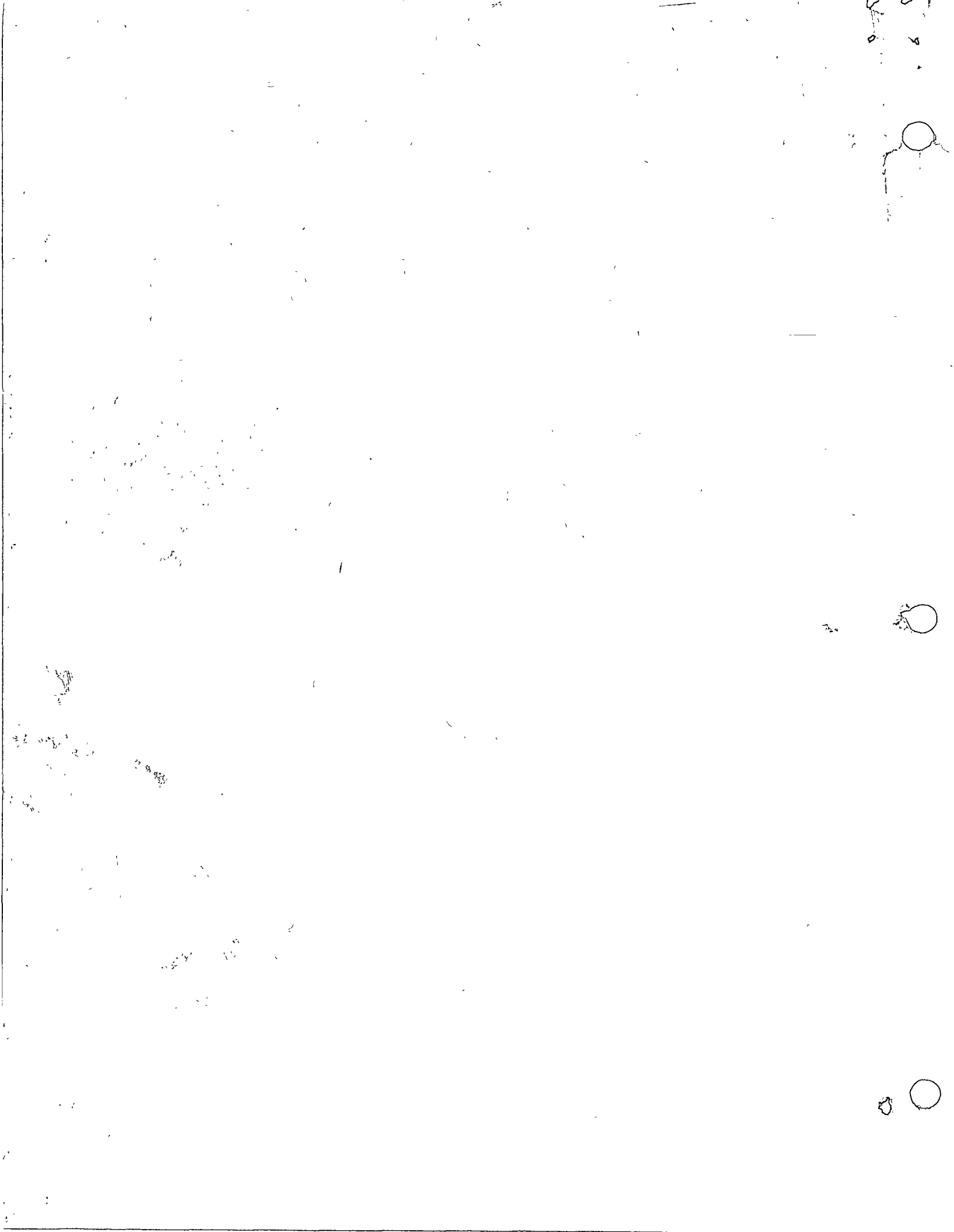
SECUELA DE CALCULO PARA CONOCER DE LA  
HIDRAULICA MAS ACEPTABLE DURANTE  
LA PERFORACION DEL POZO

ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ

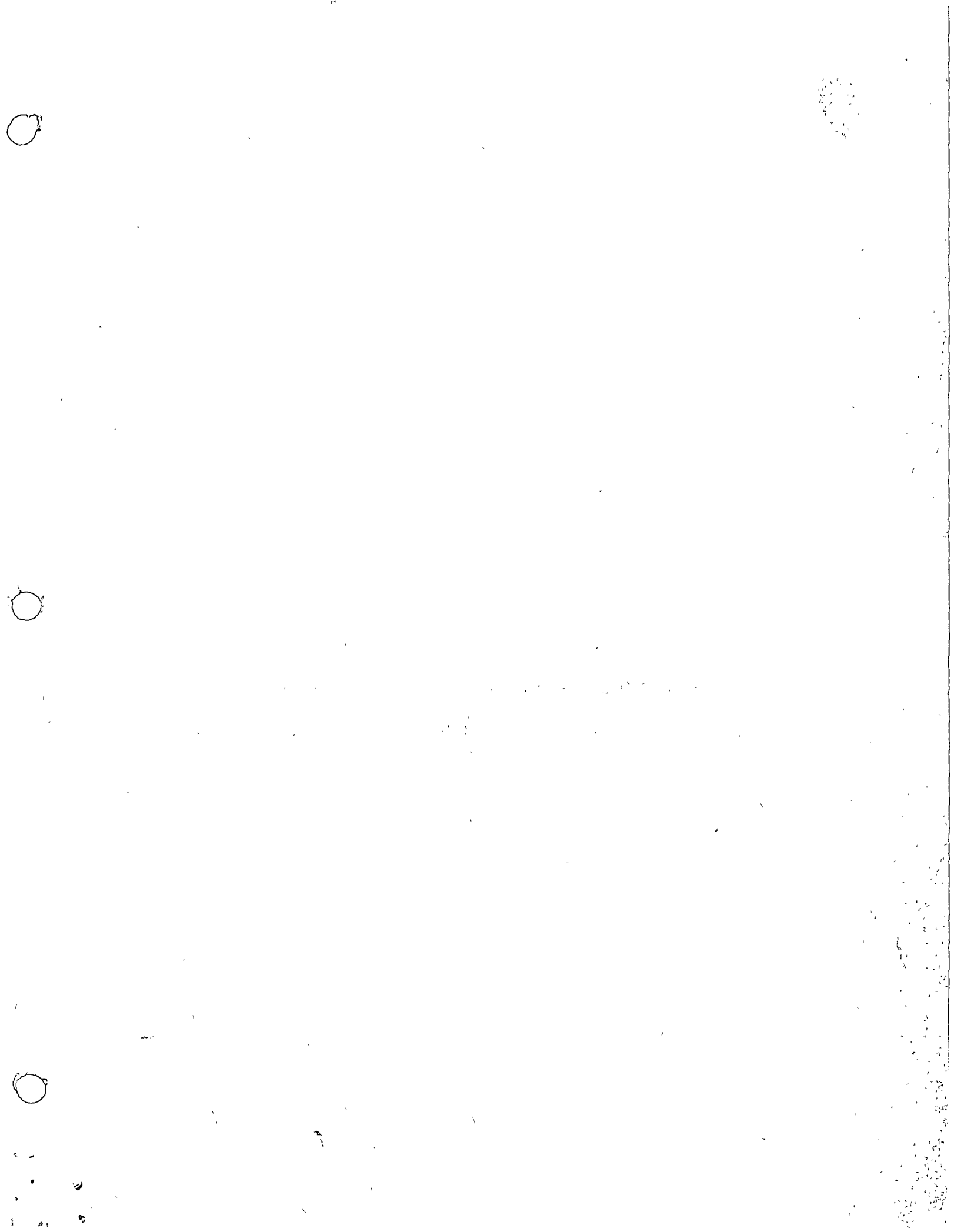
JULIO DE 1976.



CAPITULO No. 1



SECUELA DE CALCULO PARA CONOCER DE LA  
HIDRAULICA MAS ACEPTABLE DURANTE  
LA PERFORACION DEL POZO.







# HYDRAULIC DATA - WORK SHEET

TRACTOR EXAMPLE Rig No. \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

Well Name \_\_\_\_\_ Field, County & State \_\_\_\_\_

SURFACE EQUIPMENT			DRILLING EQUIPMENT		
Make: No. 1 <u>X</u>	No. 2 _____		Size of Hole: <u>9"</u>		
Model: No. 1 _____	No. 2 _____		Drill Stem: Size: <u>4 1/2"</u>	Wt: <u>16.60</u>	
Length of Stroke: No. 1 <u>16</u>	No. 2 _____		Type Tool Joints <u>FULL HOLE</u>	O.D. <u>6"</u>	I.D. <u>3"</u>
Strokes Per Minute: No. 1 <u>65</u>	No. 2 _____		Drill Collars: Length: <u>450</u>	O.D. <u>6 1/4"</u>	I.D. <u>2 3/4"</u>
Rod Size: No. 1 <u>2 1/4</u>	No. 2 _____		Mud Type <u>WATER BASE</u>	Mud Weight <u>11#</u>	
Surface Equipment, Case <u>3</u>					

Minimum Annular Velocity.....	<u>120</u>	FPM
Circulation Rate Required for Minimum Annular Velocity.....	<u>300</u>	GPM
a. Size of Liners (Smallest to Give Minimum Annular Velocity).....	<u>5 1/2</u>	IN.
b. Circulation Rate with this Liner.....	<u>320</u>	GPM
c. Annular Velocity with this Liner.....	<u>130</u>	FPM

## PRESSURE LOSSES FOR SURFACE EQUIPMENT AND COLLARS

(Use Circulation Rate of Line 3b)

Through Surface Equipment.....	<u>19</u>	PSI
Through Drill Collar Bore: (PSI/100') x Hundreds of Feet = $\frac{20}{100} \times 450$	<u>90</u>	PSI
Around Drill Collars: (PSI/100') x Hundreds of Feet = $\frac{2}{100} \times 450$	<u>9</u>	PSI
Total Pressure Loss: (Add Lines (4) Through (6)).....	<u>118</u>	PSI
Pressure Rating of Pump.....	<u>2100</u>	PSI
Correction for Mud Weight: $\frac{\text{Line (3)} \times 10}{\text{Mud Weight}} = \frac{2100 \times 10}{11}$	<u>1909</u>	PSI
Pressure Remaining for Bit and Drill Stem: (Subtract Line (7) from Line (9)).....	<u>1791</u>	PSI

## PRESSURE LOSSES FOR 1000 FEET OF DRILL STEM

Losses through 1000 Ft. of Drill Stem.....	<u>47</u>	PSI
Losses Around 1000 Ft. of Drill Stem.....	<u>6</u>	PSI
Total Pressure Loss. (Add Lines (11) and (12)).....	<u>53</u>	PSI

## NOZZLE SELECTION

	<u>3-5/16"</u>	<u>2-5/16"</u> <u>1-11/32"</u>	<u>2-11/32"</u> <u>1-5/16"</u>	<u>3-11/32"</u>	<u>2-11/32"</u> <u>1-3/8"</u>
Nozzle Combination.....					
Pressure Drop Through Nozzles.....	<u>1782</u>	<u>1555</u>	<u>1370</u>	<u>1217</u>	<u>1076</u>
Nozzle Velocity.....	<u>445</u>	<u>416</u>	<u>390</u>	<u>368</u>	<u>346</u>
Pressure Remaining for Drill Stem: (Subtract Line (14b) from Line (10)).....	<u>9</u>	<u>236</u>	<u>421</u>	<u>574</u>	<u>715</u>
Length of Drill Stem that can be Added: $\frac{\text{Line (16)}}{\text{Line (13)}} \times 1000$ .....	<u>170</u>	<u>4450</u>	<u>7940</u>	<u>10,830</u>	<u>13,490</u>
Depth at which Pump will be Fully Loaded: (Line (17) Plus Drill Collar Length).....	<u>620</u>	<u>4900</u>	<u>8390</u>	<u>11,280</u>	<u>13,940</u>
Minimum Horsepower Required with Pump Fully Loaded (IHP/PSI) x Line (8) = $220 \times 2100$ .....					<u>462</u>

These losses are for 10# mud. The single correction in line (9) properly corrects for mud weight. However, if actual losses are needed multiply by \_\_\_\_\_

LINES 1 & 2 ANNULAR VELOCITY CIRCULATION RATE  
 LINE 3 SIZE OF LINERS  
 LINE 4 PRESSURE LOSS THRU SURFACE EQUIPMENT  
 LINE 5 PRESSURE LOSS THRU DRILL COLLAR BORE  
 LINES 6 & 7 PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS  
 LINE 8 PRESSURE RATING OF PUMP

1  
2  
3  
4



## FOREWORD

Are my pumps large enough?

What annular velocity and circulation rate should be used?

Which of the available nozzle sizes should be used in the bits?

No doubt these and many other "complex sounding" questions have occurred to you when contemplating the use of jet rock bits. While it is true that certain calculations must be made to get the answers to these questions, they are not as difficult as they might appear.

It must be remembered that the so-called "Jet Bit" is merely a method of fulfilling an old requirement of keeping the bottom of the hole and the cutters clean. This jet method of drilling still depends on the rock bit to drill the formation. The use of jet bits does not necessarily require an increase in the circulation rate, but does require sufficient nozzle velocity to obtain satisfactory performance. This may require a greater horsepower output from the slush pump, and for this reason certain calculations and plans should be made to avoid overloading the pumps. It may even be found desirable to reduce the circulation rate normally used for conventional drilling in order to more efficiently utilize the available pump pressure and horsepower, provided of course that sufficient return velocity is maintained.

This pamphlet has been prepared to assist you in easily obtaining answers to the above questions. A sample work sheet has been prepared together with an explanation as to how the calculations were made. The procedure outlined in this pamphlet for calculating a hydraulic program is based on the assumption that the surface pressure is limited only by the pressure rating of the pump and that a constant pump speed must be maintained. If either of these items are not true, then it is possible that a better hydraulic program could be designed than as outlined in this bulletin. The exact calculating procedure to use will depend on the conditions under which the pump must be run and on whether it is desired to maximize bit horsepower or impact force. Your Hughes representative will be happy to give his assistance in preparation of a hydraulics program as outlined herein, or to design a program when the pump is to be run under conditions other than those specified above.

In order to simplify the tables it was necessary to introduce slight errors in some of the tabulated pressure losses. However, these errors will affect the final answer by less than five per cent, and therefore can be ignored for all practical purposes.

The purpose of the work sheet is to offer a simple means for planning and examining each phase of the hydraulic system in order to more efficiently use existing equipment. If it is found that the pumps are overloaded before reaching the depth required, each step should be examined to determine what, if anything, can be done to remedy this condition.

A supply of blank work sheets is included in the back of this pamphlet for your use. When additional work sheets are needed, they may be obtained from your Hughes Tool Company representative.

LINES 1 & 2  
ANNULAR VELOCITY  
CIRCULATION RATE

LINE 3  
SIZE OF LINERS

LINE 4  
PRESSURE LOSS THRU  
SURFACE EQUIPMENT

LINE 5  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL COLLAR BORE

LINES 6 & 7  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL COLLARS

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100



## LINE (1) - ANNULAR VELOCITY

The required circulation rate in gallons per minute depends upon the hole size, drill stem size, and the annular velocity in feet per minute of the mud. The minimum annular velocity, line (1), is the desired rate of mud return between the wall of the hole and the drill stem. This rate usually varies between 100 feet per minute for hard digging to 180 feet per minute for soft digging. Your own experience will tell you what average velocity is required for the particular well which you expect to drill.

### EXAMPLE

For the example work sheet a minimum annular velocity of 120 feet per minute was specified and is entered in line (1).

## LINE (2) - CIRCULATION RATE

Use the table on the following sheets to select the circulation rate which you intend to use. Careful consideration should be given to this selection of circulation rate; as pressure losses through the system increase as the circulation rate is increased. However, it is necessary to select a circulation rate that will give the desired minimum annular velocity.

### EXAMPLE

On the sample work sheet, the hole size is 9" and drill stem size is 4½". In this particular example, an annular velocity of 120 feet per minute was selected as being desirable. Using this example, it is found from the table on the next sheet that the circulation rate should be 300 gallons per minute. This figure is then written in on line (2) of the sample work sheet.

LINES 1 & 2  
ANNULAR VELOCITY  
CIRCULATION RATE

LINE 3  
SIZE OF LINERS

LINE 4  
PRESSURE LOSS THRU  
SURFACE EQUIPMENT

LINE 5  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL COLLAR BORE

LINES 6 & 7  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL COLLARS

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP

0  
1



## CIRCULATION RATE—GALLONS PER MINUTE

HOLE SIZE	PIPE SIZE	FOR ANNULAR VELOCITY—FEET PER MINUTE											
		70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
4 3/8"	2 3/8"	40	50	50	60	60	70	80	80	90	90	100	100
	2 1/2"	70	80	90	100	110	110	120	130	140	150	150	170
5 3/8"	3 1/2"	60	60	70	80	90	90	100	110	120	130	130	140
	2 3/8"	80	80	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
6"	3 1/2"	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
	4"	60	70	70	80	90	100	110	110	120	130	140	150
6 3/8"	3 1/2"	70	80	80	100	110	120	130	140	150	170	180	180
	4"	60	70	80	80	100	110	110	120	130	140	150	160
6 1/2"	3 1/2"	80	90	100	110	120	130	140	150	160	180	190	200
	4"	70	80	80	80	100	110	120	130	140	150	160	170
6 3/4"	3 1/2"	100	110	120	140	150	160	180	190	200	220	230	250
	4"	80	100	110	120	130	150	160	170	180	190	210	220
7 3/8"	3 1/2"	140	160	180	200	220	240	260	290	310	330	350	370
	4"	130	150	170	180	210	230	240	260	280	300	320	340
8 3/8"	4 1/2"	120	140	150	170	190	210	220	240	250	270	290	310
	3 1/2"	170	190	210	240	260	280	310	330	350	380	400	430
8 1/2"	4"	150	180	200	220	240	270	290	310	330	350	380	400
	4 1/2"	140	160	180	200	220	240	260	290	310	330	350	370
8 3/4"	3 1/2"	170	200	220	250	270	290	320	340	370	390	420	440
	4"	160	180	210	230	250	280	300	320	340	370	390	410
8 7/8"	4 1/2"	150	170	190	210	230	250	280	300	320	340	360	380
	3 1/2"	180	200	230	250	280	300	320	350	380	410	420	450
8 1/4"	4"	170	190	210	240	260	290	310	330	350	380	410	430
	4 1/2"	160	180	200	220	240	270	290	310	330	350	380	400
8 3/8"	5"	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
	3 1/2"	180	210	210	260	290	320	340	370	390	420	450	470
8 3/4"	4"	170	200	220	250	270	300	320	350	370	400	420	440
	4 1/2"	160	180	210	230	250	280	300	320	340	370	390	410
9"	5"	150	170	190	210	230	250	270	290	320	340	360	380
	4"	190	210	240	270	290	320	340	370	400	420	450	480
9 1/8"	4 1/2"	170	200	220	250	270	300	320	350	370	400	420	450
	5"	160	180	210	230	250	270	300	320	340	370	390	410
9 1/4"	4"	230	270	300	330	370	400	430	470	500	530	570	600
	4 1/2"	220	250	280	320	350	380	410	440	470	500	540	570
9 3/8"	5"	210	240	270	300	330	360	380	410	440	470	500	530
	6 1/2"	190	220	250	270	300	330	360	380	410	440	470	490
10 3/8"	6 3/4"	150	180	200	220	240	260	280	310	330	350	370	390
	4 1/2"	260	300	340	380	420	450	490	530	570	610	640	680
10 1/2"	6"	250	290	320	360	390	430	470	500	540	570	610	650
	6 1/2"	240	270	300	340	370	400	440	470	510	540	570	610
10 3/4"	6 3/4"	200	225	250	280	310	340	370	390	420	450	480	510
	4 1/2"	290	330	370	410	450	490	530	580	620	660	700	740
11"	5"	270	310	350	390	430	470	510	550	590	630	670	710
	5 1/2"	250	300	320	370	410	440	480	520	560	590	630	670
11 1/8"	6 1/2"	220	250	280	320	350	380	410	440	470	500	540	570
	4 1/2"	370	420	480	530	580	640	690	740	790	850	900	950
12 1/4"	6"	360	410	460	510	560	610	660	710	770	820	870	920
	5 1/2"	340	390	440	490	540	590	640	680	730	780	830	880
12 3/8"	6 3/4"	300	350	390	430	480	520	560	610	650	690	740	780
	5"	470	540	600	670	740	800	870	940	1010	1070	1140	1210
13 3/8"	5 1/2"	450	520	580	650	710	780	840	910	970	1040	1100	1170
	6 1/2"	410	470	530	590	650	710	770	830	890	950	1010	1070
15"	5 1/2"	660	640	720	800	870	950	1020	1110	1190	1270	1350	1430
	6 3/4"	520	590	670	740	810	890	960	1040	1110	1180	1260	1330
17 1/2"	5 1/2"	790	900	1020	1130	1240	1350	1470	1580	1690	1810	1920	2030
	6 3/4"	750	860	970	1070	1180	1290	1400	1500	1610	1720	1820	1930





## LINE (3) - SIZE OF LINERS

The size of liners depends on the size of pump, the number of strokes per minute, and the required circulation rate in gallons per minute. The tables on the following sheets were prepared for various sizes of duplex power pumps, using 95 per cent efficiency at slow speeds (under 40 strokes per minute) and 90 per cent efficiency at higher speeds (40 strokes per minute or greater). The circulation rate in gallons per minute for triplex pumps will be  $1\frac{1}{2}$  times that shown for duplex pumps. If steam pumps are used, it will be necessary to measure the stroke length as it is frequently not as great as the nominal stroke length.

### EXAMPLE

On the sample work sheet it is indicated that a 16" duplex power pump is to be used and is to be operated at 65 strokes per minute. Also, it has been determined on line (2) that a circulation rate of 300 gallons per minute is desired. By referring to the 16" duplex pump table select a liner for 65 strokes per minute and a  $2\frac{1}{4}$ " diameter piston rod that will be close to but not less than the 300 gallons per minute of line (2). It is found that 320 gallons per minute can be circulated using  $5\frac{1}{4}$ " liners. This, then, is the desired liner size; and should be shown on line (3a) of the sample work sheet. Inasmuch as  $5\frac{1}{4}$ " liners will produce a circulation rate of 320 gallons per minute instead of the 300 originally planned, enter 320 in line (3b). This means that the annular velocity will be slightly greater than the original chosen figure of 120 feet per minute. From the table used to determine annular velocity, 320 gallons per minute will give 130 feet per minute and should be entered on line (3c).

LINE 3  
SIZE OF LINERS

LINE 4  
PRESSURE LOSS THRU  
SURFACE EQUIPMENT

LINE 5  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL COLLAR BORE

LINE 6 & 7  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL COLLARS

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP



Small handwritten marks and characters at the bottom left corner, including a small 'd' and other faint marks.

## 10" DUPLEX POWER PUMP

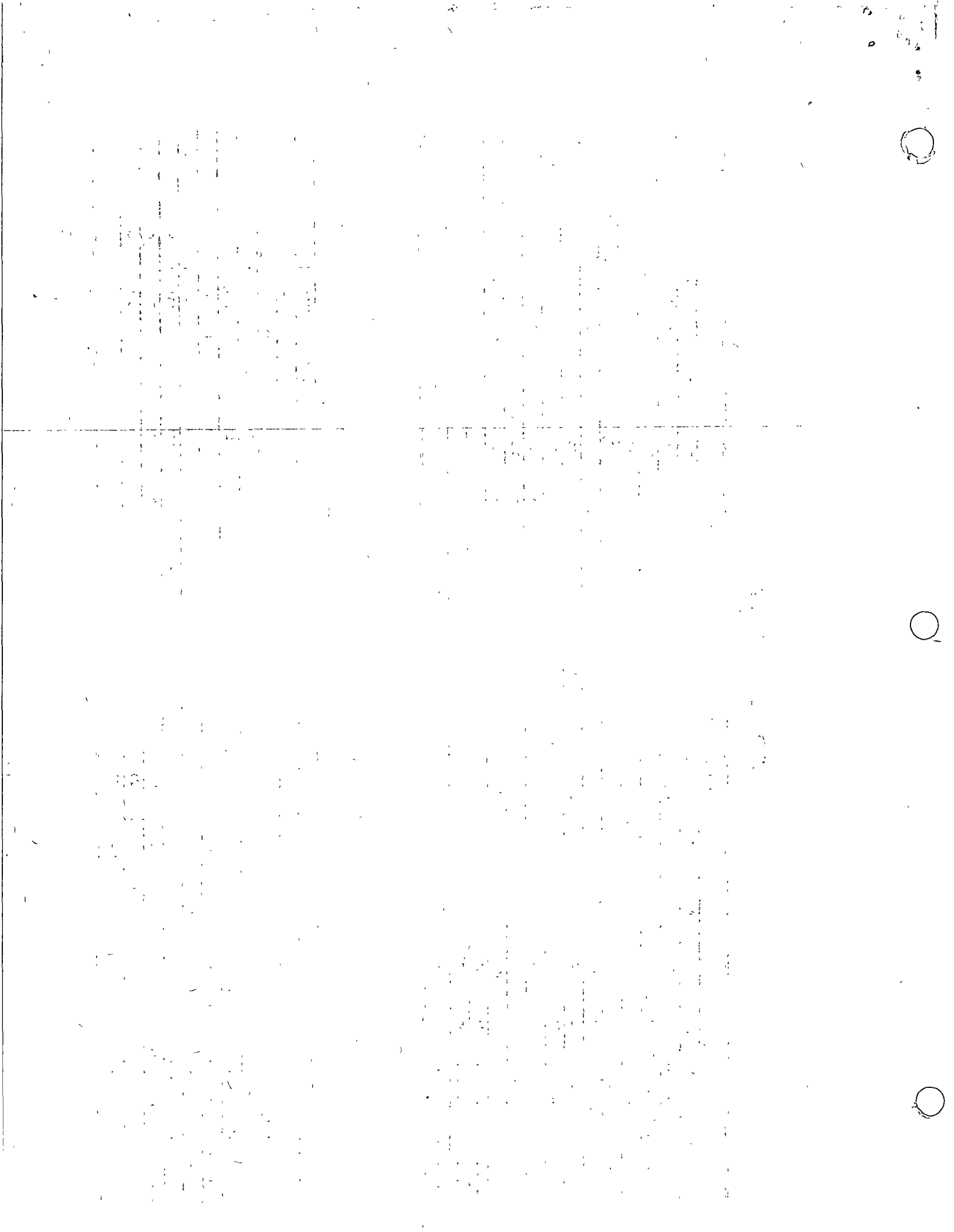
1 1/4" DIA. PISTON ROD

STROKES PER MINUTE	GALLONS PER MINUTE USING LINER SIZE SHOWN															
	3"	3 1/2"	4"	4 1/2"	5"	5 1/4"	5 1/2"	5 3/4"	6"	6 1/4"	6 1/2"	6 3/4"	7"	7 1/4"	7 1/2"	8"
25.....	30	40	50	60	80	90	90	100	110	120	130	140	150	170	180	200
30.....	30	40	60	70	90	100	110	120	140	160	160	170	190	200	210	240
35.....	40	50	70	90	110	120	130	140	160	170	180	200	220	230	250	280
40.....	40	50	70	90	120	130	140	160	170	190	200	220	230	250	270	310
45.....	40	60	80	110	130	150	160	180	190	210	230	240	260	280	300	350
50.....	50	70	90	120	150	160	180	200	210	230	250	270	290	310	340	380
55.....	50	70	100	130	160	180	200	220	230	260	280	300	320	350	370	420
60.....	60	80	110	140	180	190	210	230	260	280	300	330	350	380	400	460
65.....	60	90	120	150	190	210	230	250	280	300	330	350	380	410	440	500
70.....	70	100	130	160	200	230	250	270	300	330	350	380	410	440	470	540
75.....	70	100	140	180	220	240	270	290	320	350	380	410	440	470	510	580
80.....	80	110	150	190	230	260	290	310	340	370	400	440	470	500	540	620
85.....	80	120	150	200	250	280	300	320	360	390	430	460	500	540	570	650

## 12" DUPLEX POWER PUMP

1 3/8" DIA. PISTON ROD

STROKES PER MINUTE	GALLONS PER MINUTE USING LINER SIZE SHOWN											
	4 1/2"	4 3/4"	5"	5 1/4"	5 1/2"	5 3/4"	6"	6 1/4"	6 1/2"	6 3/4"	7"	7 1/4"
25.....	70	80	90	100	110	120	130	140	160	170	180	200
30.....	90	100	110	120	130	150	160	170	190	200	220	240
35.....	100	110	130	140	150	170	190	200	220	240	260	280
40.....	110	120	140	150	170	180	200	220	240	260	280	300
45.....	120	140	150	170	190	210	230	250	270	290	310	340
50.....	140	150	170	190	210	230	250	270	300	320	350	370
55.....	150	170	190	210	230	250	280	300	330	350	380	410
60.....	160	180	200	230	250	280	300	330	360	390	420	450
65.....	180	200	220	250	270	300	330	360	390	420	460	490
70.....	190	210	240	270	290	320	350	380	420	450	490	520



## LINE (4) – PRESSURE LOSS THROUGH SURFACE EQUIPMENT

Surface equipment considered here consists of the standpipe, the hose, the swivel washpipe and gooseneck, and the kelley. It is not practical to tabulate the pressure losses through all possible combinations of surface equipment. However, four combinations of surface equipment have been chosen which occur frequently in practice, and are tabulated on the next sheet with pressure losses shown for each combination against the various circulation rates. Unless your particular combination is radically different from those shown, it will normally be satisfactory to choose the case closest to your combination. These combinations are listed as Cases No. 1, No. 2, No. 3, and No. 4, and are made up of the following:

### Case No. 1

40 ft. of 3" I.D. Standpipe  
45 ft. of 2" I.D. Hose  
4 ft. of 2" I.D. Swivel  
40 ft. of 2¼" I.D. Kelley

### Case No. 2

40 ft. of 3½" I.D. Standpipe  
55 ft. of 2¼" I.D. Hose  
5 ft. of 2½" I.D. Swivel  
40 ft. of 3¼" I.D. Kelley

### Case No. 3

45 ft. of 4" I.D. Standpipe  
55 ft. of 3" I.D. Hose  
5 ft. of 2½" I.D. Swivel  
40 ft. of 3¼" I.D. Kelley

### Case No. 4

45 ft. of 4" I.D. Standpipe  
55 ft. of 3" I.D. Hose  
6 ft. of 3" I.D. Swivel  
40 ft. of 4" I.D. Kelley

## EXAMPLE

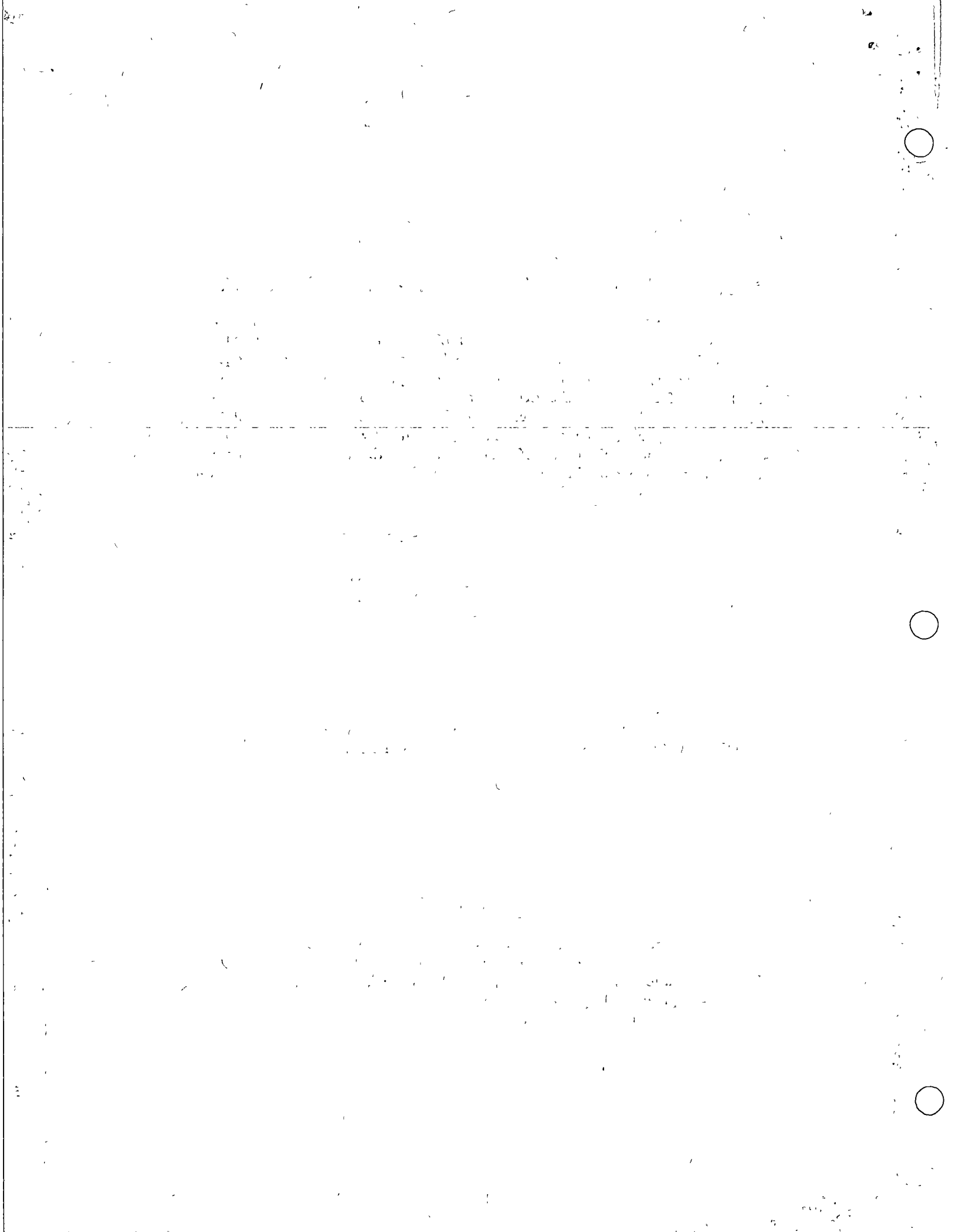
The sample work sheet has noted the surface equipment as Case No. 3. Using the table on the next sheet, and the previously determined circulation rate of 320 gallons per minute, it is found that the pressure loss through the surface equipment is 19 pounds per square inch. This figure is then shown on line (4) of the sample work sheet.

LINE 4  
PRESSURE LOSS THRU  
SURFACE EQUIPMENT

LINE 5  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL COLLAR JOINT

LINE 6 & 7  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL COLLARS

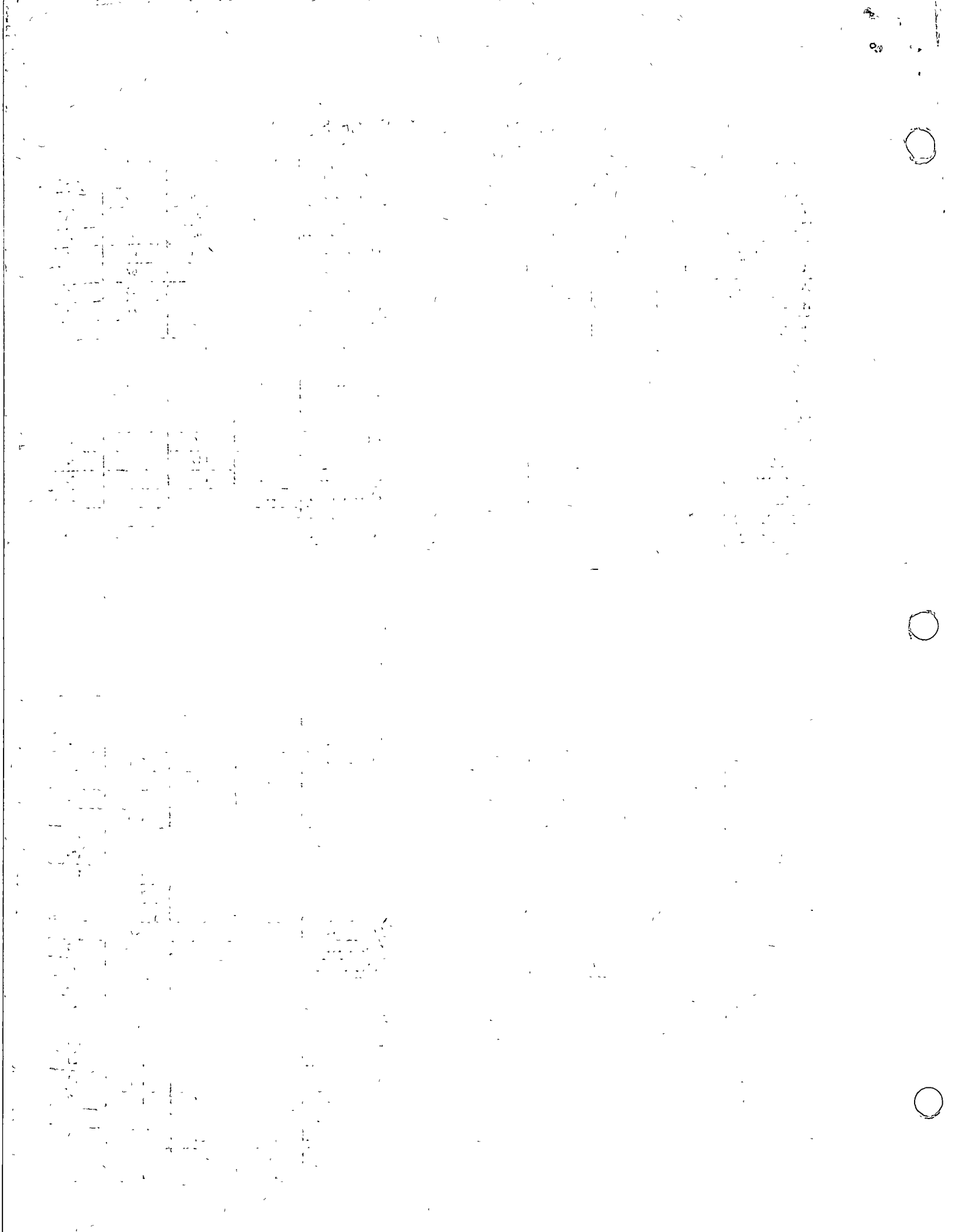
LINE 8  
PRESSURE RATING



## PRESSURE LOSS THRU SURFACE EQUIPMENT

GALLONS PER MIN.	PRESSURE LOSS FOR CASE SHOWN			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
50.....	3	1	1	...
60.....	4	1	1	...
70.....	5	1	1	...
80.....	6	1	1	...
90.....	8	2	2	...
100.....	10	3	2	...
110.....	12	4	3	...
120.....	14	5	3	...
130.....	16	6	3	1
140.....	18	7	3	2
150.....	20	8	3	2
160.....	24	9	3	2
170.....	26	10	4	2
180.....	29	11	5	3
190.....	32	12	6	3
200.....	35	13	7	4
210.....	38	14	8	4
220.....	42	15	9	5
230.....	45	16	10	5
240.....	50	17	11	6
250.....	55	18	12	7
260.....	58	18	13	7
270.....	63	20	14	8
280.....	67	22	15	9
290.....	72	24	16	10
300.....	76	25	17	11
310.....	81	28	18	11
320.....	86	30	19	12
330.....	91	32	20	13
340.....	96	34	21	14
350.....	101	37	22	15
360.....	107	39	23	15
370.....	113	41	24	16
380.....	119	43	25	17
390.....	124	45	27	18
400.....	131	47	28	19
410.....	137	49	30	20
420.....	143	51	31	21
430.....	150	54	32	22
440.....	157	57	34	23
450.....	164	60	36	24
460.....	171	62	38	26
470.....	179	65	39	27
480.....	186	68	41	28
490.....	193	71	42	29
500.....	200	74	44	31
510.....	209	76	46	32
520.....	217	79	48	35
530.....	225	81	50	35
540.....	233	84	52	36
550.....	241	87	54	38
560.....	249	90	55	39
570.....	257	93	57	41

GALLONS PER MIN.	PRESSURE LOSS FOR CASE SHOWN			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
580.....	266	98	59	42
590.....	274	99	61	44
600.....	282	103	63	45
610.....	292	106	65	48
620.....	300	109	67	48
630.....	308	112	69	50
640.....	320	115	71	51
650.....	329	119	74	53
660.....	338	122	76	55
670.....	348	125	78	56
680.....	357	129	80	58
690.....	367	133	82	60
700.....	377	137	85	61
710.....	...	140	87	63
720.....	...	144	90	65
730.....	...	148	92	66
740.....	...	152	94	68
750.....	...	156	97	69
760.....	...	160	99	70
770.....	...	164	102	72
780.....	...	168	104	74
790.....	...	172	107	78
800.....	...	177	110	73
810.....	...	181	112	80
820.....	...	185	115	82
830.....	...	189	117	84
840.....	...	193	120	86
850.....	...	198	123	88
860.....	...	202	126	90
870.....	...	207	128	92
880.....	...	211	131	94
890.....	...	216	134	96
900.....	...	221	137	93
910.....	...	225	140	100
920.....	...	230	142	102
930.....	...	234	145	104
940.....	...	239	148	106
950.....	...	244	151	103
960.....	...	249	154	110
970.....	...	253	157	112
980.....	...	258	160	114
990.....	...	263	163	116
1000.....	...	268	166	118
1010.....	...	272	169	120
1020.....	...	277	172	122
1030.....	...	282	175	124
1040.....	...	287	178	125
1050.....	...	292	181	129
1060.....	...	297	185	130
1070.....	...	302	188	132
1080.....	...	308	191	134
1090.....	...	313	194	136
1100.....	...	318	197	138





## LINE (5) – PRESSURE LOSS THROUGH DRILL COLLAR BORE

The pressure loss through the bore of the drill collars depends on the circulation rate, the drill collar bore, and length of drill collars being used. The table on the next sheet was prepared showing the pressure loss for the most popular drill collar bores. It will be noticed that the pressure loss shown in this table is for each 100 feet of drill collar bore. It is necessary to multiply the pressure loss shown in the tables by the total length of collars being used, divided by 100, to obtain total pressure loss through bore of drill collars.

### EXAMPLE

The sample work sheet shows that fifteen 30 foot collars, or a total length of 450 feet, with a bore of  $2\frac{3}{4}$ " , are being used. The circulation rate is 320 gallons per minute. By referring to the table on the next sheet it will be noted that a pressure loss of 20 psi per 100 feet of collars is found. To find the total pressure loss through 450 feet of collars, we multiply the figure of 20 from the table by 450, divided by 100, or:

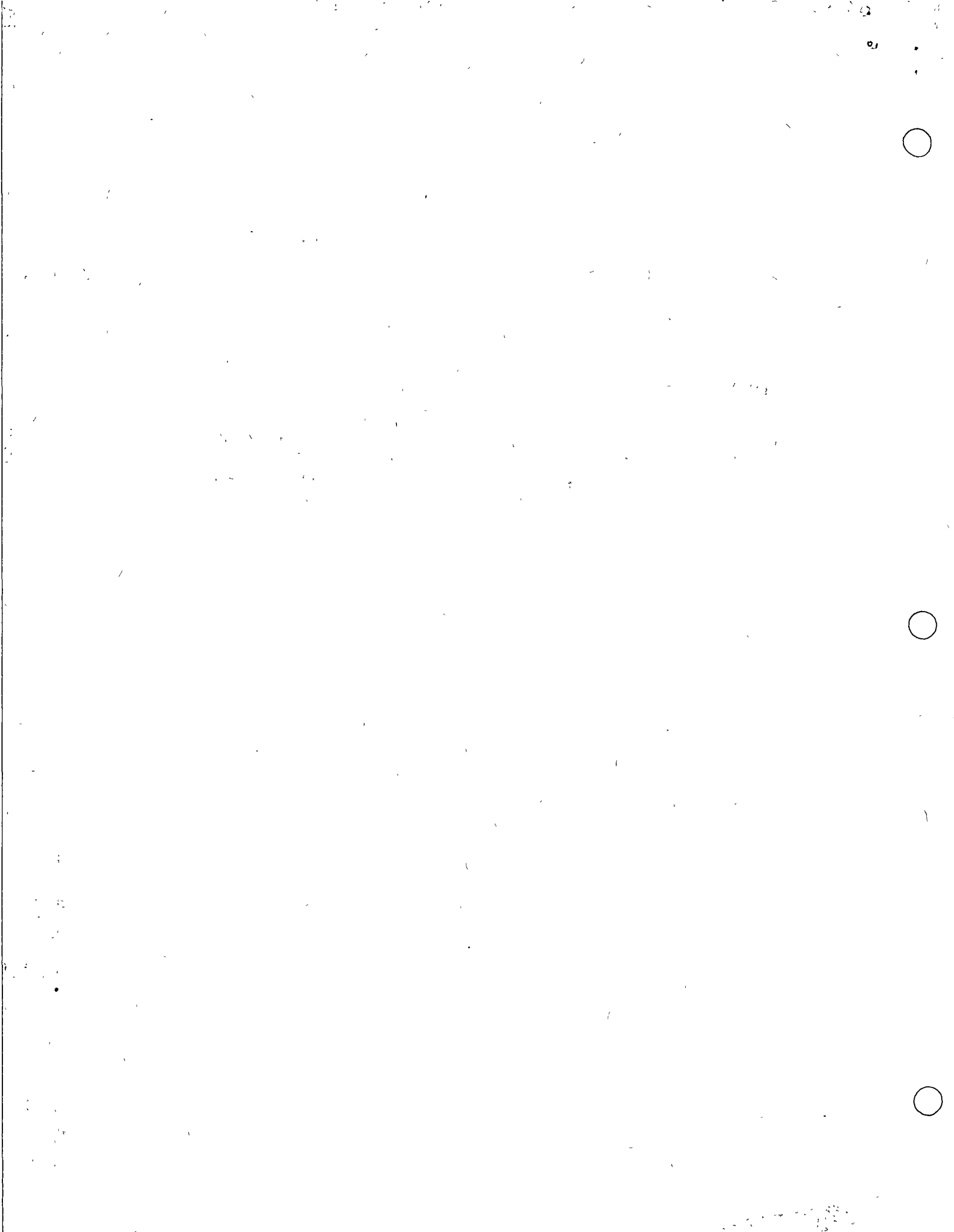
$$20 \times \frac{450}{100} = 20 \times 4.5 = 90 \text{ psi}$$

This is then shown on line (5) of sample work sheet.

LINE 5  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL COLLAR BORE

LINES 6 & 7  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL COLLARS

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP



**PRESSURE LOSS THRU DRILL COLLAR BORE—PSI PER 100 FT. OF COLLARS**

GALLONS PER MIN.	DRILL COLLAR BORE						
	2"	2 1/4"	2 7/8"	3 1/2"	3 3/4"	2 1/2"	3"
50.....	3	2	1	1	1	1	...
60.....	4	2	2	1	1	1	1
70.....	6	3	2	2	1	1	1
80.....	7	4	3	2	2	1	1
90.....	9	5	3	3	2	2	1
100.....	11	6	4	4	2	2	2
110.....	13	7	5	4	3	2	2
120.....	15	9	6	6	3	3	2
130.....	18	10	7	6	4	3	2
140.....	21	12	8	7	4	4	3
150.....	23	13	9	8	5	4	3
160.....	25	15	10	9	6	5	4
170.....	30	17	11	10	6	6	4
180.....	33	19	12	11	7	6	5
190.....	36	21	13	12	8	6	5
200.....	40	23	15	14	8	7	6
210.....	44	25	17	15	9	8	6
220.....	48	27	18	16	10	8	7
230.....	52	29	20	18	11	9	7
240.....	56	32	21	19	12	10	8
250.....	61	34	23	20	13	10	8
260.....	65	37	25	22	14	11	9
270.....	70	40	27	24	15	12	10
280.....	75	42	29	26	16	13	10
290.....	80	45	31	27	17	14	11
300.....	85	48	33	29	18	15	12
310.....	90	51	35	31	19	16	13
320.....	95	54	37	32	20	16	13
330.....	102	57	39	34	22	17	14
340.....	107	61	41	36	23	18	15
350.....	113	64	43	38	24	19	16
360.....	119	67	46	40	25	20	17
370.....	126	71	48	42	27	22	18
380.....	132	75	50	45	28	23	18
390.....	139	78	53	47	29	24	19
400.....	145	82	55	49	31	25	20
410.....	152	86	58	51	32	26	21
420.....	159	90	61	54	34	27	22
430.....	166	94	64	56	35	28	23
440.....	173	98	68	59	37	30	24
450.....	181	102	69	61	38	31	25
460.....	188	106	72	64	40	32	26
470.....	196	110	75	66	42	34	27
480.....	204	115	78	69	43	35	28
490.....	212	120	81	72	45	36	30
500.....	220	124	84	74	47	38	31
510.....	228	129	87	77	49	39	32
520.....	237	134	90	80	50	41	33
530.....	245	138	94	83	52	42	34

GALLONS PER MIN.	DRILL COLLAR BORE						
	2"	2 1/4"	2 7/8"	3 1/2"	3 3/4"	2 1/2"	3"
540.....	254	143	97	88	54	44	33
550.....	253	148	100	89	58	45	37
560.....	272	153	104	92	63	47	38
570.....	281	158	107	95	68	48	39
580.....	290	164	111	98	72	50	40
590.....	299	169	114	101	76	51	41
600.....	309	174	118	104	80	53	43
610.....	318	180	122	108	84	55	44
620.....	328	185	126	111	88	56	46
630.....	338	191	129	114	92	58	47
640.....	348	196	133	118	96	60	49
650.....	358	202	137	121	100	61	50
660.....	369	208	141	125	104	63	51
670.....	379	214	145	128	108	65	53
680.....	390	220	149	132	112	67	54
690.....	400	226	153	135	116	69	55
700.....	411	232	157	139	120	71	57
710.....	422	238	161	143	124	72	58
720.....	433	245	166	147	128	74	59
730.....	445	251	170	150	132	75	52
740.....	458	257	174	154	136	77	64
750.....	469	264	179	158	140	80	61
760.....	479	270	183	162	144	82	67
770.....	491	277	188	166	148	84	68
780.....	503	284	192	170	152	86	73
790.....	515	291	197	174	156	88	77
800.....	527	298	202	178	160	90	78
810.....	539	305	206	182	164	92	79
820.....	552	312	211	187	168	94	81
830.....	564	319	216	191	172	97	83
840.....	577	326	221	195	176	99	85
850.....	590	333	226	200	180	101	87
860.....	603	340	231	204	184	103	89
870.....	616	348	236	208	188	105	91
880.....	629	355	241	213	192	107	93
890.....	643	363	246	217	196	110	95
900.....	656	370	251	222	200	113	97
910.....	670	378	256	226	204	115	99
920.....	684	386	261	231	208	117	101
930.....	698	394	267	235	212	120	103
940.....	712	402	272	241	216	122	105
950.....	726	410	278	245	220	124	107
960.....	740	418	283	250	224	127	109
970.....	754	426	288	255	228	129	111
980.....	769	434	294	260	232	132	113
990.....	784	442	300	265	236	134	115
1000.....	792	451	305	270	240	137	117
1010.....	813	459	311	275	244	139	119
1020.....	828	467	317	280	248	142	121



## LINE (6) - PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O. D. AND WALL OF HOLE

The pressure loss around the drill collars depends on the size of hole being drilled, the O.D. and length of drill collars, and the circulation rate in gallons per minute. The tables on the following sheets show the pressure drop around the drill collars for various hole sizes and drill collar O.D.'s. The pressure drop shown in the table is for each 100 feet of drill collar length. It will be necessary to multiply the answer in the table by the total length of collars, divided by 100, to obtain total pressure loss around the collars.

### EXAMPLE

The sample work sheet calls for the use of 450 feet of 6¼" O.D. collars in a 9" hole, and using a circulation rate of 320 gallons per minute. By referring to the tables, the pressure loss is found to be 2 psi per 100 feet of collars. As there are 450 feet of collars, this figure of 2 from the table is multiplied by 450, divided by 100, or:

$$2 \times \frac{450}{100} = 2 \times 4.5 = 9 \text{ psi}$$

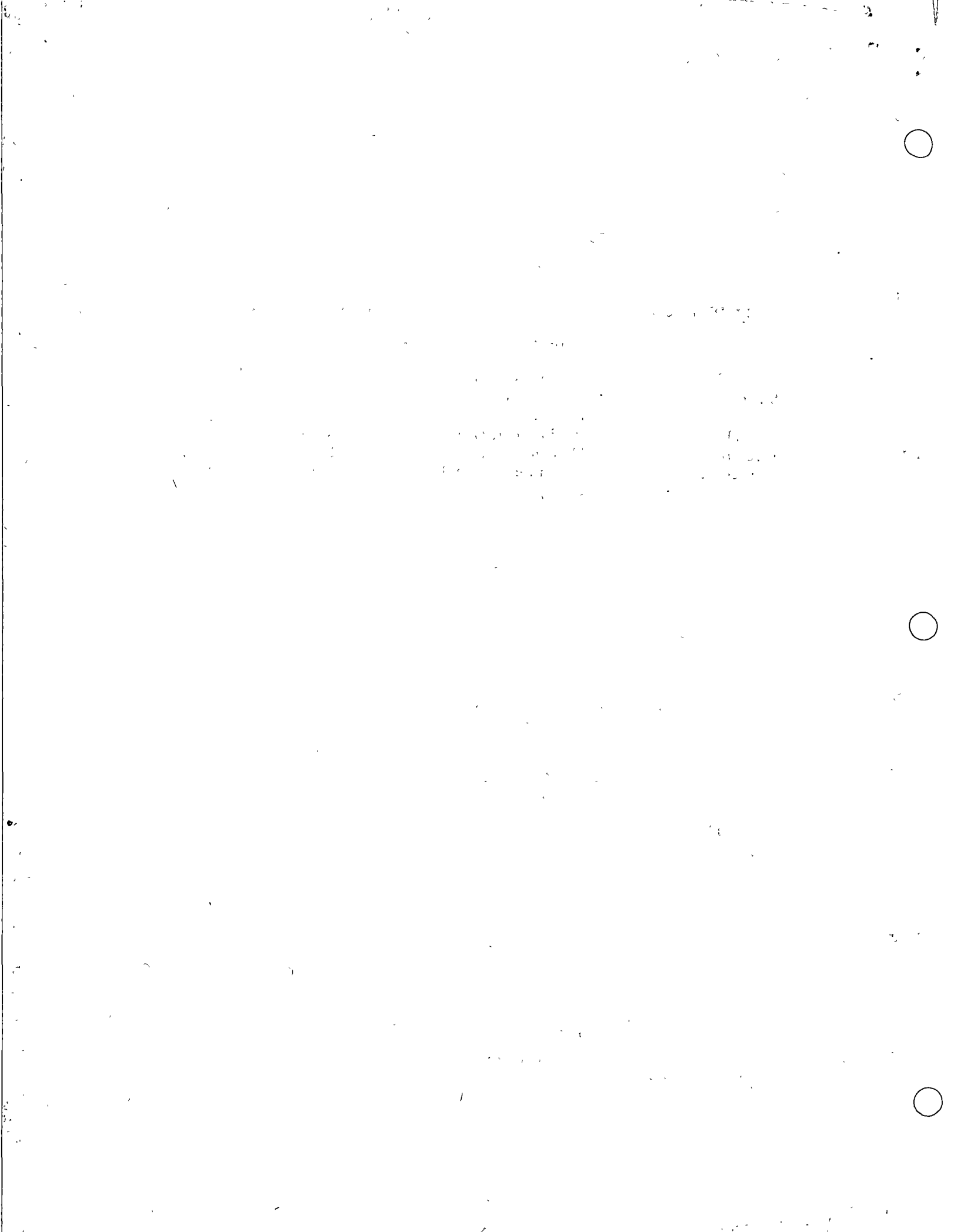
This is the total pressure loss around all collars, and is placed on line (6) of the sample work sheet.

## LINE (7) - TOTAL PRESSURE LOSS

Line (7) is the total of lines (4) through (6) and represents the total pressure loss for the surface equipment and drill collars.

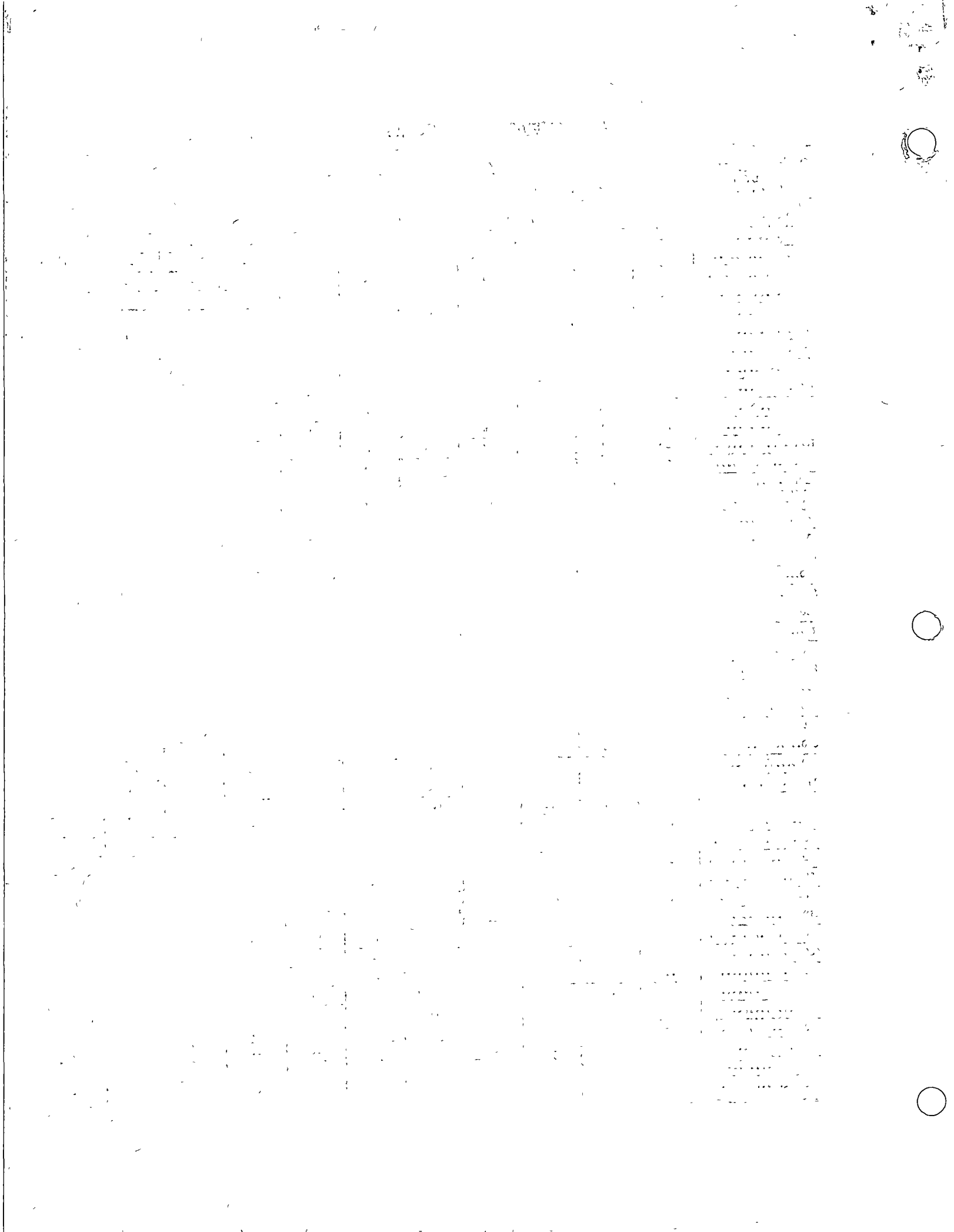
LINES 6 & 7  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL COLLARS

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP



## PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

HOLE SIZE .....	4 3/4"		5 1/2"			5 7/8"			6"		
	3 3/4"	4 1/8"	3 3/4"	4 1/8"	4 3/4"	3 3/4"	4 1/8"	4 3/4"	3 3/4"	4 1/8"	4 3/4"
O.D. OF DRILL COLLAR .....	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH										
GALLONS PER MINUTE.....	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH										
50.....	3	11	..	..	..	..	..	..	..	..	..
60.....	4	16	1	1	4	..	1	2	..	..	1
70.....	6	22	1	1	6	..	1	3	..	1	2
80.....	8	29	1	2	8	1	1	3	1	1	2
90.....	10	38	1	2	10	1	1	4	1	1	3
100.....	12	45	1	3	12	1	2	5	1	1	4
110.....	14	54	2	3	14	1	2	6	1	2	5
120.....	17	65	2	4	17	1	2	8	1	2	5
130.....	20	76	3	5	20	2	3	9	1	2	6
140.....	23	88	3	5	23	2	3	10	2	2	7
150.....	27	101	3	6	27	2	4	12	2	3	9
160.....	30	115	4	7	31	2	4	14	2	3	10
170.....	34	130	4	8	34	3	5	15	2	4	11
180.....	39	145	5	9	39	3	5	17	3	4	12
190.....	43	162	5	10	43	3	6	19	3	5	14
200.....	48	179	6	11	48	4	6	21	3	5	15
210.....	52	198	7	12	52	4	7	24	3	6	17
220.....	57	217	7	13	57	5	8	26	4	6	18
230.....	63	237	8	14	63	5	8	28	4	7	20
240.....	..	..	9	15	69	6	9	31	5	7	22
250.....	..	..	9	17	75	6	10	33	5	8	24
260.....	..	..	10	18	81	6	11	36	5	9	26
270.....	..	..	11	20	87	7	12	39	6	9	28
280.....	..	..	12	21	93	8	13	42	6	10	30
290.....	..	..	12	23	100	8	13	45	7	11	32
300.....	..	..	13	24	107	9	14	48	7	11	34
310.....	..	..	14	26	115	9	15	51	8	12	37
320.....	..	..	15	27	122	10	16	55	8	13	39
330.....	..	..	16	29	130	10	17	58	9	14	41
340.....	..	..	17	31	138	11	18	62	9	15	44
350.....	..	..	18	33	146	12	20	65	10	16	47
360.....	..	..	19	35	154	12	21	69	10	16	49
370.....	..	..	20	37	163	13	22	73	11	17	52
380.....	..	..	21	39	172	14	23	77	11	18	55
390.....	..	..	..	..	..	15	24	81	12	19	58
400.....	..	..	..	..	..	15	26	85	13	20	61
410.....	..	..	..	..	..	16	27	90	13	21	64
420.....	..	..	..	..	..	17	28	94	14	22	67
430.....	..	..	..	..	..	18	30	99	15	23	70
440.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
450.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
460.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
470.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
480.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
490.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
500.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..

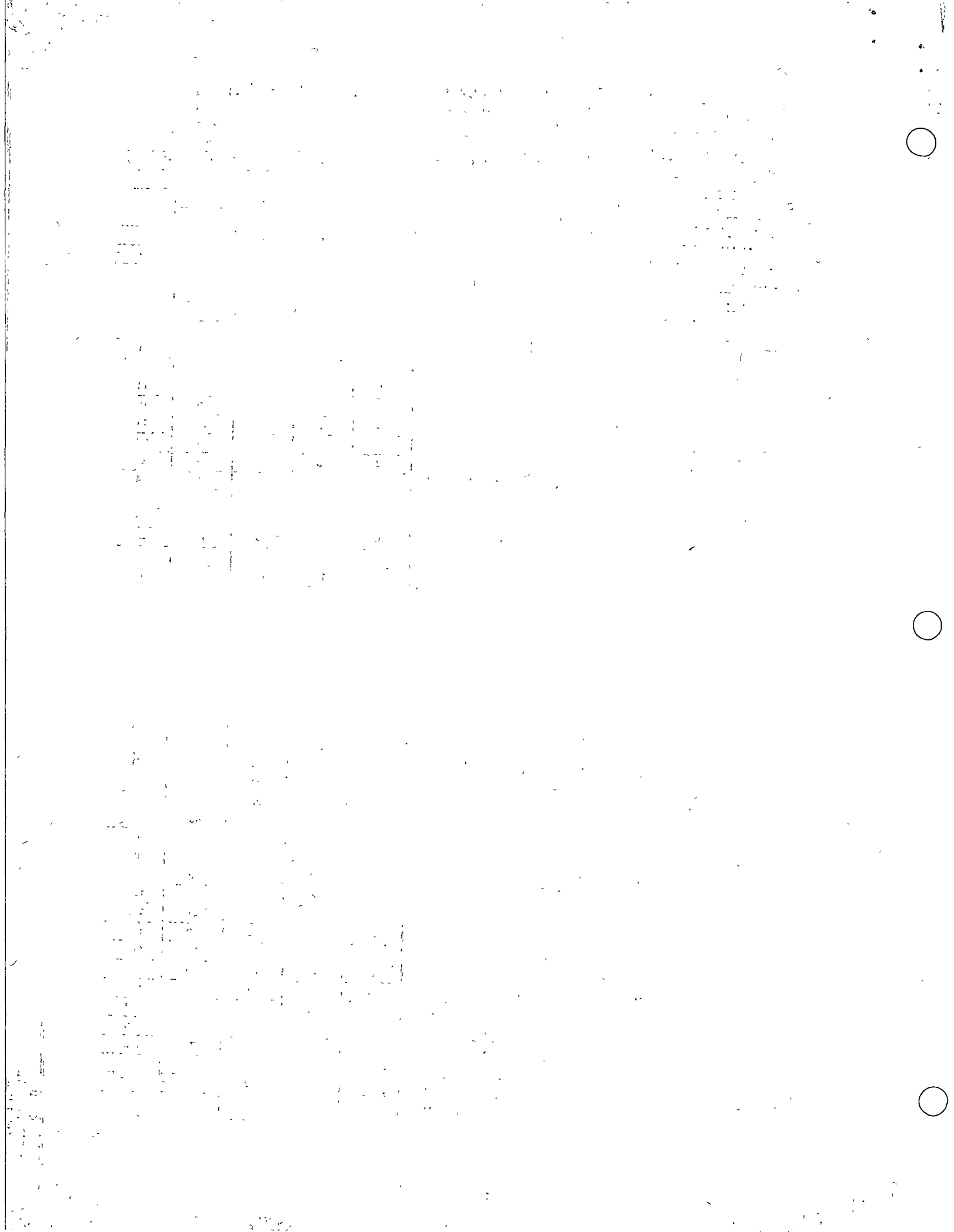




# PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

DRILL COLLAR O.D. INCHES	8 1/4"			6 1/4"			6 3/4"		
	3 3/4"	4 1/4"	4 3/4"	3 3/4"	4 1/4"	4 3/4"	5 1/4"	5 1/2"	5 3/4"
PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH									
1	1	1	2	1	1	2	2	3	4
2	2	3	4	2	2	3	3	4	5
3	3	4	5	3	3	4	4	5	6
4	4	5	6	4	4	5	5	6	7
5	5	6	7	5	5	6	6	7	8
6	6	7	8	6	6	7	7	8	9
7	7	8	9	7	7	8	8	9	10
8	8	9	10	8	8	9	9	10	11
9	9	10	11	9	9	10	10	11	12
10	10	11	12	10	10	11	11	12	13
11	11	12	13	11	11	12	12	13	14
12	12	13	14	12	12	13	13	14	15
13	13	14	15	13	13	14	14	15	16
14	14	15	16	14	14	15	15	16	17
15	15	16	17	15	15	16	16	17	18
16	16	17	18	16	16	17	17	18	19
17	17	18	19	17	17	18	18	19	20
18	18	19	20	18	18	19	19	20	21
19	19	20	21	19	19	20	20	21	22
20	20	21	22	20	20	21	21	22	23
21	21	22	23	21	21	22	22	23	24
22	22	23	24	22	22	23	23	24	25
23	23	24	25	23	23	24	24	25	26
24	24	25	26	24	24	25	25	26	27
25	25	26	27	25	25	26	26	27	28
26	26	27	28	26	26	27	27	28	29
27	27	28	29	27	27	28	28	29	30
28	28	29	30	28	28	29	29	30	31
29	29	30	31	29	29	30	30	31	32
30	30	31	32	30	30	31	31	32	33
31	31	32	33	31	31	32	32	33	34
32	32	33	34	32	32	33	33	34	35
33	33	34	35	33	33	34	34	35	36
34	34	35	36	34	34	35	35	36	37
35	35	36	37	35	35	36	36	37	38
36	36	37	38	36	36	37	37	38	39
37	37	38	39	37	37	38	38	39	40
38	38	39	40	38	38	39	39	40	41
39	39	40	41	39	39	40	40	41	42
40	40	41	42	40	40	41	41	42	43
41	41	42	43	41	41	42	42	43	44
42	42	43	44	42	42	43	43	44	45
43	43	44	45	43	43	44	44	45	46
44	44	45	46	44	44	45	45	46	47
45	45	46	47	45	45	46	46	47	48
46	46	47	48	46	46	47	47	48	49
47	47	48	49	47	47	48	48	49	50
48	48	49	50	48	48	49	49	50	51
49	49	50	51	49	49	50	50	51	52
50	50	51	52	50	50	51	51	52	53
51	51	52	53	51	51	52	52	53	54
52	52	53	54	52	52	53	53	54	55
53	53	54	55	53	53	54	54	55	56
54	54	55	56	54	54	55	55	56	57
55	55	56	57	55	55	56	56	57	58
56	56	57	58	56	56	57	57	58	59
57	57	58	59	57	57	58	58	59	60
58	58	59	60	58	58	59	59	60	61
59	59	60	61	59	59	60	60	61	62
60	60	61	62	60	60	61	61	62	63
61	61	62	63	61	61	62	62	63	64
62	62	63	64	62	62	63	63	64	65
63	63	64	65	63	63	64	64	65	66
64	64	65	66	64	64	65	65	66	67
65	65	66	67	65	65	66	66	67	68
66	66	67	68	66	66	67	67	68	69
67	67	68	69	67	67	68	68	69	70
68	68	69	70	68	68	69	69	70	71
69	69	70	71	69	69	70	70	71	72
70	70	71	72	70	70	71	71	72	73
71	71	72	73	71	71	72	72	73	74
72	72	73	74	72	72	73	73	74	75
73	73	74	75	73	73	74	74	75	76
74	74	75	76	74	74	75	75	76	77
75	75	76	77	75	75	76	76	77	78
76	76	77	78	76	76	77	77	78	79
77	77	78	79	77	77	78	78	79	80
78	78	79	80	78	78	79	79	80	81
79	79	80	81	79	79	80	80	81	82
80	80	81	82	80	80	81	81	82	83
81	81	82	83	81	81	82	82	83	84
82	82	83	84	82	82	83	83	84	85
83	83	84	85	83	83	84	84	85	86
84	84	85	86	84	84	85	85	86	87
85	85	86	87	85	85	86	86	87	88
86	86	87	88	86	86	87	87	88	89
87	87	88	89	87	87	88	88	89	90
88	88	89	90	88	88	89	89	90	91
89	89	90	91	89	89	90	90	91	92
90	90	91	92	90	90	91	91	92	93
91	91	92	93	91	91	92	92	93	94
92	92	93	94	92	92	93	93	94	95
93	93	94	95	93	93	94	94	95	96
94	94	95	96	94	94	95	95	96	97
95	95	96	97	95	95	96	96	97	98
96	96	97	98	96	96	97	97	98	99
97	97	98	99	97	97	98	98	99	100

LINE B  
PRESSURE RATING  
OF DRILL



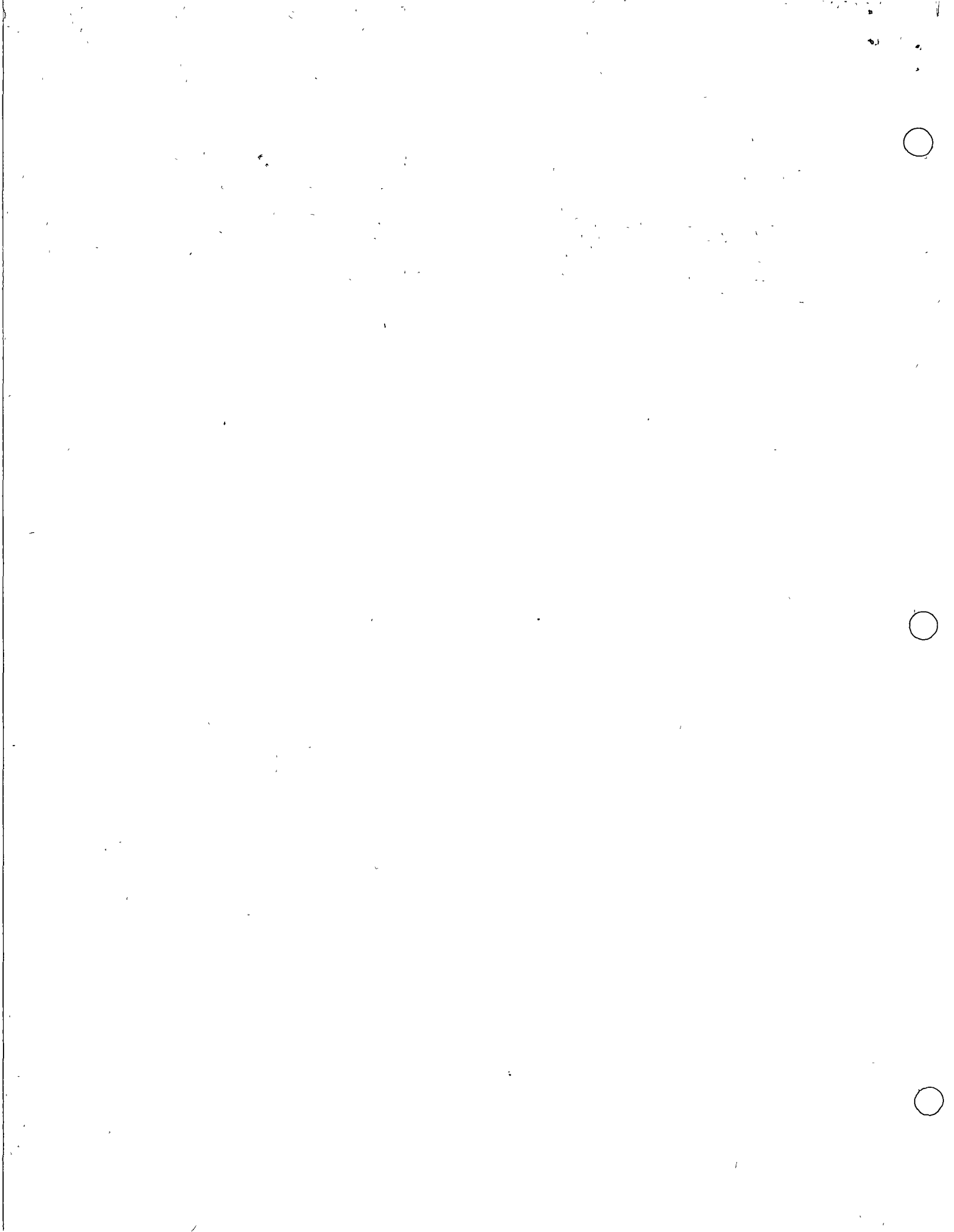
## PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

HOLE SIZE.....	7 7/8"						8 1/2"			
	5 1/4"-5 1/2"	5 3/4"-6"	6 1/4"	6 1/2"	6 3/4"	7"	5 3/4"-6"	6 1/4"-6 1/2"	6 3/4"	7"
O.D. OF DRILL COLLAR.....	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH									
GALLONS PER MINUTE.....										
50.....	..	..	..	..	..	1	..	..	..	..
60.....	..	..	..	..	..	2	..	..	..	..
70.....	..	..	..	..	..	3	..	..	..	..
80.....	..	..	..	..	..	4	..	..	..	..
90.....	..	..	..	..	..	5	..	..	..	..
100.....	..	..	..	..	..	6	..	..	..	..
110.....	..	..	..	..	..	7	..	..	..	..
120.....	1	1	1	2	4	8	..	..	..	..
130.....	1	1	2	3	5	10	..	..	..	..
140.....	1	1	2	3	6	11	1	1	2	3
150.....	1	1	2	4	6	13	1	1	2	3
160.....	1	2	3	4	7	15	1	1	2	4
170.....	1	2	3	5	8	17	1	2	3	4
180.....	1	2	3	5	9	19	1	2	3	5
190.....	1	2	4	6	10	21	1	2	3	5
200.....	1	2	4	6	11	23	1	2	4	5
210.....	1	3	4	7	12	26	1	2	4	5
220.....	2	3	5	8	14	28	1	2	4	7
230.....	2	3	5	8	15	31	1	3	5	7
240.....	2	3	6	9	16	33	2	3	5	8
250.....	2	4	6	10	18	36	2	3	6	9
260.....	2	4	7	11	19	39	2	3	6	9
270.....	2	4	7	12	21	42	2	4	6	10
280.....	3	5	8	13	22	45	2	4	7	11
290.....	3	5	8	13	24	49	2	4	7	12
300.....	3	5	9	14	25	52	2	5	8	13
310.....	3	6	10	15	27	56	3	5	8	13
320.....	3	6	10	16	29	59	3	5	9	14
330.....	3	6	11	17	31	63	3	6	10	15
340.....	4	7	12	19	33	67	3	6	10	16
350.....	4	7	12	20	35	71	3	6	11	17
360.....	4	8	13	21	37	75	4	7	11	18
370.....	4	8	14	22	39	79	4	7	12	19
380.....	5	8	15	23	41	84	4	7	13	20
390.....	5	9	15	24	43	88	4	8	13	21
400.....	5	9	16	26	45	93	4	8	14	22
410.....	5	10	17	27	47	97	5	9	15	24
420.....	6	10	18	28	50	102	5	9	15	25
430.....	6	11	19	30	52	107	5	9	16	25
440.....	6	11	19	31	55	112	5	10	17	27
450.....	7	12	20	32	57	117	6	10	18	28
460.....	7	12	21	34	60	121	6	11	19	30
470.....	7	13	22	35	62	128	6	11	19	31
480.....	7	13	23	37	65	134	6	12	20	32
490.....	8	14	24	38	68	139	7	12	21	34
500.....	8	15	25	40	71	145	7	13	22	35



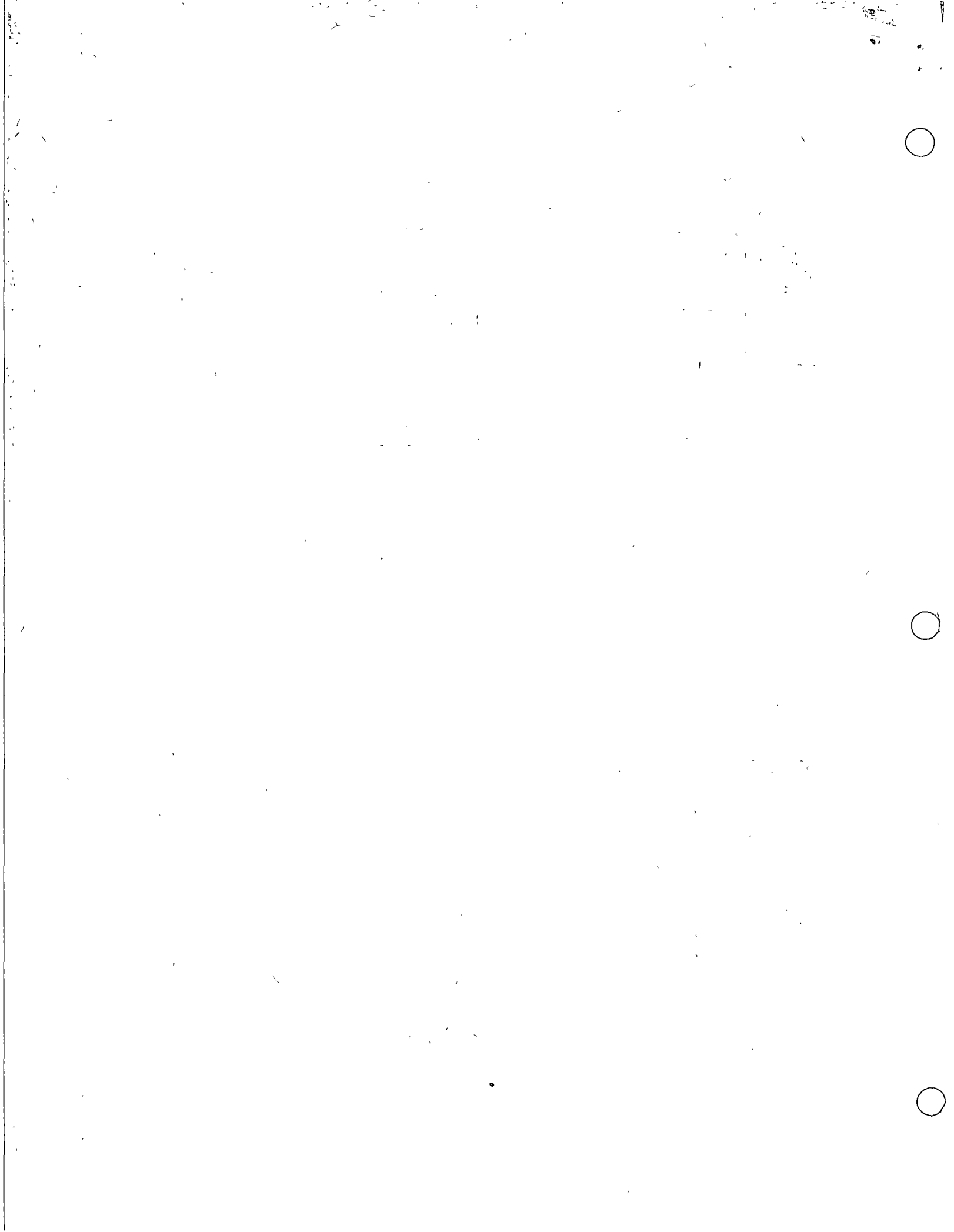
# PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

DRILL COLLAR.....	7 7/8"						8 7/8"			
	5 1/4"-6 1/2"	5 7/8"-6"	6 1/4"	6 1/2"	6 3/4"	7"	6 3/4"-6"	6 1/4"-6 1/2"	6 3/4"	7"
PER MINUTE.....	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH									
9	9	16	26	42	73	151	7	13	23	38
9	9	17	27	43	76	157	7	14	24	38
10	10	17	28	45	79	163	8	14	25	39
10	10	18	29	47	82	169	8	15	26	41
11	11	19	30	48	85	175	8	15	27	42
11	11	19	31	50	89	182	8	17	27	44
11	11	20	32	52	92	188	9	17	28	45
12	12	21	34	54	95	195	9	18	29	47
12	12	22	35	56	99	202	9	18	30	48
13	13	22	36	58	102	209	10	19	31	50
13	13	23	37	60	105	216	10	20	32	52
13	13	24	38	62	108	223	10	20	33	53
14	14	25	40	64	112	230	11	21	35	55
14	14	25	41	66	116	238	11	22	36	57
15	15	26	42	68	119	245	11	22	37	59
15	15	27	44	70	123	253	12	23	38	61
16	16	28	45	72	127	260	12	24	39	62
16	16	29	46	74	131	268	12	25	40	64
17	17	30	48	76	134	276	13	25	41	66
17	17	30	49	78	138	284	13	26	43	68
18	18	31	50	81	142	292	14	27	44	70
18	18	32	52	83	146	301	14	27	46	72
19	19	33	53	85	150	309	14	28	48	74
19	19	34	55	88	154	318	15	29	48	76
20	20	35	56	90	159	326	15	30	49	78
20	20	36	58	92	163	335	16	31	50	80
21	21	37	59	95	167	344	16	31	52	82
21	21	38	61	97	172	353	16	32	53	83
22	22	39	62	100	176	362	17	33	54	87
22	22	40	64	102	180	371	17	34	56	87
23	23	41	66	105	185	381	18	35	57	91
..	..	..	..	..	..	..	18	36	58	93
..	..	..	..	..	..	..	19	37	60	96
..	..	..	..	..	..	..	19	37	61	98
..	..	..	..	..	..	..	20	38	63	100
..	..	..	..	..	..	..	20	39	64	103
..	..	..	..	..	..	..	20	40	66	105
..	..	..	..	..	..	..	21	41	67	108
..	..	..	..	..	..	..	21	42	69	110
..	..	..	..	..	..	..	22	43	70	113
..	..	..	..	..	..	..	22	44	72	115
..	..	..	..	..	..	..	23	45	74	118
..	..	..	..	..	..	..	23	46	75	120
..	..	..	..	..	..	..	24	47	77	123



## PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

HOLE SIZE O.D. OF DRILL COLLAR	8½"				8¾"				8"			7"	PSI Loss
	5¾" to 6"	6¼" to 6½"	6¾"	7"	5¾" to 6"	6¼" to 6½"	6¾"	7"	6¼" to 6½"	6¾" to 7"	8"	6¼" to 6½"	
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH												
200.....	1	2	3	4	..	..	..	..	..	..	29	..	..
210.....	1	2	3	5	..	..	..	..	..	..	32	..	..
220.....	1	2	3	5	..	..	..	..	..	..	35	..	..
230.....	1	2	4	6	..	..	..	..	..	..	38	..	..
240.....	1	2	4	6	1	2	3	5	2	3	42	1	..
250.....	1	2	4	7	1	2	3	5	2	4	45	7	1
260.....	2	2	5	7	1	2	4	6	2	4	49	1	..
270.....	2	2	5	8	1	2	4	6	2	4	53	1	1
280.....	2	2	5	8	2	3	4	6	2	4	57	2	1
290.....	2	3	6	9	2	3	5	7	2	5	61	2	1
300.....	2	3	6	10	2	3	5	7	3	5	65	2	1
310.....	2	3	7	10	2	3	5	8	3	5	70	2	1
320.....	2	3	7	11	2	4	6	8	3	6	74	2	1
330.....	3	3	8	12	2	4	6	9	3	6	79	2	1
340.....	3	4	8	12	2	4	6	9	3	6	84	2	1
350.....	3	4	8	13	2	4	7	10	3	7	89	2	1
360.....	3	4	9	14	3	5	7	11	4	7	94	3	1
370.....	3	4	9	15	3	5	8	11	4	7	99	3	1
380.....	3	5	10	15	3	5	8	12	4	8	105	3	1
390.....	4	5	10	16	3	5	8	12	4	8	110	3	1
400.....	4	5	11	17	3	6	9	13	5	9	116	3	1
410.....	4	5	12	18	3	6	9	14	5	9	122	3	1
420.....	4	5	12	19	4	6	10	14	5	10	128	4	1
430.....	5	6	13	20	4	6	10	15	5	10	134	4	1
440.....	5	6	13	21	4	7	11	16	6	11	141	4	1
450.....	5	6	14	21	4	7	11	17	6	11	147	4	1
460.....	5	6	15	22	4	7	12	17	6	12	153	4	1
470.....	5	7	15	23	5	8	12	18	6	12	160	5	1
480.....	6	7	16	24	5	8	13	19	7	13	167	5	1
490.....	6	7	17	25	5	8	13	20	7	13	174	5	1
500.....	6	8	17	27	5	9	14	21	7	14	182	5	1
510.....	6	8	18	28	5	9	14	21	7	14	189	5	1
520.....	7	8	19	29	5	10	15	22	8	15	196	6	1
530.....	7	9	19	30	6	10	16	23	8	15	204	6	1
540.....	7	9	20	31	6	10	16	24	8	16	212	6	1
550.....	7	9	21	32	6	11	17	25	9	17	220	6	1
560.....	7	10	21	33	6	11	17	26	9	17	228	6	1
570.....	7	11	22	34	6	11	18	27	10	18	236	7	1
580.....	8	11	23	36	7	12	19	28	10	19	244	7	1
590.....	8	12	24	37	7	12	19	29	10	20	253	7	1
600.....	8	12	24	38	7	12	20	30	11	20	261	7	1

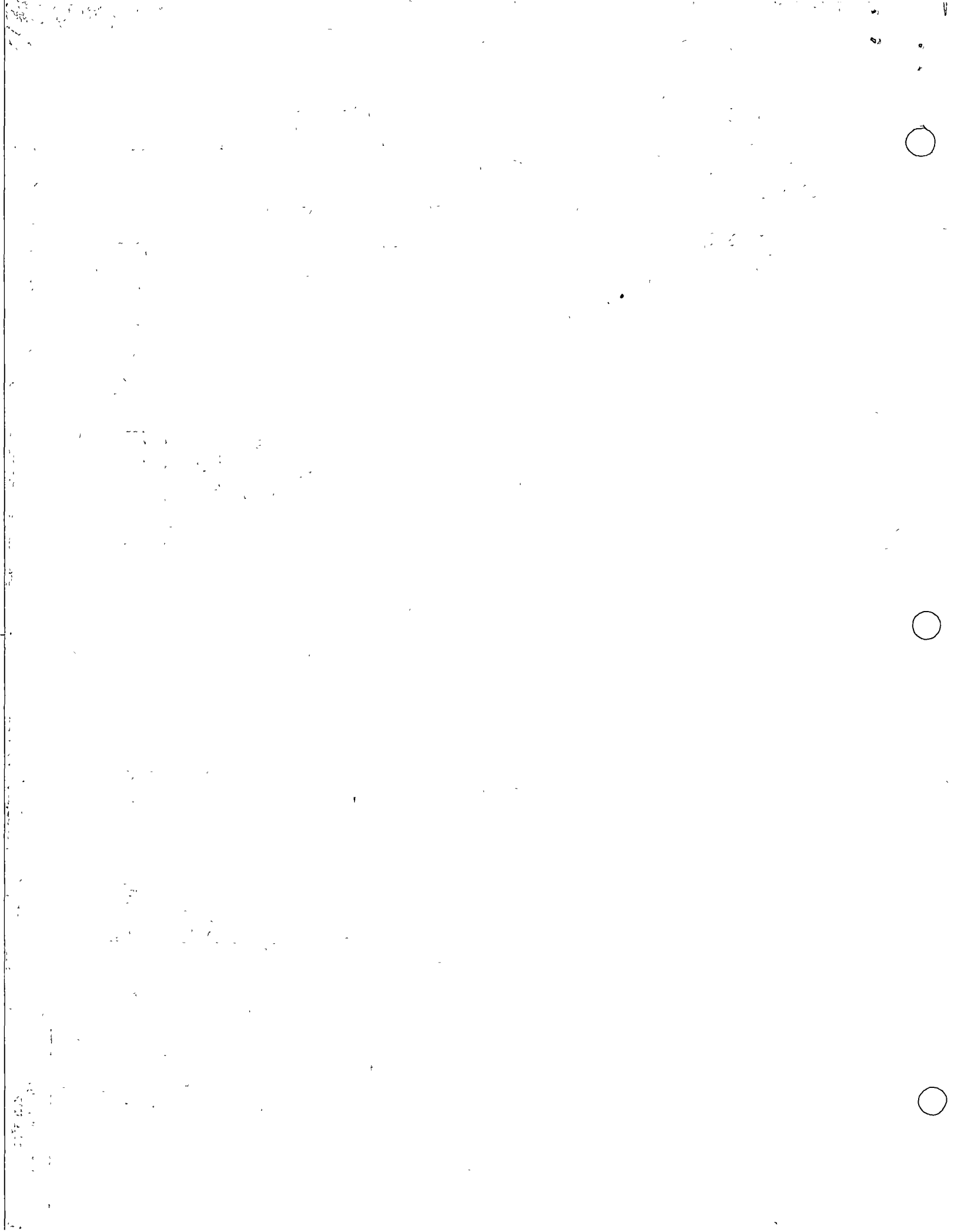




# PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

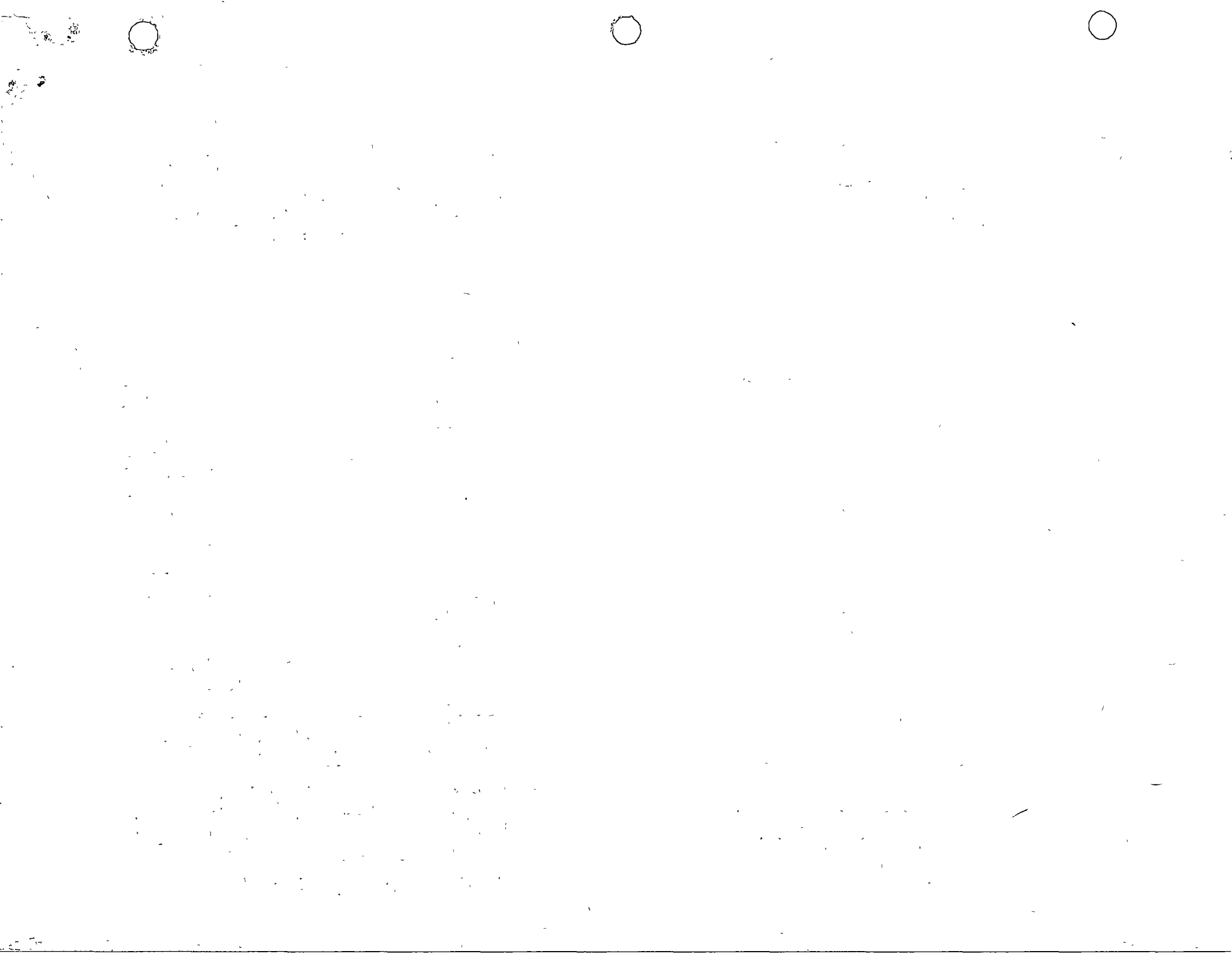
LINE	8½"			8¾"				8¾"			9"	
	5¾" to 6"	6¼" to 6½"	6¾"	7"	5¾" to 6"	6¼" to 6½"	6¾"	7"	6¼" to 6½"	6¾" to 7"	8"	6¼" to 6½"
PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH												
9	13	25	39	8	12	20	31	12	20	270	8	13
9	13	26	41	8	13	21	32	12	20	279	8	13
9	13	27	42	9	13	22	33	13	21	288	9	14
9	14	28	43	9	14	23	34	13	22	297	9	14
10	14	29	45	9	14	23	35	14	22	307	9	15
10	15	30	46	10	14	24	36	14	23	316	10	15
10	15	31	48	10	15	25	37	14	24	326	10	16
10	16	31	49	10	15	25	38	15	25	335	10	16
11	16	32	50	10	16	26	39	15	25	346	10	17
11	17	33	52	11	16	27	40	16	26	355	11	17
11	17	34	53	11	17	28	41	16	27	365	11	18
11	18	35	55	11	17	29	43	17	27	376	11	18
12	18	36	56	12	18	29	44	17	28	387	12	19
12	19	37	58	12	18	30	45	18	29	398	12	19
12	19	38	60	12	19	31	46	18	30	408	12	20
12	20	39	61	13	19	32	47	18	31	419	13	20
13	20	40	63	13	20	33	49	19	31	430	13	21
13	21	41	64	13	20	33	50	19	32	442	13	21
13	21	42	66	14	21	34	51	20	33	453	14	22
13	22	44	68	14	21	35	52	20	34	465	14	22
14	22	45	70	14	22	36	54	21	35	476	14	23
14	23	46	71	15	22	37	55	22	36	488	15	24
14	23	47	73	15	23	38	56	22	37	500	15	24
14	24	48	75	16	23	39	58	23	37	512	16	25
15	25	49	77	16	24	40	59	23	38	525	16	25
15	25	50	78	16	24	41	61	24	39	537	16	26
15	26	51	80	17	25	42	62	24	40	550	17	26
15	26	53	82	17	26	43	64	25	41	562	17	27
15	27	54	84	17	26	44	65	25	42	575	17	28
15	28	55	86	18	27	45	66	26	43	588	18	28
15	28	56	88	18	27	46	68	26	44	601	18	29
15	29	58	90	19	28	47	69	27	45	614	19	30
15	29	59	92	19	29	48	71	28	46	628	19	30
15	30	60	94	19	29	49	72	28	47	641	19	31
15	31	61	96	20	30	50	74	29	48	655	20	32
15	31	63	98	20	30	51	76	29	49	669	20	32
15	32	64	100	21	31	52	77	30	50	683	21	33
15	33	65	102	21	32	53	79	31	51	697	21	34
15	..	..	..	22	32	54	80	31	52	712	22	34
15	..	..	..	22	33	55	82	32	53	726	22	35
15	..	..	..	22	34	56	84	33	54	740	22	36
15	..	..	..	23	34	57	85	33	55	755	23	36
15	..	..	..	..	..	..	..	34	56	770	23	37
15	..	..	..	..	..	..	..	35	57	785	24	38
15	..	..	..	..	..	..	..	35	58	800	24	39
15	..	..	..	..	..	..	..	..	..	816	25	39
15	..	..	..	..	..	..	..	..	..	831	..	..

LINE B  
PRESSURE RATING  
OF PUMP



## PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

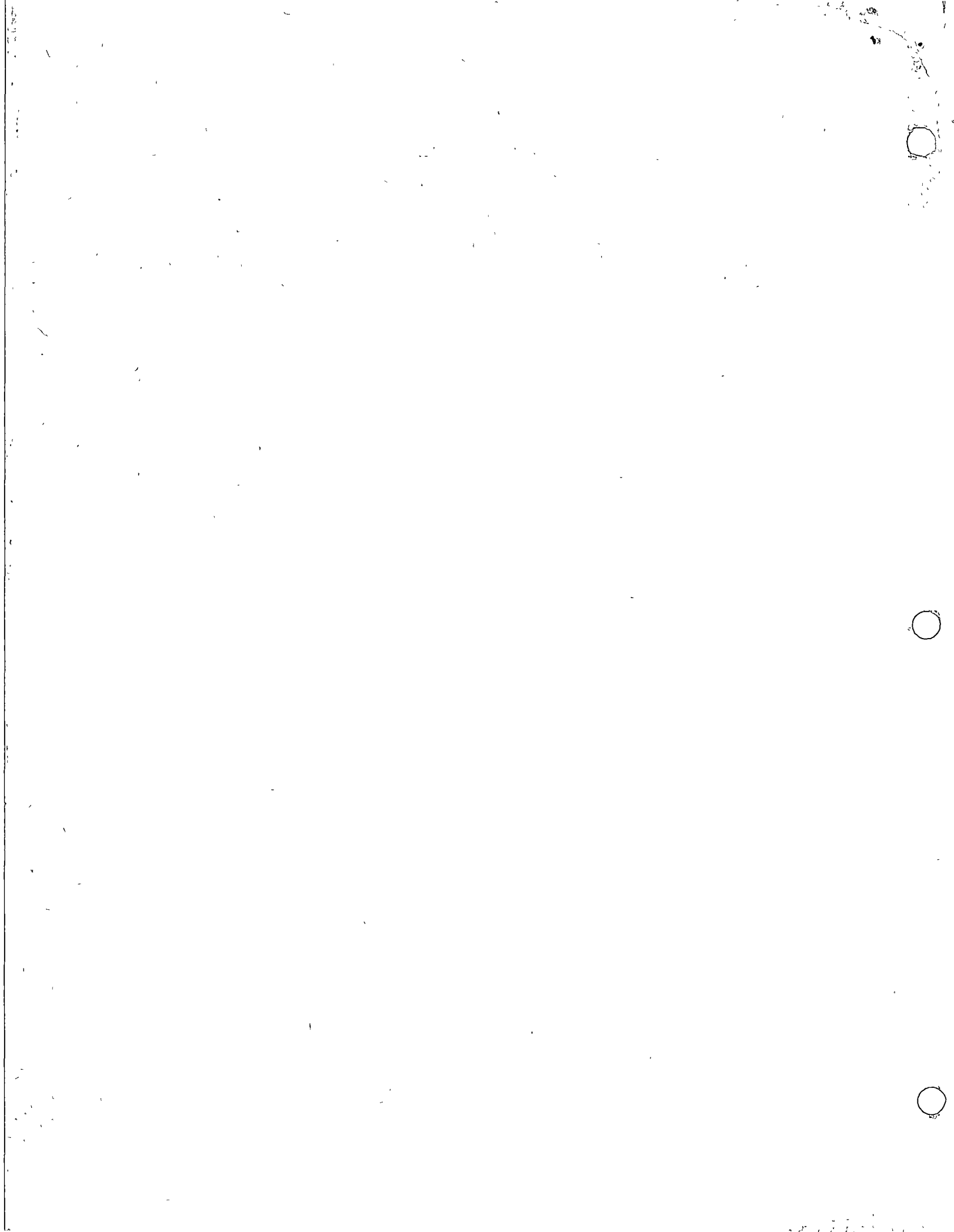
HOLE SIZE.....	9 7/8"		10 3/8"		11"		12 1/4"		13 3/4"			15"	
	6 1/2" - 7"	7 3/8" - 8"	8 3/8" - 9"	9 3/8" - 10"	10 3/8" - 11"	11 3/8" - 12"	12 3/8" - 13"	13 3/8" - 14"	7 3/8" - 9"	10"	11"	7 3/8" - 10"	11"
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH												
271— 290.....	1	3	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
291— 310.....	1	3	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
311— 330.....	1	4	1	1	..	..	..	..	..	..	..	..	..
331— 350.....	1	4	1	1	..	..	..	..	..	..	..	..	..
351— 370.....	1	5	1	2	..	..	..	..	..	..	..	..	..
371— 390.....	1	5	1	2	1	1	..	..	..	..	..	..	..
391— 410.....	2	6	1	2	1	1	..	..	..	..	..	..	..
411— 430.....	2	6	1	2	1	1	..	..	..	..	1	..	..
431— 450.....	2	7	1	2	1	2	..	..	..	..	1	..	..
451— 470.....	2	7	1	2	1	2	1	1	..	..	1	..	..
471— 490.....	2	8	1	3	1	2	1	1	..	..	2	..	..
491— 510.....	3	9	1	3	1	2	1	1	..	1	2	..	..
511— 530.....	3	10	1	3	1	2	1	1	..	1	2	..	..
531— 550.....	3	10	2	3	1	2	1	1	..	1	2	..	..
551— 570.....	3	11	2	4	1	2	1	1	..	1	2	..	..
571— 590.....	3	12	2	4	1	3	1	1	..	1	2	..	..
591— 610.....	4	13	2	4	1	3	1	1	..	1	3	..	1
611— 630.....	4	14	2	5	1	3	1	1	..	1	3	..	1
631— 650.....	4	15	2	5	2	3	1	1	..	1	3	..	1
651— 670.....	4	16	2	5	2	3	1	1	..	1	3	..	1
671— 690.....	5	16	3	6	2	4	1	1	..	1	3	..	1
691— 710.....	5	17	3	6	2	4	1	1	..	1	3	..	1
711— 730.....	5	18	3	6	2	4	1	1	..	2	4	..	1
731— 750.....	5	19	3	7	2	4	1	1	..	2	4	..	1
751— 770.....	5	21	3	7	2	5	1	1	..	2	4	..	1
771— 790.....	6	22	3	7	2	5	1	2	1	2	4	..	1
791— 810.....	6	22	3	8	2	5	1	2	1	2	4	..	1
811— 830.....	7	23	4	8	3	5	1	2	1	2	5	..	1
831— 850.....	7	25	4	9	3	6	1	2	1	2	5	..	1
851— 870.....	8	26	4	9	3	6	1	2	1	2	5	..	1
871— 890.....	8	27	4	10	3	6	1	2	1	2	5	..	2
891— 910.....	8	28	4	10	3	6	1	2	1	2	6	..	2
911— 930.....	9	29	4	10	3	7	1	2	1	2	6	..	2
931— 950.....	9	31	5	11	3	7	1	2	1	3	6	..	2
951— 970.....	9	32	5	11	4	7	1	2	1	3	6	1	2
971— 990.....	10	33	5	12	4	8	1	2	1	3	7	1	2
991—1010.....	10	35	5	12	4	8	2	3	1	3	7	1	2
1011—1030.....	11	36	5	13	4	8	2	3	1	3	7	1	2
1031—1050.....	11	37	6	13	4	9	2	3	1	3	7	1	2
1051—1070.....	11	39	6	14	5	9	2	3	1	3	8	1	2
1071—1090.....	12	40	6	14	5	10	2	3	1	3	8	1	2



## PRESSURE LOSS BETWEEN DRILL COLLAR O.D. AND WALL OF HOLE

DRILL COLLAR	9 7/8"		10 5/8"		11"		12 1/4"		13 3/4"		15"	
	6 1/4" - 7"	7 3/4" - 8"	6 3/4" - 7"	7 3/4" - 8"	6 3/4" - 7"	7 3/4" - 8"	6 3/4" - 7"	7 3/4" - 8"	7 3/4" - 9"	10"	11"	7 3/4" - 10"
PER MINUTE	PRESSURE LOSS AROUND DRILL COLLARS—PSI PER 100 FT. OF LENGTH											
12	42	6	15	5	10	2	3	1	4	8	1	2
13	43	6	15	5	10	2	3	1	4	9	1	3
13	45	7	16	5	11	2	4	1	4	9	1	3
14	47	7	16	5	11	2	4	2	4	9	1	3
14	48	7	17	6	11	2	4	2	4	10	1	3
15	50	7	18	6	12	2	4	2	4	10	1	3
15	51	8	18	6	12	2	4	2	4	10	1	3
16	53	8	19	6	13	3	4	2	5	11	1	3
16	55	8	19	6	13	3	4	2	5	11	1	3
17	57	8	20	7	13	3	4	2	5	11	1	3
17	58	9	21	7	14	3	5	2	5	12	1	3
18	60	9	21	7	14	3	5	2	5	12	1	4
18	62	9	22	7	15	3	5	2	5	12	1	4
19	64	9	23	8	15	3	5	2	5	13	1	4
19	66	10	23	8	15	3	5	2	6	13	1	4
20	68	10	24	8	16	3	5	2	6	13	2	4
20	70	10	25	8	16	3	6	2	6	14	2	4
21	71	11	25	8	17	3	6	2	6	14	2	4
22	73	11	26	9	17	3	6	2	6	15	2	4
22	75	11	27	9	18	4	6	2	6	15	2	4
23	78	11	27	9	18	4	6	3	7	16	2	5

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP



### LINE (8) - PRESSURE RATING OF PUMP

The following tables have been prepared showing a few makes and models of pumps with the manufacturers' recommended maximum strokes per minute and maximum discharge pressures for different liner sizes. This discharge pressure is determined by the maximum piston rod load and is independent of the operating speed. The mechanical input horsepower required to drive the pump at the maximum strokes with the maximum discharge pressure is also given for each pump and is the same for all liner sizes. The information in the table was taken from the manufacturers' published pamphlets. However, this information may become obsolete as pump manufacturers change their models and should therefore be confirmed periodically. Discharge pressures for intermediate liner sizes not given in the published data have been calculated by interpolation.

### EXAMPLE

On the sample work sheet it is indicated that an example 16" pump is to be used with 5¼" liners. By referring to the table, it will be noted that this pump has a rating of 2100 psi discharge pressure using 5¼" liners. This figure is then shown on line (8) of the sample work sheet.

LINE 8  
PRESSURE RATING  
OF PUMP

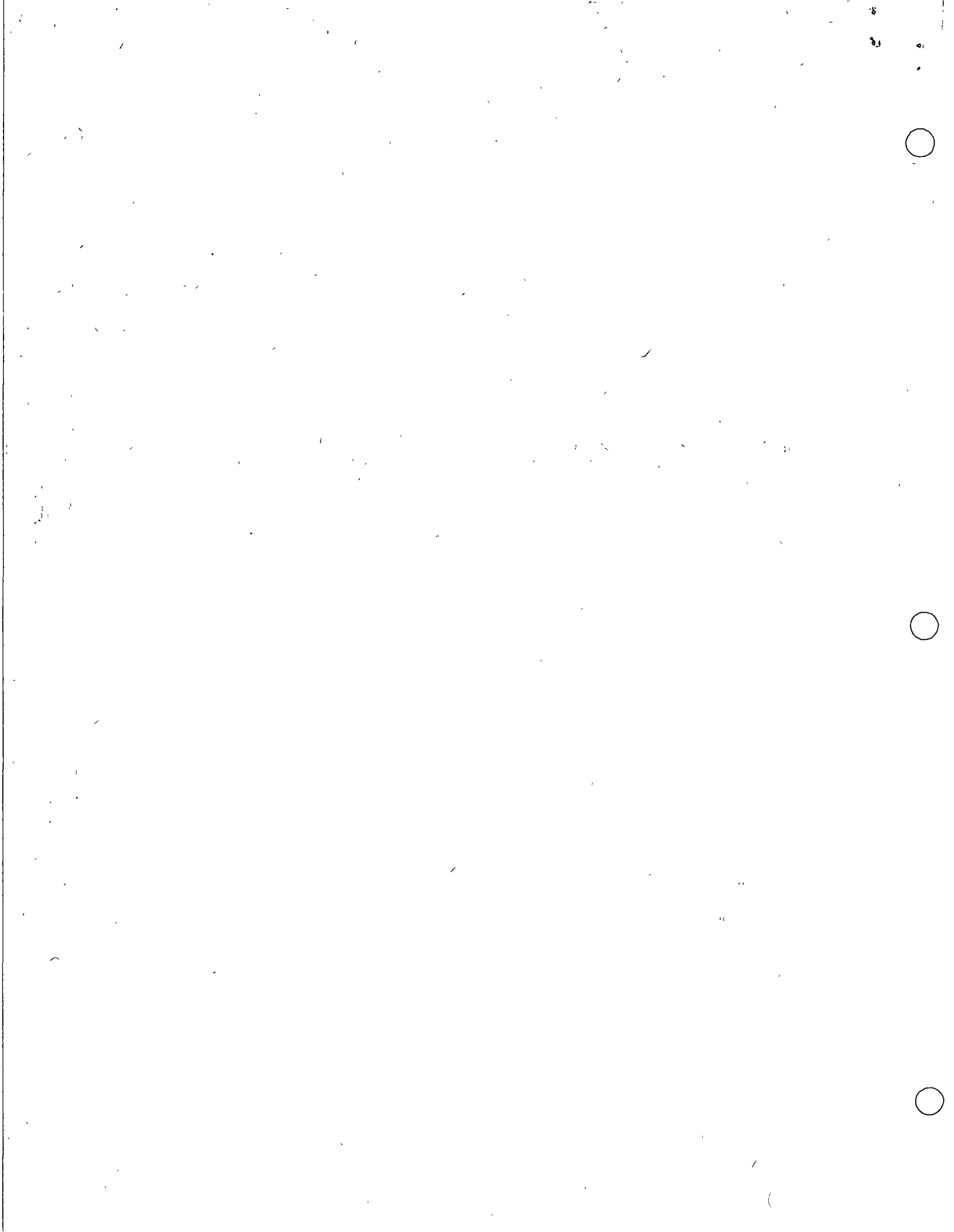
LINE 11  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL STEM BORE

LINE 12 & 13  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL STEM

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINES 9 & 10





## POWER SLUSH PUMP OPERATING DATA

PUMP MANUFACTURER	PUMP MODEL No.	RECOM'D STROKES PER MIN. MAX.	MAX. INPUT H.P. REQ'D	MAXIMUM DISCHARGE PRESSURE—PSI—USING LINER SIZE SHOWN																							
				2½"	2¾"	3"	3½"	3¾"	4"	4¼"	4½"	4¾"	5"	5¼"	5½"	5¾"	6"	6¼"	6½"	6¾"	7"	7¼"	7½"	7¾"	8"	8¼"	8½"
<b>10" STROKE LENGTH</b>																											
EMSCO.....	D-125	85	125	....	....	....	....	....	....	840	743	670	604	548	499	456	419	386	357	326	308	....	....	....	....	....	....
GARDNER DENVER.....	FO-FXO	70	122	....	....	....	....	....	....	....	....	772	....	638	....	536	....	457	423	393	367	....	....	....	....	....	....
IDECO.....	MM-200	80	200	....	....	....	....	2000	1825	....	1460	....	1163	....	970	864	750	....	667	617	....	....	....	....	....	....	....
S. N. M.A.R.E.P.....	DA-225	125	225	....	....	....	2260	1960	1720	1520	1350	1210	1090	930	890	810	740	680	620	577	....	....	....	....	....	....	....
NATIONAL.....	D-50	75	80	....	....	....	1030	....	770	....	600	....	480	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	C-100	75	150	....	....	....	....	....	....	....	....	915	825	745	680	620	570	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
OILWELL.....	510-P	85	116	1500	....	1500	1310	....	955	765	....	615	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	610-P	85	116	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	500	....	....	385	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	810-P	85	116	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	250	....	250	....	250	....	....	....
WILSON SNYDER.....	510-P	85	116	1500	....	1500	1310	....	985	....	765	....	615	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
ALFRED WIRTH.....	LK 4½ x 1½	70	89	....	1780	1635	1135	....	820	....	701	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	LK 5¼ x 1½	70	89	....	....	1650	1140	....	890	....	715	....	570	....	....	430	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
<b>12" STROKE LENGTH</b>																											
BETHLEHEM.....	H-150	65	177	....	....	....	....	....	....	....	1130	....	948	355	779	711	653	600	555	515	478	....	....	....	....	....	....
EMSCO.....	C-12	65	165	....	....	....	....	....	....	....	....	....	880	795	725	660	610	550	520	480	445	....	....	....	....	....	....
	D-175	75	175	....	....	....	....	....	....	1130	1000	893	307	731	666	602	558	514	475	....	....	....	....	....	....	....	....
	D-225	70	225	....	....	....	....	....	....	1551	....	1379	1234	1111	1007	916	833	769	708	654	607	565	....	....	....	....	....
	H-25	75	252	....	....	....	....	....	....	....	....	1383	....	132	....	944	....	799	....	683	....	593	....	....	....	....	....
GARDNER DENVER.....	FZ-FXZ	70	185	....	....	....	....	....	....	....	....	....	983	892	817	745	685	631	585	542	504	470	....	....	....	....	....
IDECO.....	T-320	70	320	....	....	....	....	....	....	....	....	....	1406	1269	1146	1042	955	874	823	741	687	640	....	....	....	....	....
	T-440	65	140	....	....	....	....	2930	....	2730	....	1785	1600	1445	1300	1190	1090	1000	926	863	800	....	....	....	....	....	....
	MM-300	80	300	....	....	....	....	....	....	2082	1830	....	158	....	1185	....	965	....	832	768	712	662	....	....	....	....	....
	MM-450	80	450	....	....	....	....	....	....	....	2830	2510	2225	2008	1810	1645	1500	1374	1265	1165	1082	1000	....	....	....	....	....
	FM-600	75	600	....	....	....	....	....	....	....	2690	....	2120	....	1720	1560	1415	....	1200	1105	1027	951	....	....	....	....	....
MANNESMANN TRAUZL.	G-12	60	150	....	....	....	....	....	....	....	....	....	2500	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
NATIONAL.....	C-150-B	70	220	....	....	....	....	....	....	....	....	....	1205	1035	985	895	820	760	690	640	595	550	....	....	....	....	....
OILWELL.....	12-P	70	100	....	....	....	....	....	....	....	....	....	540	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	12-PLD	70	100	....	....	....	....	....	....	....	....	....	540	485	440	400	365	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	612-P	70	140	....	....	....	....	....	....	....	....	....	765	630	625	570	520	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	212-P	70	220	....	....	....	....	....	....	....	....	....	1200	1035	985	895	820	760	690	640	600	550	....	....	....	....	....
	712-P	70	320	....	....	....	....	....	....	....	....	....	1300	1085	985	895	820	760	690	640	600	550	....	....	....	....	....



## POWER SLUSH PUMP OPERATING DATA

PUMP MANUFACTURER	PUMP MODEL No.	RECOM'D STROKES PER MIN. MAX.	MAX. INPUT H.P. REQ'D	MAXIMUM DISCHARGE PRESSURE—PSI—USING LINER SIZE SHOWN																							
				2½"	2¾"	3"	3½"	3¾"	4"	4¼"	4½"	4¾"	5"	5¼"	5½"	5¾"	6"	6¼"	6½"	6¾"	7"	7¼"	7½"	7¾"	8"	8¼"	8½"
<b>12" STROKE LENGTH (Cont.)</b>																											
WHELAND .....	HP-8000	..	...																								
	HP-8000-A	60	200	...	...	...	...	...	...	...	1295	...	1053	...	877	...	739	683	633	583	...	...	...	...	...		
WILSON-SNYDER.....	C12-P	75	140	...	...	...	...	...	...	...	765	...	625	...	520	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...		
	212-P	70	220	...	...	...	...	...	...	...	1200	...	...	...	820	...	690	640	600	550	...	...	...	...	...		
ALFRED-WIRTH.....	LK 6¾" x 12"/N	70	246	...	...	...	...	...	...	120	...	96	...	...	70	...	...	...	52	...	...	...	...	...	...		
	LK 6¾" x 12"/H	70	450	...	...	...	...	...	...	...	2750	...	...	2080	...	...	...	1480	...	...	...	...	...	...	...		
<b>14" STROKE LENGTH</b>																											
BETHLEHEM.....	GEF-225-OB	60	225	...	...	...	...	...	...	...	1249	1121	1016	924	845	775	714	659	610	568	529	495	463	...	...		
EMSCO.....	B-14	65	265	...	...	...	...	...	...	...	...	1220	1100	1003	910	840	770	715	660	615	570	535	...	...	...		
	D-300	70	300	...	...	...	...	...	...	1000	1430	1230	1162	1060	965	885	815	754	698	650	602	...	...	...	...		
	G-35	75	351	...	...	...	...	...	...	...	1455	...	1227	...	1031	...	878	...	757	...	660	...	580	...	...		
	D-375	70	375	...	...	...	...	...	...	1991	1777	1600	1415	1318	1156	1104	1018	939	871	810	744	...	...	...	...		
GARDNER DENVER.....	FK-FXK	70	255	...	...	...	...	...	...	...	1163	1053	961	876	807	744	688	638	593	543	...	...	...	...	...		
	GXN	70	500	...	...	...	...	...	...	...	2435	...	1974	...	1633	...	1377	1271	1177	1094	...	...	...	...	...		
MANNESMANN TRAUZL.	G-14	60	252	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	2500	...	...	...	...	...	...	...		
	BA-500	95	500	...	...	...	...	...	...	3140	2800	2510	2250	2040	1850	1690	1540	1410	1300	1190	1100	...	...	...	...		
S. N. M.A.R.E.P.....	DS-7114-R	65	500	...	...	...	...	...	...	...	2310	2080	1870	1690	1540	1400	1280	1170	1080	1000	...	...	...	...	...		
	BB-600	95	600	...	...	...	...	...	...	3200	3350	2970	2640	2340	2090	1880	1680	1510	1360	1220	1100	...	...	...	...		
NATIONAL.....	E500, G700	70	700	...	...	...	...	...	...	...	3550	3175	2855	2520	2150	1970	1815	1680	1560	1450	1350	1265	...	...	...		
	K-380	70	380	...	...	...	...	...	...	...	2100	1875	1675	1520	1370	1255	1145	1055	970	900	835	...	...	...	...		
OILWELL.....	14-P	60	230	...	...	...	...	...	...	...	1220	1110	1010	975	850	820	725	670	625	580	...	...	...	...	...		
	14-PHD	65	325	...	...	...	...	...	...	...	1700	1525	1375	1230	1140	1050	960	890	820	765	...	...	...	...	...		
OILWELL.....	214-P	70	350	...	...	...	...	...	...	...	1700	1525	1375	1250	1140	1050	960	890	820	765	...	...	...	...	...		
	HP-14000A			...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...		
WHELAND.....	HP-14000	60	353	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1625	1476	1346	1233	1135	1047	970	900	838	...	...	...	...		
	HP-11000	50	250	...	...	...	...	...	...	...	1600	1440	1304	1182	1077	987	906	838	775	720	...	...	...	...	...		
WILSON MFG.....	GIANT	95	575	...	...	...	...	...	...	...	2050	...	1700	...	1400	...	1200	...	1050	...	900	...	...	...	...		
WILSON-SNYDER.....	214-P	65	325	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1375	...	1140	...	960	890	820	765	...	...	...	...	...		

35

A 24

LINES 9 & 10







2 5

2 .

POWER SLUSH PUMP OPERATING DATA

PUMP MANUFACTURER	PUMP MODEL No.	DISCH'D ST. LOKES PER MIN. MAX.	MAX. I.P. PUT H.P. REQ'D	MAXIMUM DISCHARGE PRESSURE—PSI—USING LINER SIZE SHOWN																						
				2½"	2¾"	3"	3½"	3¾"	4"	4¼"	4½"	4¾"	5"	5¼"	5½"	5¾"	6"	6¼"	6½"	7"	7¼"	7½"	7¾"	8"	8¼"	8½"
16" STROKE LENGTH (Cont.)																										
NATIONAL.....	K-700	35	700	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	E-700	65	1000	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	G-1000	65	1000	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	G-1000-B	65	1000	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	H-1250	60	1250	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
OILWELL.....	16-P	00	150	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	700-P	05	700	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	816-P	65	700	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	850-P	65	850	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
WHELAND.....	HP-16000	60	600	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
WILSON-SNYDER.....	700-P	05	700	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	850-P	65	850	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
EXAMPLE.....	X	65	500	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
15" STROKE LENGTH																										
BETHLEHEM.....	GOF600-OB	65	600	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	C-65	100	1212	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
EMSCO.....	D-850	60	850	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	DA-850	60	850	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	C-35	70	850	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	J-85	70	850	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	D-1000	60	1000	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
GARDNER DENVER.....	GR-GXR	00	750	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	GXR	60	1000	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	GXH	60	1250	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
IDECO.....	MM-1250	65	1250	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
MANNESMANN TRAUZL.....	G18	60	480	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
	G 1½"60	60	800	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
NATIONAL.....	C-350	00	600	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINE 10  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINES 12 & 13  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL STEM

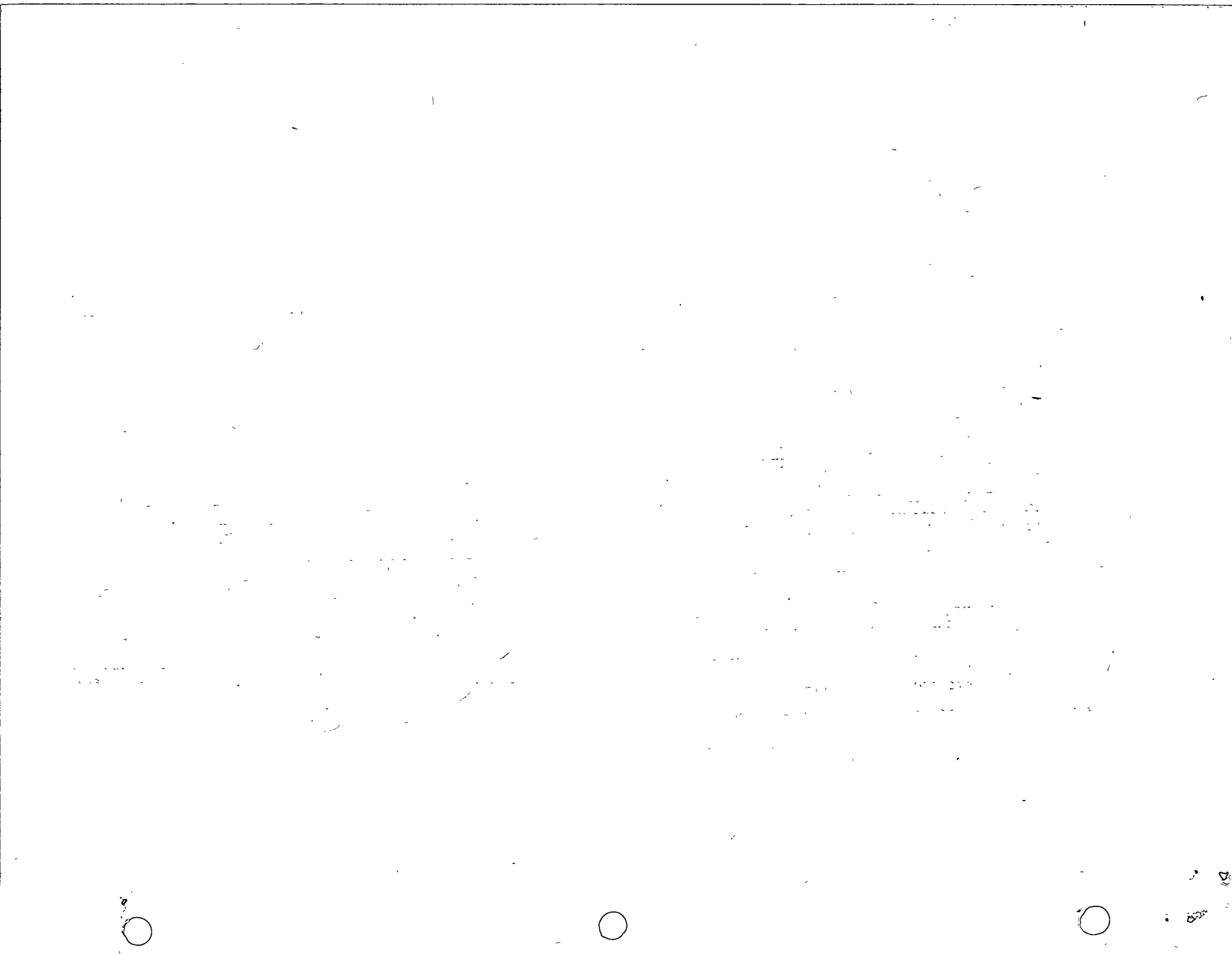
LINE 11  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL STEM BORE

LINES 9 & 10









## LINE (9) - CORRECTION FOR MUD WEIGHT

All pressure losses depend on the weight of mud being used. For simplification of the tables, all pressure losses were computed on the basis of using 10# mud. If mud of a different weight is being used, it is necessary to make a correction for it. The simplest way to do this is to make the allowance in the available surface pressure. This does not mean that the pressure rating of the pump is different for different mud weights, but this is a convenient way of correcting for mud weight in the calculations.

### EXAMPLE

In line (8) it was determined that with  $5\frac{1}{4}$ " liners, the pressure rating of the pump was 2100 psi. To correct for the mud weight, multiply the pressure rating of 2100 psi by 10, which is the assumed mud weight, and divide by the actual mud weight, which is 11 in the sample case. It is found that this gives a pressure of 1909 psi and should be entered in line (9).

## LINE (10) - PRESSURE REMAINING FOR BIT AND DRILL STEM

The pressure remaining for the bit and drill stem is the pressure of line (9) less the pressure losses in the surface equipment and the pressure losses in the bore of the drill collars and in the annulus around the outside of the drill collars.

### EXAMPLE

In line (9) a pressure of 1909 psi was determined. Line (7) gives a pressure loss of 118 psi for the surface equipment and drill collars. The difference of these two is the pressure available for drill stem and bit nozzle losses, which is 1791 psi. Enter this figure in line (10).

LINES 9 & 10

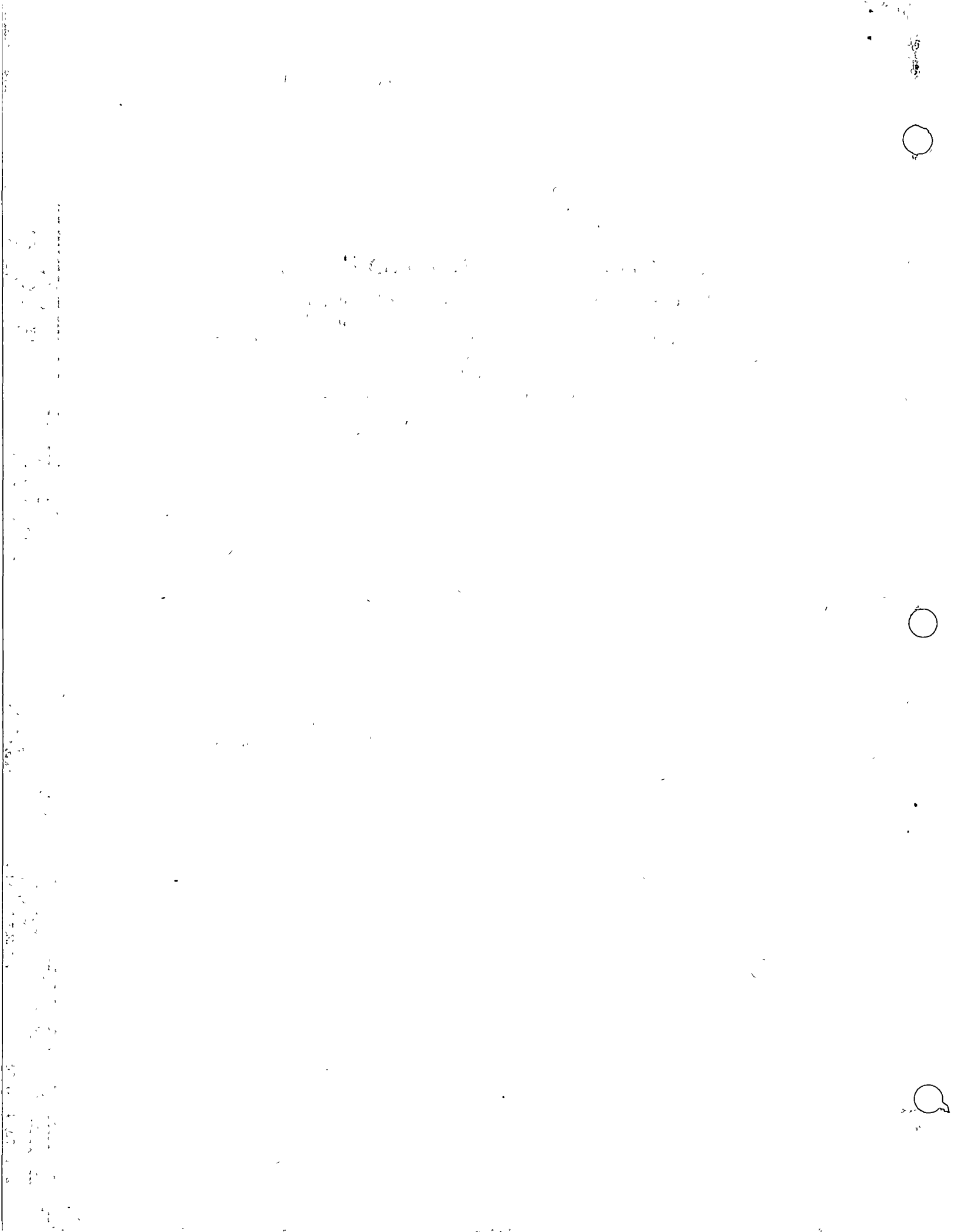
LINE 11  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL STEM BORE

LINES 12 & 13  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL STEM

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINES 16, 17, & 18



## LINE (11) – PRESSURE LOSS THROUGH DRILL STEM

The pressure loss through the drill stem depends on the circulation rate, length and bore of drill pipe, and bore of tool joint. The tables on the following sheets cover the most popular pipe sizes and tool joint bores. These tables give the pressure loss per 1000 feet of drill stem which also includes the loss through the tool joint bore

### EXAMPLE

On the sample work sheet it is shown that the drill stem is made up of 4½" 16.60# pipe and 3" I.D. tool joints. As already determined, the circulation rate is to be 320 gallons per minute. By referring to the table for 4½" pipe and 3" I.D. tool joints, it is found that the pressure loss for 320 gallons per minute is 47 psi per 1000 feet of drill stem. This figure is then placed on line (11) of the work sheet.

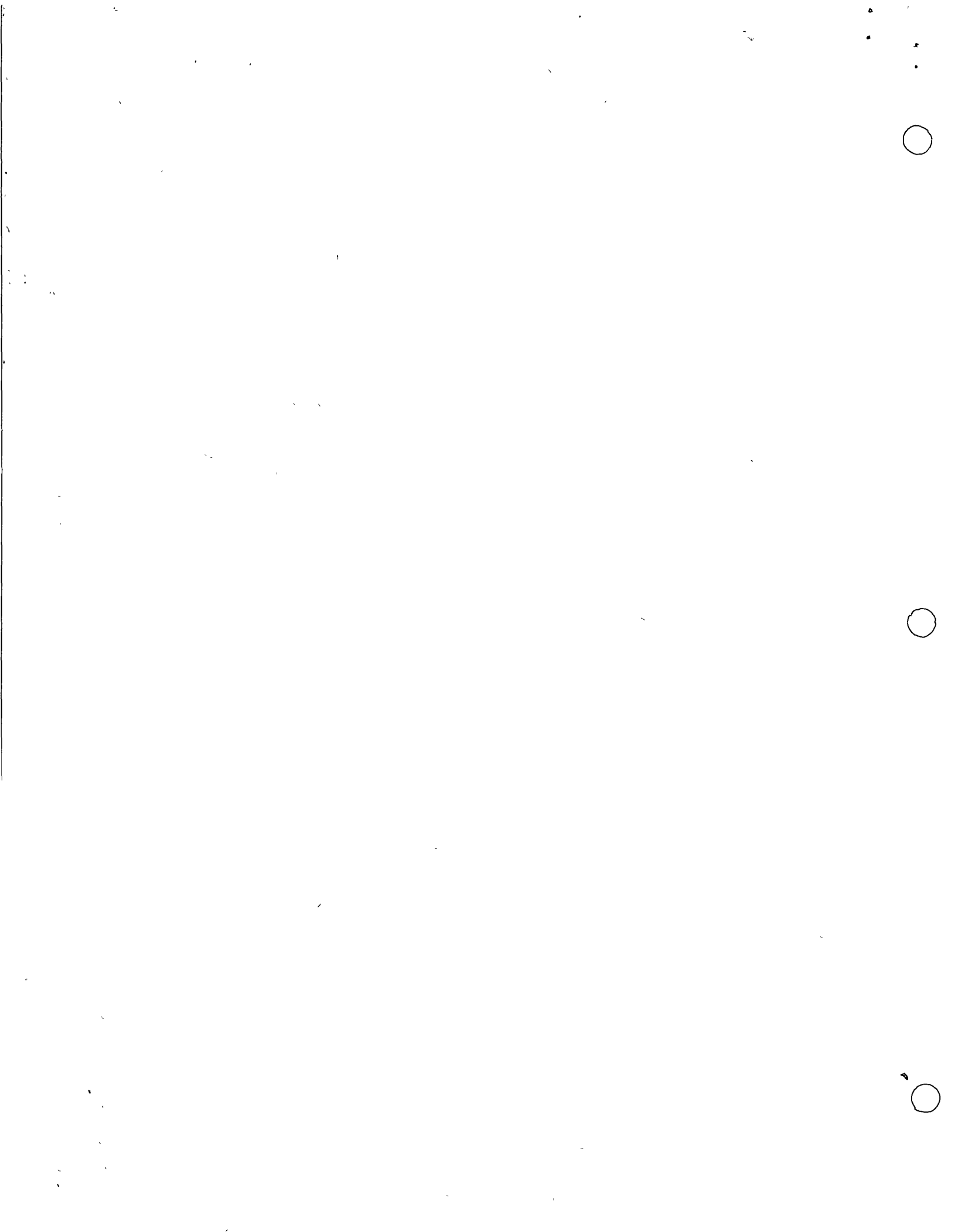
LINE 11  
PRESSURE LOSS THRU  
DRILL STEM BORE

LINE 12 & 13  
PRESSURE LOSS  
ACROSS DRILL STEM

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINE 16, 17, & 18









**PRESSURE LOSS THRU DRILL STEM BORE**

PIPE SIZE	2 3/8"			2 7/8"			3 1/2"					4"				4 1/2"				5"				5 1/2"			6 3/4"							
	I.F.	I.F.	S.L. H-60	S.H.	X.H.	I.F.	S.H.	I.F.	F.H.	I.F.	F.H.	I.F.	F.H.	I.F.	F.H.	X.H.	A.S.L. F.H.	A.S.L. F.H.	D.S.L. S.H.	Aeme	Reg. API	X.H.	Reg. API	Full Hole	Reg. API	F.H.								
TOOL JT. BORE	2 1/4"	2 1/8"	2.151"	1 3/4"	1 3/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 11/16"	2 7/8"	2 11/16"	2 11/16"	2 11/16"	3 1/4"	2 11/16"	3 1/4"	3 1/4"	3"	3 1/4"	3 3/4"	3 1/4"	3 1/4"	3 1/2"	2 11/16"	2 1/4"	2 1/4"	3 3/4"	2 3/4"	3"	3 1/4"	4"	3 1/2"	5"		
**PIPE WT.	10.40 LB.			13.00 LB.			15.50 LB.					18.00 LB.				15.70 LB.				10.50 LB.				20.00 LB.				19.50 LB.			21.00 LB.		25.20 LB.	
1LWDP WT.	6.85 LB.											9.50 LB.												11.25 LB.										
TUBING	6.50 LB.											9.80 LB.												11.00 LB.										

GALLONS PER MIN.	PRESSURE LOSS—PSI PER 100 FEET OF DRILL STEM																																																																	
	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510																				
290	328	303	304	626	586	563	191	108	228	229	111	72	67	82	77	53	39	37	34	28	46	46	48	53	53	59	21	18	16	13	13	6	4	328	303	304	626	586	563	191	108	228	229	111	72	67	82	77	53	39	37	34	28	46	46	48	53	53	59	21	18	16	13	13	6	4
300	344	323	325	666	635	600	204	179	243	235	119	77	71	87	82	58	42	40	37	30	49	49	51	57	57	63	23	19	17	14	13	6	5	344	323	325	666	635	600	204	179	243	235	119	77	71	87	82	58	42	40	37	30	49	49	51	57	57	63	23	19	17	14	13	6	5
310	355	343	345	703	675	637	217	190	258	249	126	82	76	93	87	60	44	42	39	32	52	52	53	60	60	67	24	20	18	15	14	6	5	355	343	345	703	675	637	217	190	258	249	126	82	76	93	87	60	44	42	39	32	52	52	53	60	60	67	24	20	18	15	14	6	5
320	383	364	356	751	716	676	220	201	274	264	134	86	80	98	92	64	47	44	41	34	55	55	58	64	64	71	25	21	19	16	15	7	5	383	364	356	751	716	676	220	201	274	264	134	86	80	98	92	64	47	44	41	34	55	55	58	64	64	71	25	21	19	16	15	7	5
330	410	386	387	735	753	716	243	213	290	280	142	91	85	104	97	67	50	47	44	35	59	59	61	68	68	76	27	23	20	17	16	7	6	410	386	387	735	753	716	243	213	290	280	142	91	85	104	97	67	50	47	44	35	59	59	61	68	68	76	27	23	20	17	16	7	6
340	434	408	409	841	802	757	257	225	306	296	159	97	90	110	103	71	53	50	46	38	61	62	65	72	72	80	28	24	21	18	17	8	6	434	408	409	841	802	757	257	225	306	296	159	97	90	110	103	71	53	50	46	38	61	62	65	72	72	80	28	24	21	18	17	8	6
350	453	430	432	868	843	799	272	238	323	312	153	102	95	115	109	75	56	52	48	40	65	66	68	76	76	84	30	25	22	19	18	8	6	453	430	432	868	843	799	272	238	323	312	153	102	95	115	109	75	56	52	48	40	65	66	68	76	76	84	30	25	22	19	18	8	6
360	483	454	455	935	892	842	286	251	341	329	167	108	100	122	114	79	61	55	51	42	68	69	72	80	80	89	32	26	24	20	19	9	6	483	454	455	935	892	842	286	251	341	329	167	108	100	122	114	79	61	55	51	42	68	69	72	80	80	89	32	26	24	20	19	9	6
370	503	477	479	934	899	866	301	264	358	345	175	113	105	129	120	83	62	58	54	44	72	73	76	84	84	93	33	28	25	21	20	9	7	503	477	479	934	899	866	301	264	358	345	175	113	105	129	120	83	62	58	54	44	72	73	76	84	84	93	33	28	25	21	20	9	7
380	534	502	503	1034	986	931	317	277	377	364	184	119	110	135	123	88	65	61	57	47	75	77	79	88	88	98	35	29	26	22	21	10	7	534	502	503	1034	986	931	317	277	377	364	184	119	110	135	123	88	65	61	57	47	75	77	79	88	88	98	35	29	26	22	21	10	7
390	550	526	528	1035	1035	977	332	291	395	382	193	125	116	142	133	92	68	64	60	49	79	81	83	92	93	103	37	31	27	23	22	10	7	550	526	528	1035	1035	977	332	291	395	382	193	125	116	142	133	92	68	64	60	49	79	81	83	92	93	103	37	31	27	23	22	10	7
400	587	552	554	1138	1065	1024	346	305	414	400	203	131	121	149	139	96	72	67	63	51	83	85	86	97	103	38	32	29	24	23	11	8	587	552	554	1138	1065	1024	346	305	414	400	203	131	121	149	139	96	72	67	63	51	83	85	86	97	103	38	32	29	24	23	11	8		
410	615	578	580	1191	1136	1072	365	319	434	419	212	137	127	155	146	101	75	70	65	54	87	88	91	102	102	113	40	34	29	25	24	11	8	615	578	580	1191	1136	1072	365	319	434	419	212	137	127	155	146	101	75	70	65	54	87	88	91	102	102	113	40	34	29	25	24	11	8
420	643	604	605	1276	1188	1121	381	334	454	438	222	143	133	163	152	106	78	73	68	56	91	92	96	106	106	118	42	35	31	26	25	12	9	643	604	605	1276	1188	1121	381	334	454	438	222	143	133	163	152	106	78	73	68	56	91	92	96	106	106	118	42	35	31	26	25	12	9
430	671	631	634	1302	1241	1171	393	349	474	458	232	150	139	170	159	110	82	77	71	59	95	97	100	111	111	123	44	37	33	27	26	12	9	671	631	634	1302	1241	1171	393	349	474	458	232	150	139	170	159	110	82	77	71	59	95	97	100	111	111	123	44	37	33	27	26	12	9
440	701	659	661	1355	1255	1223	415	364	495	478	242	156	145	177	165	115	85	80	75	64	99	101	104	116	116	129	46	39	34	29	28	13	9	701	659	661	1355	1255	1223	415	364	495	478	242	156	145	177	165	115	85	80	75	64	99	101	104	116	116	129	46	39	34	29	28	13	9
450	731	687	695	1416	1350	1275	424	380	516	498	252	163	151	185	173	120	85	84	79	64	103	105	109	121	121	134	48	40	35	30	29	13	10	731	687	695	1416	1350	1275	424	380	516	498	252	163	151	185	173	120	85	84	79	64	103	105	109	121	121	134	48	40	35	30	29	13	10
460	...	...	...	...	...	...	452	395	537	519	263	170	157	193	180	125	89	87	81	66	103	110	113	126	126	140	50	42	37	31	30	14	10	...	...	...	...	...	...	452	395	537	519	263	170	157	193	180	125	89	87	81	66	103	110	113	126	126	140	50	42	37	31	30	14	10
470	...	...	...	...	...	...	470	412	559	540	274	177	164	201	183	130	97	91	84	69	112	114	118	131	131	146	52	44	39	32	31	14	11	...	...	...	...	...	...	470	412	559	540	274	177	164	201	183	130	97	91	84	69	112	114	118	131	131	146	52	44	39	32	31	14	11
480	...	...	...	...	...	...	489	428	582	562	284	184	170	209	195	135	101	91	89	72	116	118	123	136	136	152	54	45	40	34	32	15	11	...	...	...	...	...	...	489	428	582	562	284	184	170	209	195	135	101	91	89	72	116	118	123	136	136	152	54	45	40	34	32	15	11
490	...	...	...	...	...	...	508	445	604	584	296	191	177	217	203	141	104	98	91	75	121	123	127	141	142	158	56	47	42	35	34	15	12	...	...	...	...	...	...	508	445	604	584	296	191	177	217	203	141	104	98	91	75	121	123	127	141	142	158	56	47	42	35	34	15	12
500	...	...	...	...	...	...	527	462	627	605	307	193	181	225																																																				



### PRESSURE LOSS THRU DRILL STEM BORE

PIPE SIZE	2 1/8"			2 3/8"			3 1/2"					4"				4 1/2"				4 7/8"					5"	6 1/8"				6 3/4"						
	I.F.	I.F.	S.L. H-90	S.H.	X.H.	I.F.	S.H.	I.F.	F.H.	I.F.	I.F.	F.H.	I.F.	F.H.	I.F.	I.F.	F.H.	X.H.	I.F.	I.F.	X.H.	A.S.L. P.H.	A.S.L. F.H.	D.S.L. S.H.	Acme	Reg. API	X.H.	Reg. API		Full Hole		Reg. API	F.H.			
TOOL JOINT BORE	2 1/8"	2 1/8"	2.151"	1 3/4"	1 7/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	3/4"	2 1/8"	3/4"	3/4"	3"	3/4"	3 1/2"	3 1/2"	3 1/2"	3 5/8"	3"	2 1/8"	2 1/2"	2 1/2"	3 3/4"	2 3/4"	3"	3 1/8"	4"	3 1/2"	5"			
**PIPE WT	10.40 LB.			13.30 LB.			15.50 LB.					14.00 LB.				15.70 LB.				16.00 LB.					20.00 LB.					19.50 LB.	21.00 LB.				20.20 LB.	
TLWDP WT.	6.85 LB.											9.50 LB.								11.65 LB.										13.75 LB.						
TUBING	6.50 LB.											9.30 LB.								11.00 LB.										12.75 LB.						

GALLONS PER MIN.	PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FEET OF DRILL STEM																																	
	2 1/8"	2 3/8"	3 1/2"	4"	4 1/2"	4 7/8"	5"	6 1/8"	6 3/4"	7 1/8"	7 7/8"	8 1/2"	9"	9 1/2"	10"	10 1/2"	11"	11 1/2"	12"	12 1/2"	13"	13 1/2"	14"	14 1/2"	15"	15 1/2"	16"	16 1/2"	17"	17 1/2"	18"	18 1/2"	19"	19 1/2"
520	...	...	...	...	...	...	568	551	681	658	330	213	198	241	226	197	117	109	132	83	135	138	142	158	158	176	63	53	47	39	33	17	13	
530	...	...	...	...	...	...	585	574	704	676	342	221	205	250	234	163	121	113	166	87	140	142	147	161	161	182	65	54	43	40	39	18	13	
540	...	...	...	...	...	...	616	602	724	699	354	229	212	259	242	163	125	117	155	90	145	147	153	159	169	189	67	56	50	42	40	18	14	
550	...	...	...	...	...	...	630	610	749	724	356	237	220	268	251	174	129	121	113	93	150	153	153	175	175	165	63	52	52	43	42	19	14	
560	...	...	...	...	...	...	651	629	775	749	379	245	227	277	259	160	134	126	117	96	155	156	164	181	182	202	72	60	54	45	43	20	15	
570	...	...	...	...	...	...	673	648	801	773	392	253	235	286	268	166	138	130	121	99	160	163	169	181	187	207	74	62	50	45	45	20	15	
580	...	...	...	...	...	...	695	667	827	799	404	261	242	295	277	162	142	134	125	102	165	168	174	181	184	216	77	64	57	48	45	21	15	
590	...	...	...	...	...	...	718	687	854	825	418	273	250	305	283	167	147	137	128	105	171	174	180	187	200	223	79	65	59	49	48	22	15	
600	...	...	...	...	...	...	740	707	881	851	431	273	258	315	295	168	148	138	133	109	176	179	185	191	206	229	81	68	61	51	49	22	17	
610	...	...	...	...	...	...	753	717	908	878	444	287	266	323	304	171	157	147	137	112	182	185	192	201	212	237	84	71	63	52	50	23	17	
620	...	...	...	...	...	...	787	748	937	905	458	295	274	335	313	178	162	152	141	116	189	191	197	219	219	244	87	73	65	54	52	24	13	
630	...	...	...	...	...	...	811	769	965	932	472	304	285	345	323	184	166	155	145	119	193	194	203	223	226	252	89	75	67	55	54	24	18	
640	...	...	...	...	...	...	835	790	993	950	486	314	291	355	332	187	171	161	150	123	199	203	210	223	233	259	92	77	69	57	55	25	19	
650	...	...	...	...	...	...	859	811	1022	988	500	323	300	365	342	193	176	166	154	126	205	208	216	233	239	267	95	79	71	59	57	26	19	
660	...	...	...	...	...	...	884	833	1052	1016	514	332	308	376	351	195	181	170	159	130	211	215	223	247	247	275	97	82	73	61	58	27	20	
670	...	...	...	...	...	...	909	855	1082	1045	529	341	317	386	362	197	187	175	163	134	217	220	228	253	253	282	100	84	75	62	60	27	20	
680	...	...	...	...	...	...	935	881	1112	1074	544	351	326	397	372	201	189	183	173	139	223	227	235	260	261	290	103	85	77	64	62	28	21	
690	...	...	...	...	...	...	960	909	1143	1104	559	361	335	408	383	206	197	185	172	141	229	233	241	267	267	298	106	89	79	65	63	29	22	
700	...	...	...	...	...	...	936	882	1173	1133	574	370	344	419	393	203	190	177	145	235	239	247	275	275	306	103	91	81	68	65	30	22		
710	...	...	...	...	...	...	1013	955	1205	1164	589	380	352	432	404	209	208	195	182	149	241	245	254	282	282	314	112	94	83	70	67	31	23	
720	...	...	...	...	...	...	1039	980	1237	1193	605	390	362	443	415	213	213	200	187	153	248	252	261	290	290	323	114	95	85	71	69	31	23	
730	...	...	...	...	...	...	1066	1002	1270	1226	619	400	371	454	426	213	213	201	191	157	254	258	267	297	297	331	117	99	88	73	71	32	24	
740	...	...	...	...	...	...	1094	1031	1301	1257	636	410	381	465	437	213	213	211	196	161	261	265	274	305	305	339	120	101	90	75	72	33	25	
750	...	...	...	...	...	...	1121	1059	1334	1289	652	420	390	478	447	216	216	201	185	167	272	276	281	312	312	348	123	104	92	77	74	34	25	
760	...	...	...	...	...	...	1149	1085	1367	1321	668	431	400	490	459	216	222	206	169	274	278	283	320	320	356	126	106	94	79	78	35	26		

\* API Lightweight Drill Pipe and Tubing Only.  
 \*\* Regular Drill Pipe Weight.  
 † Lightweight Drill Pipe Weight.  
 ‡ Tubing Weight.



PRESSURE LOSS THRU DRILL STEM BORE

PIPE SIZE	2 1/8"			2 1/2"			3 1/2"				4"				4 1/2"				5"				5 1/2"			6 1/2"					
TYPE OF TOOL JOINT	I.F.	I.F.	S.L. H-10	S.H.	X.H.	I.F.	S.H.	I.F.	F.H. X.H.	I.F.	I.F.	F.H.	I.F.	I.F.	F.H.	X.H.	I.F.	I.F.	X.H.	A.S.L. F.H.	A.S.L. F.H.	D.S.L. 3 H.	Acme	Reg. API	X.H.	Reg. API	Full Hole	Reg. API	F.H.		
TOOL JOINT BORE	2 1/8"	2 1/8"	2.151"	1 3/8"	1 3/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	2 1/8"	3 1/4"	2 1/8"	3 1/4"	3 1/4"	3"	3 1/4"	3 3/4"	3 3/4"	3 1/2"	3 1/2"	2 1/4"	2 1/4"	2 1/4"	3 3/4"	2 3/4"	3"	3 1/4"	4"	3 1/2"	5"
**PIPE WT.	10.40 LB.						13.30 LB.				15.60 LB.				18.00 LB.				20.00 LB.				19.50 LB.			21.99 LB.		25.20 LB.			
1LWDP WT.	6.85 LB.										9.50 LB.								11.85 LB.							13.75 LB.					
TUBING	6.50 LB.										3.30 LB.								11.60 LB.							12.75 LB.					

PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FEET OF DRILL STEM

GALLONS PER MIN.	770	780	790	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990	1000	1010								
770	...	...	...	...	...	...	1177	1029	1401	1353	685	441	410	502	470	329	242	227	211	173	291	285	295	328	328	366	130	103	97	61	78	26	27
780	...	...	...	...	...	...	1206	1054	1435	1389	702	452	420	514	481	334	248	232	216	176	287	292	302	335	335	374	133	111	99	63	80	35	27
790	...	...	...	...	...	...	1235	1079	1469	1419	719	463	430	526	493	349	251	238	222	182	294	299	309	347	347	383	136	114	101	65	82	37	28
800	...	...	...	...	...	...	1265	1105	1505	1454	736	474	440	539	505	359	260	244	227	189	301	307	317	352	352	392	139	117	104	67	84	38	28
810	...	...	...	...	...	...	1294	1131	1539	1487	753	485	450	551	516	369	265	249	232	190	308	314	325	360	361	401	142	120	106	69	86	39	29
820	...	...	...	...	...	...	1323	1157	1573	1521	770	495	460	564	528	380	271	255	237	195	316	321	332	369	369	411	146	122	109	71	87	40	30
830	...	...	...	...	...	...	1354	1183	1611	1556	785	505	471	577	540	375	276	261	243	199	323	328	340	377	378	420	149	125	111	73	89	41	30
840	...	...	...	...	...	...	1384	1210	1647	1591	806	519	482	590	553	383	284	266	244	204	330	335	347	385	385	429	152	128	114	75	91	42	31
850	...	...	...	...	...	...	1415	1237	1684	1627	823	531	492	603	565	392	290	272	251	208	337	342	355	394	394	439	156	131	116	77	94	43	32
860	...	...	...	...	...	...	1446	1264	1721	1663	842	542	503	616	577	400	298	279	259	213	345	350	363	402	403	448	159	134	119	79	96	44	33
870	...	...	...	...	...	...	1478	1292	1753	1699	860	554	514	630	590	409	306	284	265	217	353	358	371	412	412	459	163	137	121	81	98	45	34
880	...	...	...	...	...	...	1509	1319	1786	1735	878	566	525	643	602	418	315	290	270	222	360	365	379	420	421	468	166	139	124	83	100	46	34
890	...	...	...	...	...	...	1541	1347	1824	1773	897	579	535	657	615	426	316	297	278	227	367	374	387	429	430	478	170	142	126	85	102	47	35
900	...	...	...	...	...	...	1574	1375	1863	1809	916	590	546	671	623	435	323	303	282	232	375	381	395	428	429	489	173	145	129	87	104	47	35
910	...	...	...	...	...	...	1606	1404	1911	1847	935	602	559	685	641	445	329	309	288	236	383	389	403	447	448	499	177	148	132	89	106	48	35
920	...	...	...	...	...	...	1640	1433	1951	1885	954	615	570	699	654	454	336	315	294	241	391	398	412	457	457	509	181	151	135	91	108	49	37
930	...	...	...	...	...	...	1673	1462	1991	1923	973	627	582	713	658	463	343	322	300	246	398	405	419	465	465	518	184	155	137	93	110	50	38
940	...	...	...	...	...	...	1707	1492	2031	1962	993	640	594	727	661	472	350	328	306	251	407	413	428	475	475	529	188	158	140	95	112	51	38
950	...	...	...	...	...	...	1740	1521	2071	2001	1013	652	605	742	665	482	357	335	312	256	415	422	437	481	481	540	191	161	143	97	114	52	39
960	...	...	...	...	...	...	1775	1551	2112	2040	1033	665	617	756	678	491	364	341	319	261	423	430	445	494	494	550	195	164	145	99	116	53	40
970	...	...	...	...	...	...	1809	1581	2152	2079	1053	678	629	771	722	501	371	348	324	266	431	438	453	503	503	561	199	167	149	101	118	54	41
980	...	...	...	...	...	...	1844	1612	2194	2120	1073	691	642	786	736	510	378	355	330	271	440	447	463	514	514	572	203	170	151	127	122	56	42
990	...	...	...	...	...	...	1879	1643	2236	2169	1093	705	654	801	750	520	383	364	337	277	450	458	474	520	520	580	207	173	154	129	124	56	42
1000	...	...	...	...	...	...	1915	1674	2278	2201	1114	718	663	815	764	530	392	368	343	282	456	464	480	533	533	594	211	177	157	131	127	57	43
1010	...	...	...	...	...	...	1950	1705	2321	2242	1135	731	673	831	778	540	400	375	350	287	465	473	489	543	543	605	215	180	160	134	129	53	43

\* API Lightweight Drill Pipe and Tubing Only.

\*\* Regular Drill Pipe Weight.

† Lightweight Drill Pipe Weight

‡ Tubing Weight.

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINE 12 & 13  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL STEM

LINE 16, 17, & 18

433

45



### PRESSURE LOSS THRU DRILL STEM BORE

PIPE SIZE	2 1/8"			2 7/8"			3 1/2"					4"					4 1/2"					4 7/8"					5"				6 1/2"				6 3/4"				
	I.F.	I.F.	S.L. H-90	S.H.	X.H.	I.F.	S.H.	I.F.	F.H. X.H.	I.F.	I.F.	F.H.	I.F.	F.H.	I.F.	I.F.	F.H.	X.H.	I.F.	I.F.	X.H.	A.S.L. F.H.	A.S.L. F.H.	D.S.L. S.H.	Acme	Reg. API	X.H.	Reg. API	Full Hole	Reg. API	F.H.	Reg. API	F.H.						
TOOL JT. BORE	2 1/8"	2 1/8"	2 151"	1 3/4"	1 7/8"	2 3/8"	2 1/8"	2 1 1/16"	2 7/16"	2 1 1/16"	2 1 1/16"	2 1 1/16"	3 3/4"	2 1 3/16"	3 3/4"	3 3/4"	3"	3 1/4"	3 3/4"	3 3/4"	3 3/4"	3 3/4"	3 3/4"	3"	2 1 1/16"	2 1/2"	2 1/4"	3 3/4"	2 3/4"	3"	3 1 1/16"	4"	3 1/2"	5"					
*PIPE WT.				10.40 LB.			13.33 LB.		15.53 LB.						14.00 LB.		15.70 LB.								20.00 LB.					19.50 LB.				21.90 LB.				25.20 LB.	
†LWDP WT.	6.85 LB.																																						
‡TUBING	6.50 LB.																																						
GALLONS PER MIN.      PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FEET OF DRILL STEM																																							
1000	...	...	...	...	...	...	1987	1737	2394	2254	1156	745	601	547	793	550	407	332	350	292	173	481	493	553	553	615	219	182	163	136	131	69	44						
1030	...	...	...	...	...	...	2023	1768	2407	2325	1177	759	704	652	807	660	415	339	352	298	182	490	508	563	564	628	223	187	166	139	134	60	45						
1040	...	...	...	...	...	...	2060	1800	2451	2363	1198	772	717	679	822	670	422	355	365	303	191	499	517	574	574	639	227	190	169	141	136	61	45						
1050	...	...	...	...	...	...	2096	1833	2494	2410	1220	785	729	693	837	680	430	370	370	309	199	507	525	583	583	650	231	193	172	144	139	62	47						
1060	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	800	742	609	852	690	437	410	382	314	208	517	535	594	594	662	235	197	175	146	141	64	47						
1070	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	814	765	625	867	701	445	419	389	320	218	527	545	605	605	674	239	200	178	149	144	65	48						
1080	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	823	783	641	882	711	453	423	395	325	226	535	554	615	615	685	243	204	181	152	146	65	49						
1090	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	843	782	658	897	722	461	432	403	331	236	545	564	625	627	693	246	207	184	154	149	67	50						
1100	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	857	795	674	912	733	463	440	410	336	245	554	573	635	637	709	252	211	188	157	151	68	51						
1110	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	872	800	691	928	743	471	447	417	342	254	563	583	647	647	721	255	214	190	159	153	69	52						
1120	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	886	822	707	943	754	485	455	424	343	264	573	594	650	659	734	260	217	193	162	156	70	53						
1130	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	901	836	724	959	765	493	462	431	354	273	583	603	661	700	740	264	221	197	165	158	72	53						
1140	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	916	850	741	975	776	507	470	438	360	282	592	613	670	731	758	268	225	200	167	161	73	54						
1150	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	931	864	758	991	787	509	478	445	365	292	602	623	681	762	770	273	228	203	170	164	74	55						
1160	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	946	878	775	1007	798	518	486	452	371	301	612	633	702	763	783	277	232	205	173	166	75	56						
1170	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	961	892	793	1023	809	526	493	460	377	311	622	643	714	775	796	282	236	210	176	169	76	57						
1180	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	977	906	810	1040	821	534	501	467	383	321	632	654	726	776	809	286	240	213	178	172	78	58						
1190	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	992	921	825	1056	832	543	509	474	389	331	642	664	737	778	822	291	243	216	181	174	79	59						
1200	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1008	935	841	1073	844	551	517	482	395	340	651	674	748	749	834	295	247	220	184	177	80	60						
1210	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1024	950	859	1089	855	560	525	489	402	350	661	685	760	760	847	300	251	223	187	180	81	61						
1220	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1039	964	878	1106	867	569	533	497	408	360	672	695	772	772	860	304	255	227	190	183	83	62						
1230	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1055	979	897	1123	879	577	541	505	414	371	682	708	783	783	873	309	259	230	193	186	84	63						
1240	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1071	993	917	1140	891	586	550	512	420	381	692	717	795	795	885	314	263	234	196	188	85	64						
1250	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1087	1009	935	1157	903	595	558	520	427	391	703	727	807	807	899	318	267	237	199	191	86	64						
1260	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1103	1024	954	1175	914	605	566	528	433	401	713	738	819	820	913	323	271	241	202	194	88	65						

\* API Lightweight Drill Pipe and Tubing Only.  
 \*\* Regular Drill Pipe Weight.  
 † Lightweight Drill Pipe Weight.  
 ‡ Tubing Weight.

46





## LINE (12) – PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

The pressure loss around the drill stem depends on the hole size, length and O.D. of pipe, O.D. of tool joints, and the circulation rate. The tables on the following sheets show the pressure loss per 1000 feet of drill stem, which includes the tool joints.

### EXAMPLE

On the sample work sheet it is indicated that 4½" pipe and 6" O.D. tool joints are to be used in 9" hole, with a circulation rate of 320 gallons per minute. By referring to the attached tables, this gives a pressure loss of 6 psi per 1000 feet of drill stem. This figure is then shown on line (12) of the sample work sheet.

## LINE (13) – TOTAL PRESSURE LOSS FOR 1000 FEET OF DRILL STEM

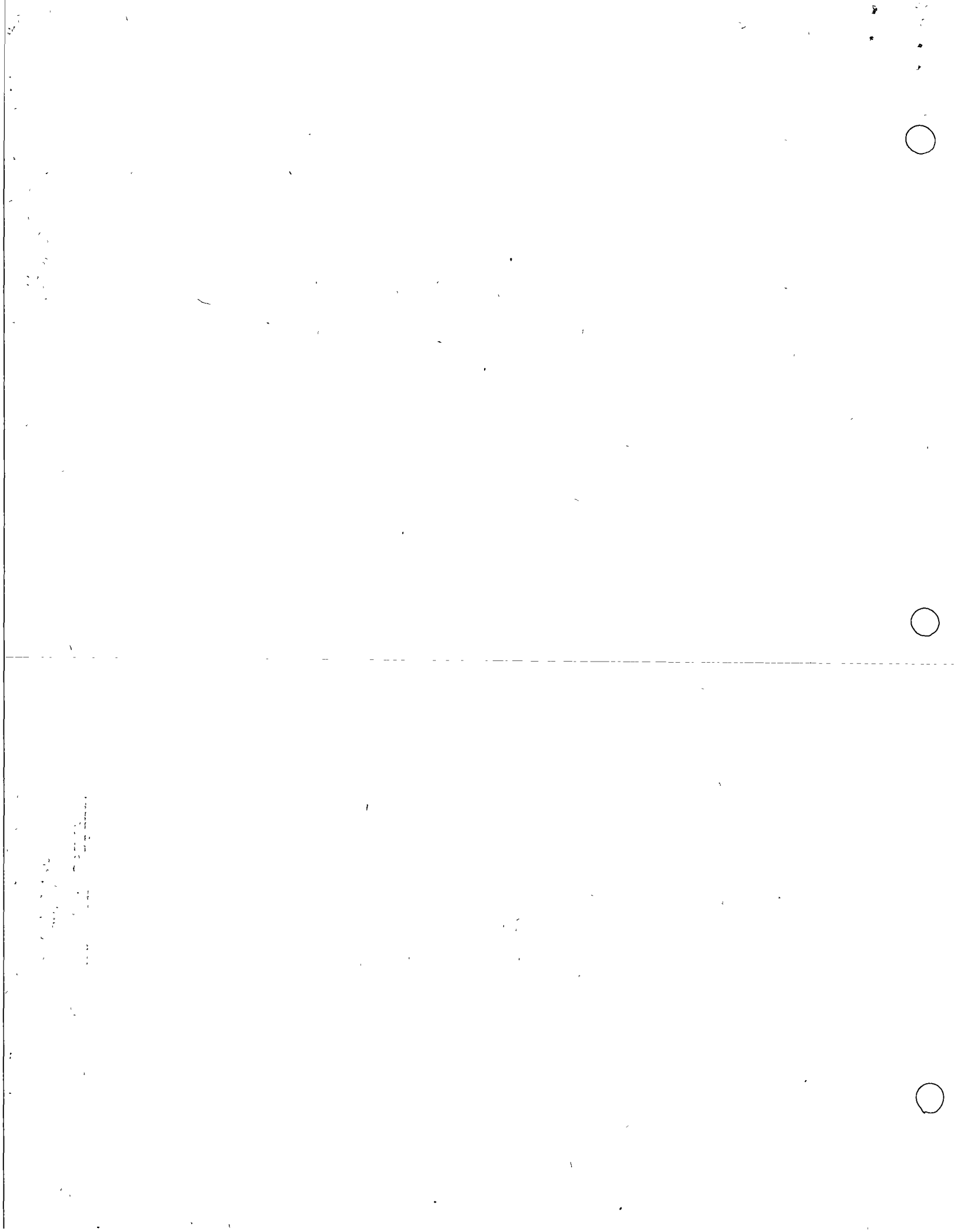
Line (13) is the total of lines (11) and (12) and represents the total pressure loss for 1000 feet of drill stem.

LINES 12 & 13  
PRESSURE LOSS  
AROUND DRILL STEM

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

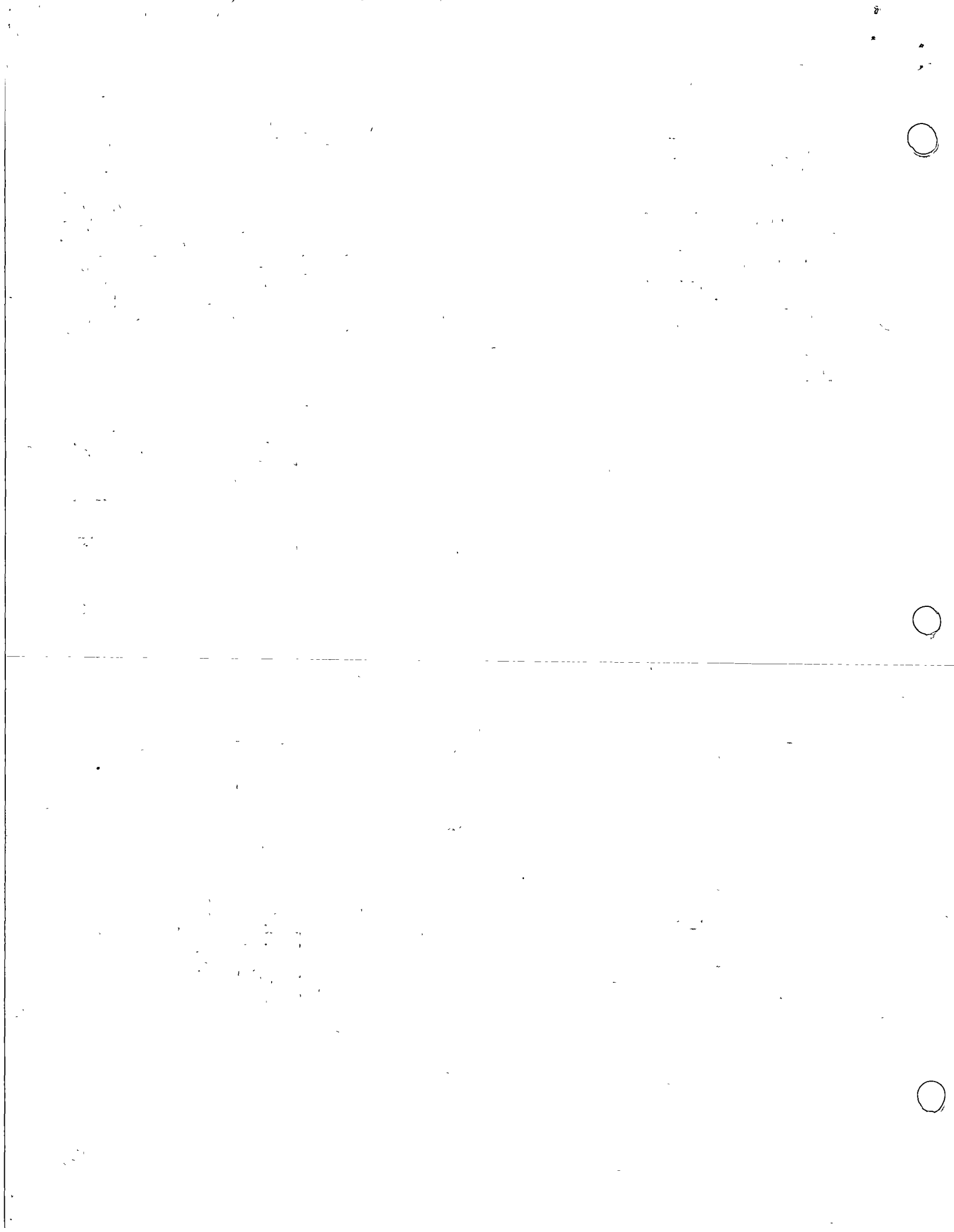
LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINES 16, 17, & 18



## PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

HOLE SIZE.....	4 3/4"			6 5/8"				
	2 7/8"			2 3/8"			3 1/2"	
PIPE SIZE.....	SH	XH	IF	SH	XH	IF	SH	FH, XH, IF
TYPE TOOL JOINT.....								
TOOL JOINT O.D.....	3 1/2" - 3 3/4"	3 7/8" - 4"	4 1/8"	3 1/2" - 3 3/4"	3 7/8" - 4"	4 1/8"	4"	4 5/8" - 4 3/4"
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM							
50.....	6	8	11	..	..	..	3	..
60.....	9	12	16	..	..	..	4	6
70.....	13	16	21	3	3	3	6	8
80.....	16	20	28	4	4	4	7	10
90.....	21	26	35	5	5	5	9	13
100.....	26	32	44	6	6	7	11	15
110.....	31	39	53	7	8	8	14	20
120.....	37	46	63	9	9	10	16	23
130.....	43	51	74	10	11	11	19	27
140.....	50	63	86	12	13	13	22	32
150.....	58	72	98	14	14	15	25	38
160.....	66	82	112	16	16	17	29	41
170.....	74	92	126	18	19	20	33	47
180.....	83	101	142	20	21	22	36	52
190.....	93	115	158	22	23	24	41	58
200.....	103	123	175	24	26	27	45	65
210.....	113	141	193	27	28	30	50	71
220.....	124	155	212	29	31	33	54	78
230.....	136	169	231	32	34	36	60	85
240.....	..	..	..	35	37	39	65	93
250.....	..	..	..	38	40	42	70	101
260.....	..	..	..	41	43	46	76	109
270.....	..	..	..	44	47	49	82	118
280.....	..	..	..	48	50	53	88	127
290.....	..	..	..	51	54	57	95	135
300.....	..	..	..	55	58	61	101	146
310.....	..	..	..	58	62	65	108	155
320.....	..	..	..	62	66	69	115	166
330.....	..	..	..	65	70	74	..	..
340.....	..	..	..	70	74	78	..	..
350.....	..	..	..	74	79	83	..	..
360.....	..	..	..	79	83	88	..	..
370.....	..	..	..	83	88	93	..	..
380.....	..	..	..	83	93	98	..	..
390.....	..	..	..	..	..	..	..	..
400.....	..	..	..	..	..	..	..	..
410.....	..	..	..	..	..	..	..	..
420.....	..	..	..	..	..	..	..	..
430.....	..	..	..	..	..	..	..	..
440.....	..	..	..	..	..	..	..	..



# PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

HOLE SIZE.....	3 1/2"					6"			
	2 3/4"			3 1/2"		3 1/2"		4"	
	SH	XH	IF	SH	FH, XH, IF	SH	FH, XH, IF	SH	FH
PIPE SIZE.....	3 1/2" - 3 3/8"			4"		4"		4 1/2"	
TYPE TOOL JOINT.....	3 7/8" - 4"			4 1/4"		4"		4 1/2" - 5 1/4"	
TOOL JOINT O.D.....	PRESSURE LOSS - PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM								
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS - PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM								
50	..	..	..	2	..	2	..	..	..
60	..	..	..	3	3	2	..	4	7
70	..	..	..	4	5	3	4	6	9
80	3	3	3	5	6	4	5	7	12
90	4	4	4	6	8	5	6	9	15
100	4	5	5	8	10	6	8	11	18
110	5	6	6	9	12	8	9	14	22
120	6	7	7	11	14	9	11	16	26
130	7	8	8	13	16	11	13	19	31
140	9	9	9	15	19	12	14	22	36
150	10	10	11	17	22	14	17	26	41
160	11	12	12	19	25	16	20	29	47
170	13	13	14	22	28	18	22	33	53
180	11	15	15	25	31	20	25	37	59
190	16	16	17	27	35	23	28	41	66
200	17	18	19	30	38	25	31	45	73
210	19	20	21	33	42	28	34	50	80
220	21	22	23	37	46	31	37	55	88
230	23	24	25	40	51	33	41	60	97
240	25	26	27	44	56	36	44	65	105
250	27	29	30	47	60	39	48	71	114
260	29	31	32	51	65	43	52	77	123
270	32	33	35	55	70	46	56	83	133
280	34	36	37	59	75	49	60	89	143
290	37	38	40	64	81	53	65	95	153
300	39	41	43	68	86	57	69	102	164
310	42	44	46	73	92	61	74	109	175
320	45	47	49	78	98	65	79	116	187
330	47	50	52	82	105	69	83	124	199
340	50	53	55	88	111	..	89	..	..
350	53	56	58	93	118	..	94	..	..
360	57	59	62	98	124	..	100	..	..
370	60	62	65	..	..	..	105	..	..
380	63	66	69	..	..	..	111	..	..
390	66	69	72	..	..	..	117	..	..
400	70	73	76	..	..	..	..	..	..
410	73	77	80	..	..	..	..	..	..
420	77	80	84	..	..	..	..	..	..
430	81	83	88	..	..	..	..	..	..
440	..	..	..	..	..	..	..	..	..
450	..	..	..	..	..	..	..	..	..
460	..	..	..	..	..	..	..	..	..
470	..	..	..	..	..	..	..	..	..
480	..	..	..	..	..	..	..	..	..
490	..	..	..	..	..	..	..	..	..
500	..	..	..	..	..	..	..	..	..
510	..	..	..	..	..	..	..	..	..
520	..	..	..	..	..	..	..	..	..
530	..	..	..	..	..	..	..	..	..
540	..	..	..	..	..	..	..	..	..

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

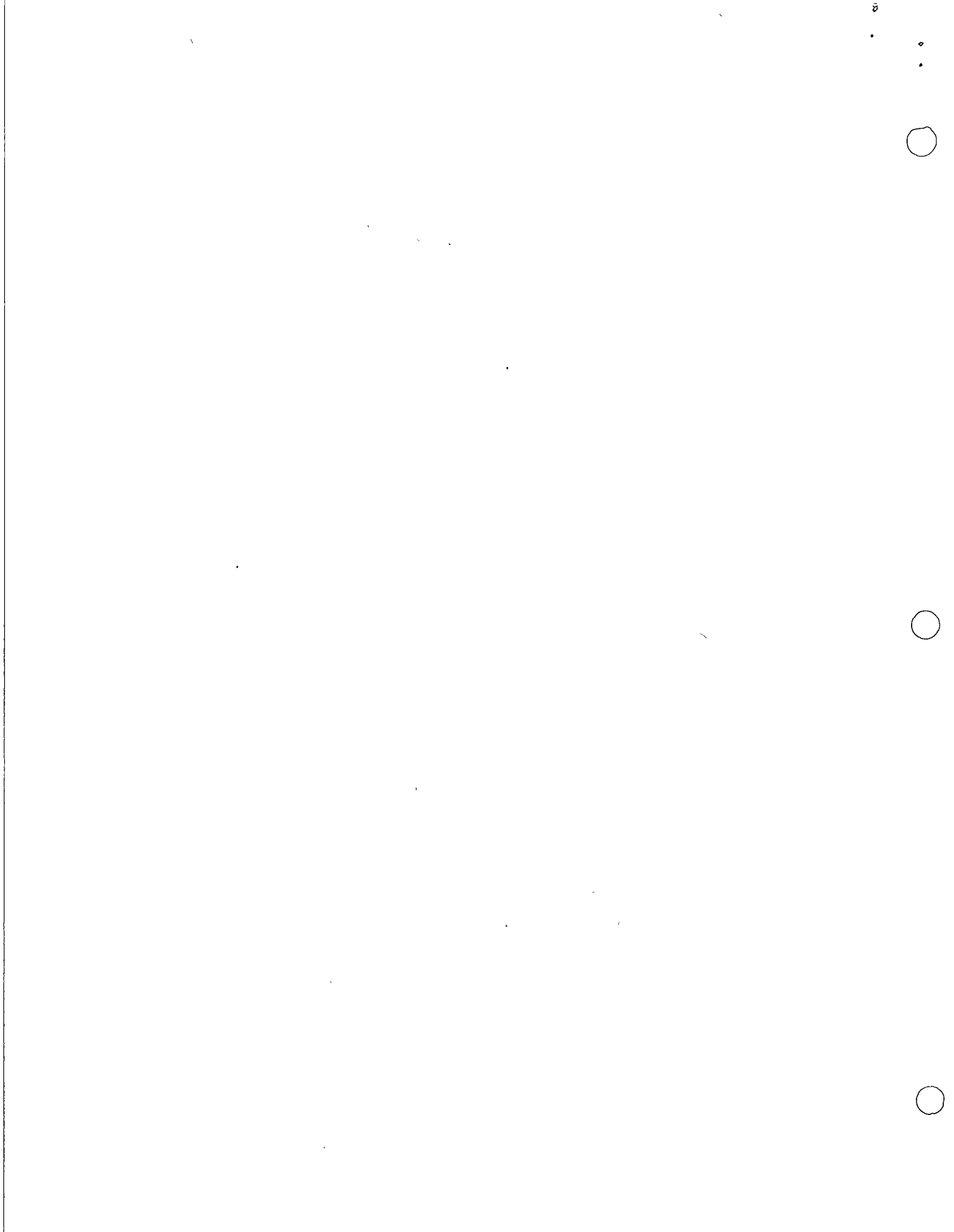
LINES 16, 17, & 18



The page contains extremely faint and illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the paper. The text is scattered across both pages and is not readable.

## PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

HOLE SIZE.....	6 1/2"				6 1/4"				6 3/8"			
	3 1/2"		4"		3 1/2"		4"		3 1/2"		4"	
PIPE SIZE.....	3 1/2"		4"		3 1/2"		4"		3 1/2"		4"	
TYPE TOOL JOINT.....	SH	FH, XH, IF	SH	FH	SH	FH, XM, IF	SH	FH	SH	FH, XH, IF	FH	IF
TOOL JOINT O.D.....	4"	4 1/4"-4 1/2"	4 1/2"	5 1/4"	4"	4 3/8"-4 3/4"	4 1/2"	5 1/4"	4"	4 3/8"-4 3/4"	5 1/4"	5 3/4"
GALLONS PER MINUTE.....	PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM											
50.....	1	..	..	..	1	..	..	..	1	..	..	..
60.....	2	..	3	5	2	..	..	..	1	..	..	..
70.....	3	3	6	6	2	..	4	5	1	..	..	..
80.....	3	4	6	8	3	3	5	6	2	..	3	4
90.....	4	5	7	11	4	4	6	8	2	..	3	5
100.....	5	6	9	13	4	5	8	10	2	3	4	6
110.....	6	8	11	16	5	6	9	12	3	3	5	7
120.....	6	9	13	19	6	7	11	15	4	4	6	9
130.....	9	11	15	22	6	9	13	17	4	4	7	10
140.....	10	12	18	26	9	10	15	20	5	5	8	12
150.....	12	14	21	30	10	12	17	23	5	6	10	14
160.....	14	16	24	34	11	13	19	26	6	7	11	16
170.....	15	18	27	38	13	15	22	29	7	8	12	18
180.....	17	20	30	43	15	17	24	33	8	9	14	20
190.....	19	23	33	48	16	19	27	36	9	10	16	22
200.....	21	25	37	53	18	21	30	40	10	11	17	25
210.....	23	28	41	58	20	23	33	44	11	12	19	27
220.....	25	30	44	64	22	25	36	49	12	13	21	30
230.....	25	32	47	70	22	27	39	55	13	14	23	33
240.....	30	38	53	76	26	30	43	61	14	15	25	36
250.....	33	39	57	83	28	32	47	68	15	17	27	39
260.....	35	42	62	90	30	35	51	76	16	18	29	42
270.....	39	46	67	97	33	38	55	84	18	19	31	45
280.....	41	49	72	104	35	41	59	93	19	21	34	48
290.....	45	53	77	111	38	44	63	102	21	22	36	52
300.....	48	56	83	119	40	47	68	111	22	24	39	55
310.....	51	60	88	127	43	50	72	121	23	25	41	59
320.....	54	64	94	136	46	53	77	131	25	27	44	63
330.....	53	68	100	144	49	56	82	141	27	29	47	67
340.....	61	72	106	153	52	60	87	151	28	31	50	71
350.....	65	77	113	162	55	63	92	162	30	32	53	75
360.....	69	81	119	172	58	67	97	173	32	34	55	80
370.....	72	86	126	182	61	71	103	184	33	36	59	84
380.....	75	91	133	191	65	75	109	196	35	38	62	89
390.....	80	95	140	202	68	79	..	..	37	40	65	94
400.....	85	100	147	212	72	83	..	..	39	42	69	99
410.....	89	105	154	223	75	87	..	..	41	45	72	103
420.....	93	111	..	..	79	91	..	..	43	47	75	108
430.....	96	116	..	..	83	96	..	..	45	49	79	114
440.....	102	121	..	..	87	100	..	..	47	51	83	119
450.....	..	..	..	..	..	..	..	..	49	54	86	124
460.....	..	..	..	..	..	..	..	..	52	56	90	130
470.....	..	..	..	..	..	..	..	..	54	59	94	138
480.....	..	..	..	..	..	..	..	..	56	61	98	141
490.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	64	..	..
500.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	67	..	..
510.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	69	..	..
520.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	72	..	..
530.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	75	..	..
540.....	..	..	..	..	..	..	..	..	..	78	..	..





## PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

HOLE SIZE.....	7 7/8"				8 3/4"			8 1/2"		
	3 1/2"	4"	4 1/2"		3 1/2"	4"	4 1/2"	3 1/2"	4"	4 1/2"
PIPE SIZE.....										
TYPE TOOL JOINT.....	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH	IF	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH, IF	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH, IF
TOOL JOINT O.D.....	4 3/8" to 4 1/2"	5 1/4" to 5 1/2"	5 3/4" to 6"	8 1/4"	4 3/8" to 4 1/2"	5 1/4" to 5 1/2"	5 3/4" to 6"	4 3/8" to 4 1/2"	5 1/4" to 5 1/2"	5 3/4" to 6"
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM									
120.....	..	..	2	3	..	..	..	..	..	..
130.....	..	2	3	3	..	..	..	..	..	..
140.....	2	2	3	4	..	..	2	..	..	..
150.....	2	3	4	4	..	2	2	..	..	2
160.....	2	3	4	5	..	2	3	..	2	2
170.....	2	3	5	5	2	2	3	1	2	3
180.....	3	4	5	6	2	2	3	2	2	3
190.....	3	4	6	7	2	3	4	2	2	3
200.....	3	5	7	8	2	3	4	2	3	4
210.....	4	5	7	8	2	3	4	2	3	4
220.....	4	6	8	9	3	4	5	2	3	4
230.....	4	6	9	10	3	4	5	3	3	4
240.....	5	7	10	11	3	4	6	3	4	5
250.....	5	8	10	12	3	5	6	3	4	5
260.....	6	8	11	13	4	5	7	3	5	6
270.....	6	9	12	14	4	5	7	4	5	7
280.....	7	9	13	15	4	6	8	4	5	7
290.....	7	10	14	16	5	6	9	4	6	8
300.....	8	11	15	17	5	7	9	5	6	8
310.....	8	11	16	18	5	7	10	5	6	9
320.....	9	12	17	19	6	8	10	5	7	9
330.....	9	13	18	21	6	8	11	6	7	10
340.....	10	13	19	22	6	9	12	6	8	10
350.....	10	15	21	23	7	9	12	6	8	11
360.....	11	15	22	25	7	10	13	7	9	12
370.....	11	16	23	26	8	10	14	7	9	12
380.....	12	17	24	27	8	11	15	7	10	13
390.....	13	18	26	29	8	11	15	8	10	14
400.....	13	19	27	30	9	12	16	8	11	14
410.....	14	20	28	32	9	12	17	8	11	15
420.....	16	21	30	33	10	13	18	9	12	15
430.....	15	22	31	35	10	14	19	9	12	17
440.....	16	23	33	37	11	14	20	10	13	17
450.....	17	24	34	38	11	15	21	10	13	18
460.....	18	25	36	40	12	16	21	11	14	19
470.....	19	26	37	42	12	16	22	11	15	20
480.....	19	27	39	44	13	17	23	12	15	21
490.....	20	29	40	45	13	18	24	12	16	21
500.....	21	30	42	47	14	19	25	12	16	22
510.....	22	31	43	49	14	19	26	13	17	23
520.....	22	32	45	51	15	20	28	13	18	24
530.....	23	33	47	53	15	21	29	14	18	25
540.....	24	35	48	55	16	22	30	14	19	26
550.....	25	36	50	57	17	23	31	15	20	27

LINE 14  
 PRESSURE DROP  
 ACROSS BIT NOZZLE  
  
 LINE 15  
 NOZZLE VELOCITY  
 LINES 16, 17, & 18

0  
.  
.  
.



## PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

HOLE SIZE.....	7 7/8"				8 3/8"			8 1/2"		
	3 1/2"	4"	4 1/2"		3 1/2"	4"	4 1/2"	3 1/2"	4"	4 1/2"
PIPE SIZE.....										
TYPE TOOL JOINT.....	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH	IF	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH, IF	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH, IF
TOOL JOINT O.D.....	4 3/8"-4 3/4"	5 1/8"-5 1/2"	5 3/4"-6"	6 1/4"	4 3/8"-4 3/4"	5 1/4"-5 3/4"	5 3/4"-6 1/4"	5 7/8"-4 3/4"	6 1/4"-6 3/4"	5 3/8"-6 1/4"
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM									
660.....	26	37	52	59	17	23	31	15	21	28
670.....	27	39	54	61	18	24	32	16	21	29
680.....	28	40	56	63	19	25	33	16	22	30
690.....	29	41	58	65	19	25	34	17	23	31
700.....	30	43	60	68	20	26	36	18	24	32
710.....	31	44	62	70	20	27	37	18	25	33
720.....	32	45	64	72	21	28	38	19	25	34
730.....	33	47	66	74	22	29	39	19	26	35
740.....	34	49	68	77	23	30	41	20	27	36
750.....	35	50	70	79	23	31	42	21	28	37
760.....	36	52	72	81	24	32	43	21	28	38
770.....	37	53	75	84	25	33	44	22	30	40
780.....	38	55	77	87	25	34	46	23	31	41
790.....	40	57	..	..	26	35	47	23	31	42
700.....	41	58	..	..	27	36	49	24	32	43
710.....	42	60	..	..	28	37	50	25	33	44
720.....	43	62	..	..	29	38	51	25	34	45
730.....	44	63	..	..	29	39	53	26	35	47
740.....	45	65	..	..	30	40	54	27	36	48
750.....	47	67	..	..	31	41	56	28	37	50
760.....	48	..	..	..	32	42	57	28	38	51
770.....	49	..	..	..	33	43	59	29	39	52
780.....	50	..	..	..	33	44	60	30	40	54
790.....	52	..	..	..	34	46	62	31	41	55
800.....	53	..	..	..	35	47	63	31	42	56
810.....	54	..	..	..	36	48	65	32	43	58
820.....	..	..	..	..	37	49	..	33	44	59
830.....	..	..	..	..	38	50	..	34	45	61
840.....	..	..	..	..	39	52	..	35	47	62
850.....	..	..	..	..	40	53	..	35	48	64
860.....	..	..	..	..	41	54	..	36	49	..
870.....	..	..	..	..	42	55	..	37	50	..
880.....	..	..	..	..	43	57	..	38	51	..
890.....	..	..	..	..	44	..	..	39	52	..
900.....	..	..	..	..	46	..	..	40	53	..
910.....	..	..	..	..	45	..	..	41	55	..
920.....	..	..	..	..	47	..	..	41	56	..
930.....	..	..	..	..	48	..	..	42	..	..
940.....	..	..	..	..	49	..	..	43	..	..
950.....	..	..	..	..	..	..	..	44	..	..
960.....	..	..	..	..	..	..	..	45	..	..
970.....	..	..	..	..	..	..	..	46	..	..
980.....	..	..	..	..	..	..	..	47	..	..



# PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

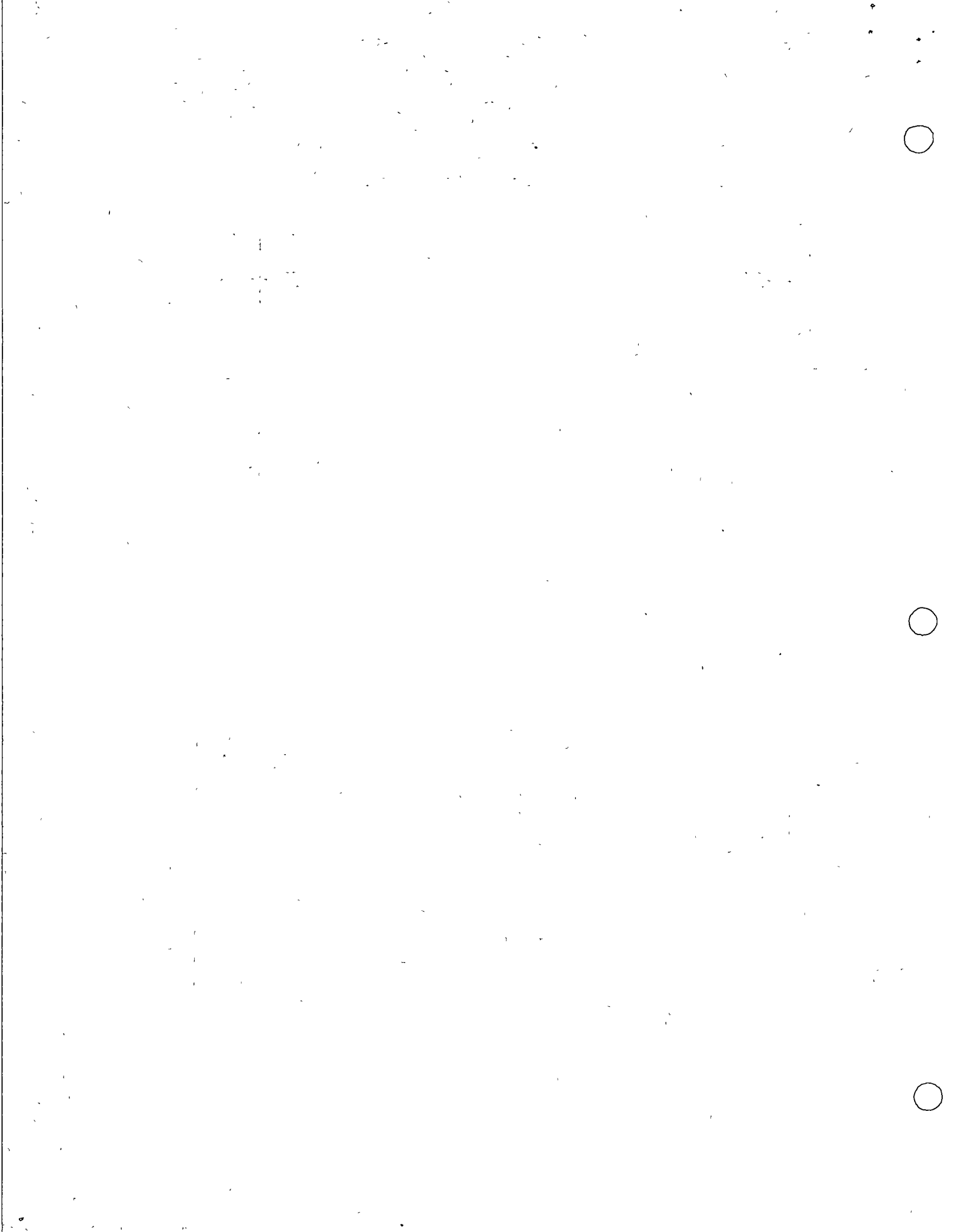
HOLE SIZE.....	8 5/8"				8 3/4"				9"		
	3 1/2"	4"	4 1/2"	5"	3 1/2"	4"	4 1/2"	5"	4"	4 1/2"	5"
PIPE SIZE.....											
TYPE TOOL JOINT.	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH, IF	XH	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XH, IF	XH	FH, IF	FH, XH, IF	XH
TOOL JOINT O.D....	4 1/4" to 4 3/4"	5 1/4" to 5 3/4"	5 1/4" to 6 1/4"	6 1/4"	4 3/4" to 5 1/4"	5 1/4" to 6 1/4"	5 1/4" to 6 1/4"	6 1/4"	5 1/4" to 6 3/4"	5 3/4" to 6 1/4"	6 1/4"
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS—PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM										
140.....	..	..	..	2	..	..	..	..	..	..	..
150.....	..	..	..	2	..	..	..	2	..	..	..
160.....	..	..	2	3	..	..	2	2	..	..	2
170.....	..	2	2	3	..	2	2	3	..	2	2
180.....	1	2	3	3	1	2	2	3	..	2	2
190.....	2	2	3	4	1	2	3	3	2	2	3
200.....	2	2	3	4	2	2	3	4	2	2	3
210.....	2	3	4	5	2	2	3	4	2	2	3
220.....	2	3	4	6	2	3	4	5	2	3	4
230.....	2	3	4	6	2	3	4	5	2	3	4
240.....	3	3	5	6	2	3	4	5	2	3	4
250.....	3	4	5	7	3	3	4	6	3	4	5
260.....	3	4	5	7	3	4	5	6	3	4	5
270.....	3	4	5	8	3	4	5	7	3	4	6
280.....	4	5	6	8	3	4	6	8	3	5	6
290.....	4	5	7	9	4	5	6	8	4	5	8
300.....	4	5	7	10	4	5	7	9	4	5	7
310.....	4	6	8	10	4	5	7	9	5	6	7
320.....	5	6	8	11	4	6	7	10	5	6	8
330.....	5	6	9	11	5	6	8	10	5	6	8
340.....	5	7	9	12	5	6	8	11	5	7	9
350.....	6	7	10	13	5	7	9	12	5	7	9
360.....	6	8	10	14	5	7	9	12	6	7	10
370.....	6	8	11	15	6	7	10	13	6	8	10
380.....	7	9	12	16	6	8	10	14	6	8	11
390.....	7	9	12	16	6	8	11	14	7	9	11
400.....	7	10	13	17	7	9	11	15	7	9	12
410.....	8	10	13	18	7	9	12	16	7	10	12
420.....	8	10	14	19	7	9	12	17	8	10	13
430.....	8	11	15	20	8	10	13	18	8	11	14
440.....	9	12	15	21	8	10	14	18	8	11	14
450.....	9	12	16	22	8	11	14	19	9	12	15
460.....	10	13	17	23	9	11	15	20	9	12	16
470.....	10	13	17	24	9	12	16	21	10	13	16
480.....	10	14	18	25	10	12	16	22	10	13	17
490.....	11	14	19	26	10	13	17	23	11	14	18
500.....	11	15	20	27	10	13	18	24	11	14	18
510.....	12	15	21	28	11	14	18	25	11	15	19
520.....	12	16	21	29	11	14	19	25	12	15	20
530.....	13	17	22	30	12	15	20	26	12	16	21
540.....	13	17	23	31	12	16	21	28	13	17	22
550.....	14	18	24	32	12	16	21	29	13	17	22
560.....	14	19	25	34	13	17	22	30	14	18	24
570.....	15	19	26	35	13	17	23	31	14	19	24
580.....	15	20	27	36	14	18	24	32	15	19	25
590.....	16	21	28	37	14	19	25	33	15	20	26
600.....	16	21	29	38	15	19	26	34	16	20	27

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

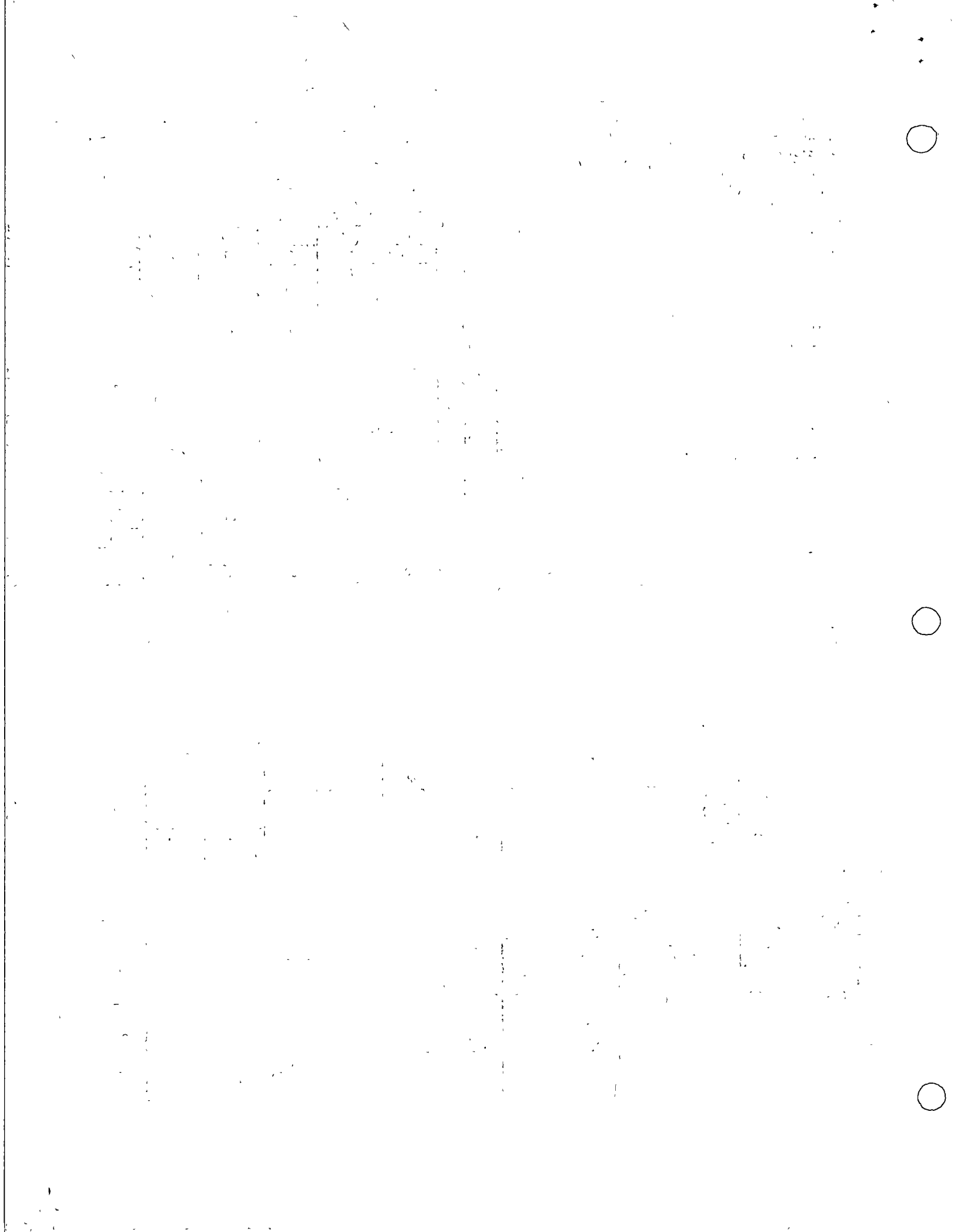
LINES 16, 17, & 18

A41



## PRESSURE LOSS AROUND DRILL STEM

HOLE SIZE.....	8 3/8"				8 1/2"				9"		
	3 1/2"	4"	4 1/2"	5"	3 1/2"	4"	4 1/2"	5"	4"	4 1/2"	5"
PIPE SIZE.....											
TYPE TOOL JOINT.	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XII, IF	XH	FH, XH, IF	FH, IF	FH, XII, IF	XH	FH, IF	FH, XH, IF	XH
TOOL JOINT O D.	4 3/8" - 4 3/4"	5 1/4" - 5 3/4"	5 3/8" - 6 1/4"	6 1/4"	4 5/8" - 4 3/4"	5 1/4" - 5 3/4"	5 3/8" - 6 1/4"	6 1/4"	5 1/4" - 6 3/4"	5 3/8" - 6 1/4"	6 1/4"
GALLONS PER MINUTE	PRESSURE LOSS--PSI PER 1000 FT. OF DRILL STEM										
610.....	17	22	30	39	15	19	27	35	16	21	23
620.....	17	22	31	41	16	20	28	36	17	22	23
630.....	18	23	32	42	16	21	29	37	17	22	29
640.....	18	24	33	43	17	21	30	38	18	23	29
650.....	19	25	34	45	17	22	31	40	19	24	31
660.....	20	26	35	46	18	23	32	41	19	24	32
670.....	20	26	36	48	18	23	33	42	20	25	33
680.....	21	27	37	49	19	24	34	43	20	26	34
690.....	21	28	38	50	20	25	35	45	21	27	35
700.....	22	28	39	52	20	25	36	46	22	27	36
710.....	23	29	40	53	21	26	37	47	22	28	37
720.....	23	30	41	55	21	27	38	49	23	29	38
730.....	24	31	43	56	22	28	39	50	23	30	39
740.....	25	32	44	58	22	28	40	51	24	31	41
750.....	25	33	45	60	23	29	41	53	25	32	42
760.....	26	34	46	61	24	30	42	54	25	32	43
770.....	27	34	47	63	24	31	43	56	26	33	44
780.....	27	35	49	64	25	32	44	57	27	34	45
790.....	28	36	50	66	26	32	45	59	27	35	46
800.....	29	37	51	68	26	33	47	60	28	36	47
810.....	30	38	52	70	27	34	48	62	29	37	49
820.....	30	39	54	..	28	35	49	63	30	38	60
830.....	31	40	55	..	28	36	50	65	30	39	61
840.....	32	41	56	..	29	37	52	66	31	40	62
850.....	33	42	58	..	30	38	53	..	32	40	63
860.....	33	43	59	..	30	39	54	..	33	41	65
870.....	34	44	61	..	31	40	55	..	33	42	66
880.....	35	45	62	..	32	40	57	..	34	43	67
890.....	36	46	63	..	32	41	58	..	35	44	69
900.....	36	47	..	..	33	42	60	..	36	45	70
910.....	37	48	..	..	34	43	61	..	36	46	71
920.....	38	49	..	..	35	44	62	..	37	47	73
930.....	39	50	..	..	35	45	..	..	38	48	..
940.....	40	51	..	..	36	46	..	..	39	49	..
950.....	41	52	..	..	37	47	..	..	40	51	..
960.....	41	..	..	..	38	48	..	..	41	52	..
970.....	42	..	..	..	39	49	..	..	41	53	..
980.....	43	..	..	..	40	50	..	..	42	54	..
990.....	44	..	..	..	40	51	..	..	43	55	..
1000.....	45	..	..	..	41	..	..	..	44	..	..
1010.....	46	..	..	..	42	..	..	..	45	..	..
1020.....	47	..	..	..	43	..	..	..	46	..	..
1030.....	..	..	..	..	43	..	..	..	47	..	..
1040.....	..	..	..	..	44	..	..	..	48	..	..
1050.....	..	..	..	..	45	..	..	..	49	..	..
1060.....	..	..	..	..	..	..	..	..	49	..	..





## LINE (14) - NOZZLE COMBINATION

Since there is a definite relationship between drilling rate, pressure drop across the bit, and circulation rate, a good hydraulic program may be obtained by using as much of the available pump pressure at the bit as possible while maintaining the minimum annular velocity decided on in line (1).

The tables on the following sheets were prepared to enable the selection of proper nozzle combinations to utilize as much of the available pump pressure at the bit as possible for the circulation rate being used and the particular depth at which drilling is being done. Tables are provided for "Tri-Cone" and Two-Cone bits. Separate tables are provided for "Tri-Cone" bits using combinations of three nozzles with different inside diameters; "Tri-Cone" bits with two different nozzle sizes and one nozzle blank; and Two-Cone bits with two different nozzles.

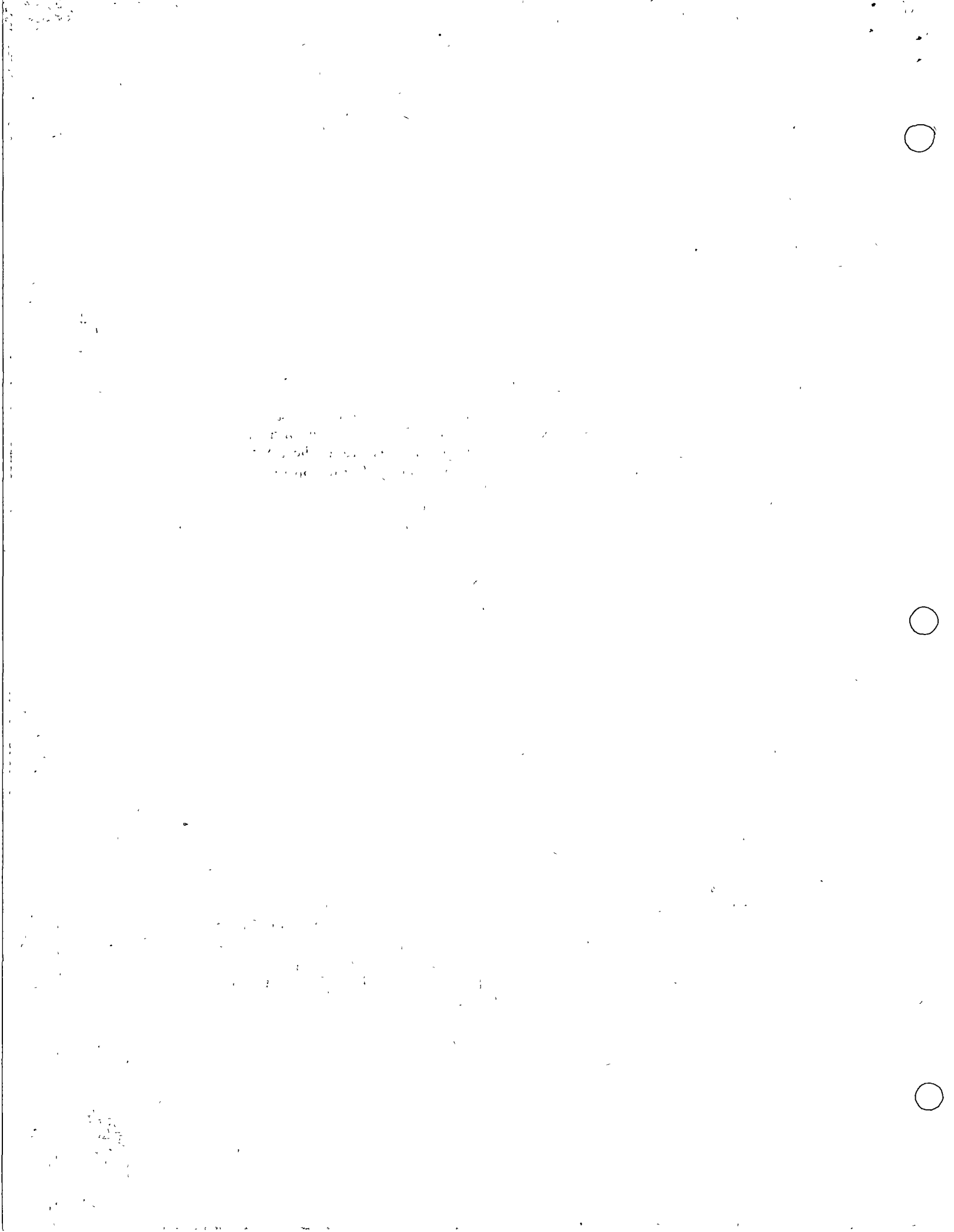
### EXAMPLE

As already determined, the circulation rate is to be 320 gallons per minute and the pressure remaining for bit and drill stem, Line (10), is 1791 psi. By referring to the table for "Tri-Cone" bits using combinations of three nozzles, select a nozzle combination that will give a pressure drop close to but not more than the 1791 psi of line (10). It is found that three  $\frac{5}{16}$ " nozzles will give a pressure drop at the bit of 1782 psi. Enter this nozzle combination and succeeding larger combinations in line (14a). Enter the corresponding pressure drop through nozzles in line (14b).

LINE 14  
PRESSURE DROP  
ACROSS BIT NOZZLE

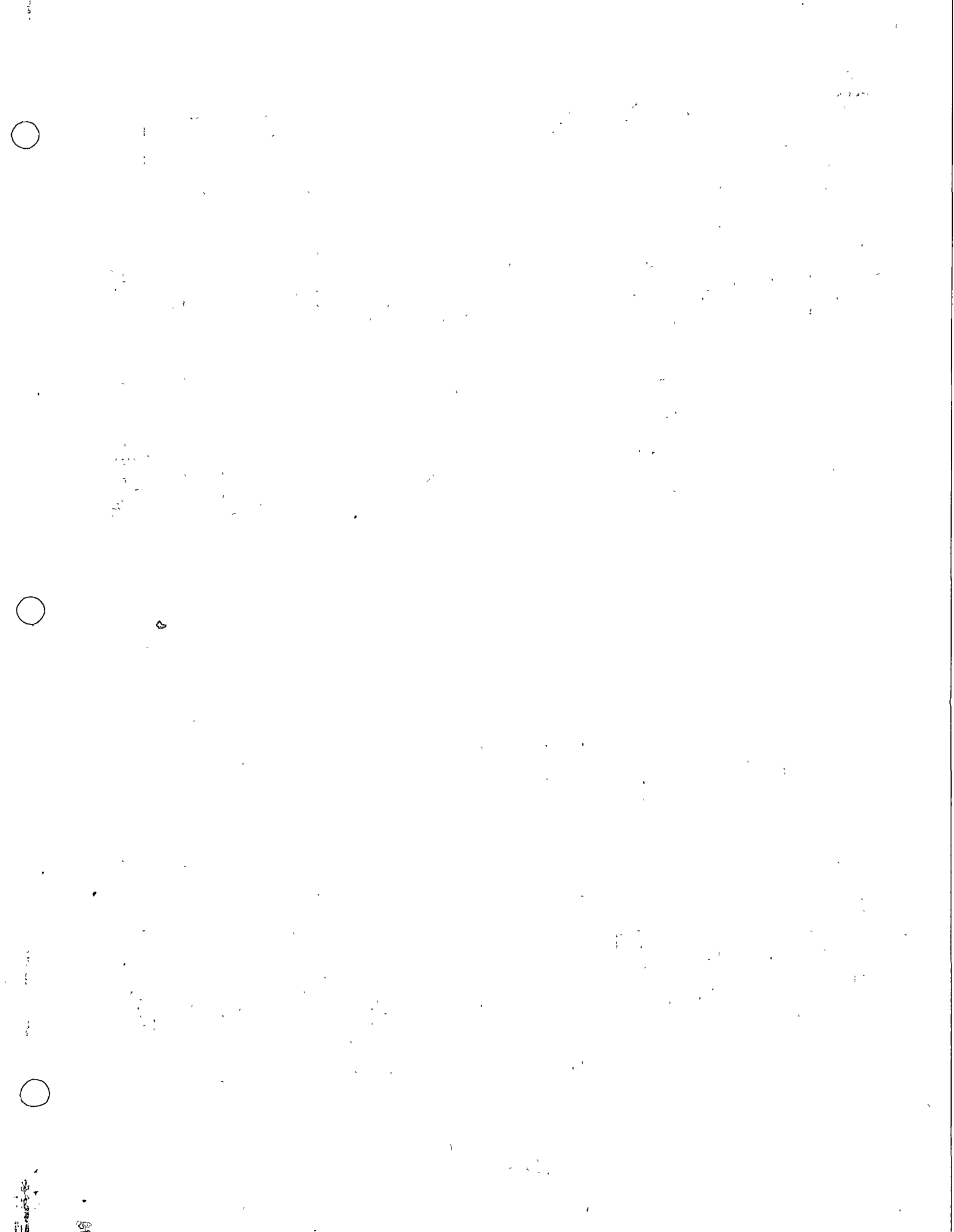
LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINES 16, 17, & 18



## PRESSURE DROP ACROSS BIT NOZZLE

Gal. Per Min.	TRI-CONE BITS														TWO-CONE BITS							
	1/4"	3/16"	1/8"	1/32"	5/64"	1/16"	7/64"	1/8"	1/16"	1/32"	5/64"	1/16"	3/4"	1"	1/2"	3/16"	5/32"	1/16"	3/4"	1 1/8"	1"	
100....	423	265	174	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
110....	514	321	210	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
120....	611	382	250	171	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
130....	717	448	294	201	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
140....	832	520	341	233	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
150....	955	597	392	267	189	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
160....	1087	679	445	304	215	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	84	...	...	...	...	...
170....	1227	766	503	343	242	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	96	...	...	...	...	...
180....	1375	859	563	385	272	197	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	108	...	...	...	...	...
190....	1572	957	628	429	303	220	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	194	121	...	...	...	...
200....	1698	1051	695	475	335	244	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	216	134	83	...	...	...
210....	1872	1160	766	524	370	269	200	...	...	...	...	...	...	...	...	...	239	149	98	...	...	...
220....	2054	1283	842	575	405	295	219	...	...	...	...	...	...	...	...	...	264	164	108	...	...	...
230....	2245	1405	920	629	443	321	240	...	...	...	...	...	...	...	...	...	289	180	118	...	...	...
240....	...	1527	1002	634	483	351	261	198	...	...	...	...	...	...	...	...	310	197	129	88	...	...
250....	...	1647	1074	743	524	381	283	215	...	...	...	...	...	...	...	...	344	215	141	96	...	...
260....	...	1792	1176	892	567	412	305	237	...	...	...	...	...	...	...	...	374	233	153	105	...	...
270....	...	1933	1268	865	611	457	330	250	109	...	...	...	...	...	...	...	401	252	151	113	...	...
280....	...	2079	1364	...	657	478	355	269	208	129	...	...	...	...	...	...	436	272	173	122	86	...
290....	...	2230	1463	939	705	513	381	289	223	149	92	...	...	...	...	...	459	292	192	131	92	...
300....	...	2386	1566	1070	754	540	408	309	239	149	98	...	...	...	...	...	503	314	206	141	99	...
310....	...	...	1672	1142	805	586	435	330	255	159	105	...	...	...	...	...	538	335	220	150	106	...
320....	...	...	1782	1217	853	625	464	352	272	169	112	...	...	...	...	...	575	358	235	161	113	...
330....	...	...	1895	1294	913	661	493	374	289	180	119	...	...	...	...	...	612	382	251	171	121	88
340....	...	...	2011	1374	969	705	524	397	307	191	126	...	...	...	...	...	651	406	266	182	128	93
350....	...	...	2132	1455	1027	747	555	421	325	203	134	91	...	...	...	...	691	431	283	193	135	99
360....	...	...	2253	1540	1086	791	587	445	344	213	141	96	...	...	...	...	775	483	317	217	153	111
370....	...	...	...	1627	1147	835	620	470	364	227	149	102	...	...	...	...	819	510	335	229	161	117
380....	...	...	...	1716	1219	881	634	496	383	239	157	107	...	...	...	...	864	538	353	241	170	124
390....	...	...	...	1807	1275	928	649	523	404	252	165	113	...	...	...	...	910	567	372	254	179	130
400....	...	...	...	1901	1331	976	725	550	425	265	174	119	...	...	...	...	957	597	391	267	189	137
410....	...	...	...	1998	1409	1025	752	578	446	279	183	125	88	...	...	...	1005	627	411	281	198	144
420....	...	...	...	2096	1482	1076	791	606	468	292	192	131	92	...	...	...	1055	658	432	295	203	151
430....	...	...	...	2197	1553	1128	820	635	491	306	201	137	97	...	...	...	1106	689	452	309	218	158
440....	...	...	...	...	1626	1181	877	665	513	321	210	144	101	...	...	...	1158	722	474	324	228	166
450....	...	...	...	...	1701	1235	917	698	538	338	220	150	106	...	...	...	1211	755	495	333	239	174
460....	...	...	...	...	1777	1291	958	727	562	351	230	157	111	...	...	...	1265	789	518	354	250	181
470....	...	...	...	...	1856	1347	1001	759	587	365	240	164	116	...	...	...	1321	824	540	369	261	189
480....	...	...	...	...	1935	1405	1044	792	612	382	250	171	121	...	...	...	1378	859	564	385	272	197
490....	...	...	...	...	2017	1465	1088	825	638	398	261	178	125	...	...	...	1430	895	587	401	283	205
500....	...	...	...	...	2100	1523	1133	859	664	414	272	186	131	...	...	...	1495	932	612	418	295	214
510....	...	...	...	...	2185	1585	1178	894	691	431	283	193	136	...	...	...	1555	970	636	433	307	223
520....	...	...	...	...	2271	1647	1225	929	718	448	294	201	142	...	...	...	1617	1008	661	452	319	232
530....	...	...	...	...	...	1711	1273	965	745	465	305	209	147	...	...	...	1680	1047	687	469	331	241
540....	...	...	...	...	...	1777	1331	1002	774	483	317	217	153	...	...	...	1744	1087	713	487	344	250
550....	...	...	...	...	...	1843	1390	1039	803	501	329	225	159	...	...	...	1810	1128	740	505	357	259
560....	...	...	...	...	...	1911	1451	1078	833	520	341	233	164	...	...	...	1875	1169	767	524	370	269



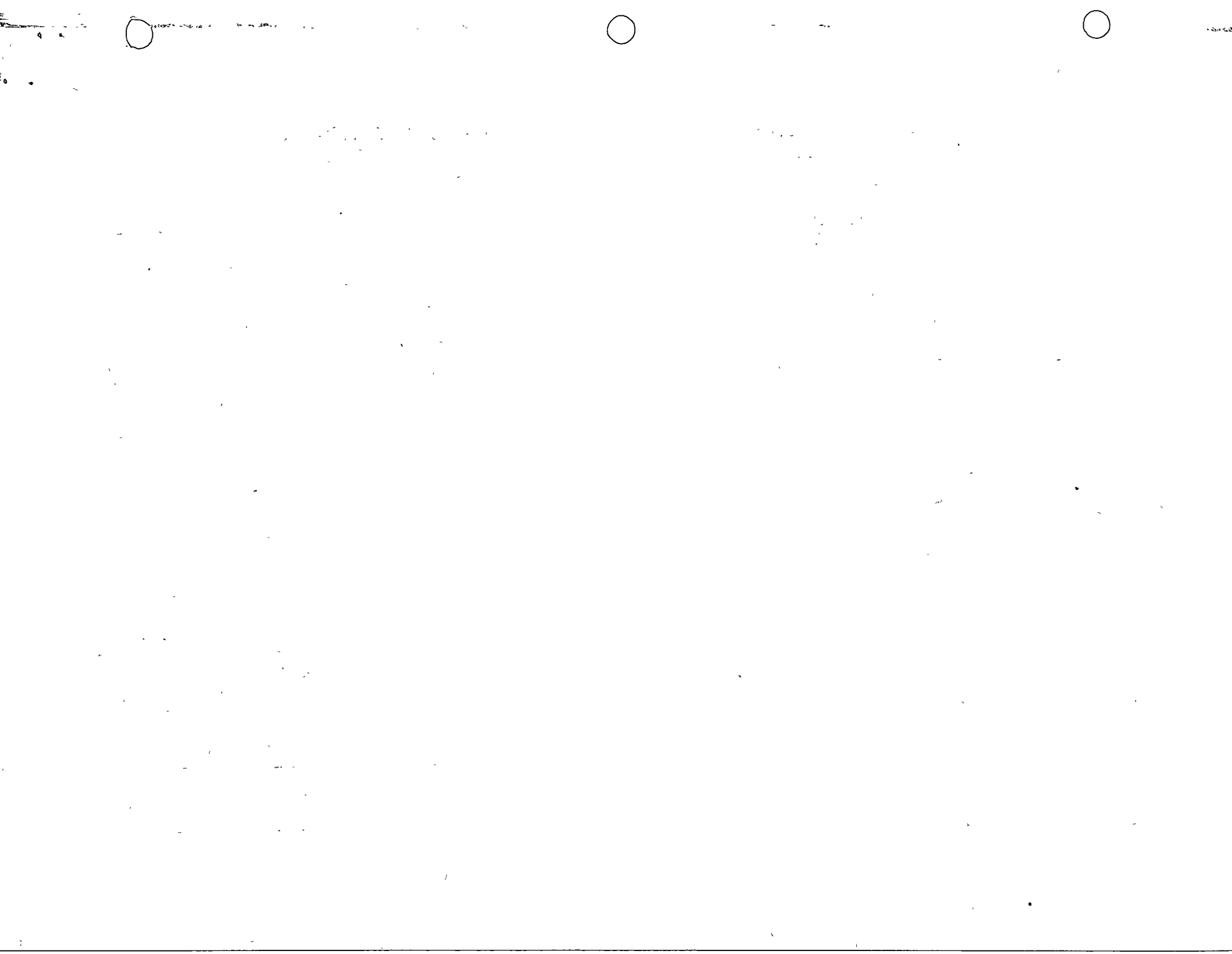
# PRESSURE DROP ACROSS BIT NOZZLE FOR "TRICONE" BITS USING COMBINATIONS OF THREE NOZZLES WITH DIFFERENT INSIDE DIAMETER

GPM	PRESSURE DROP (PSI) USING NOZZLE COMBINATIONS SHOWN																									
	3 1/4"	2 1/4" and 1 1/2"	1 1/4" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"	3 1/2"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/2"		
180	1375	1161	993	859	738	642	563	492	434	385	341	303	272	243	218	197	178	161	147							
190	1532	1294	1106	957	823	716	628	548	483	429	379	333	303	271	243	220	193	180	161	151						
200	1693	1434	1226	1061	912	795	695	602	525	475	420	374	335	300	270	244	220	199	181	165	150					
220	1972	1580	1351	1165	1005	875	753	670	590	524	463	412	370	331	297	266	242	219	200	181	155	151				
230	2094	1735	1483	1283	1104	960	832	735	648	575	509	453	403	363	329	296	271	241	219	199	162	152				
240	2147	1895	1621	1403	1206	1049	900	804	708	629	556	493	443	397	357	323	290	263	240	215	192	182	155			
250	2217	2065	1755	1527	1313	1142	1000	875	771	684	605	533	483	432	385	351	316	287	261	237	211	193	165	153		
255	2277	2115	1815	1587	1425	1259	1100	949	830	743	657	583	524	473	421	381	343	311	283	257	234	215	180	140		
260		2177	2071	1792	1511	1341	1173	1027	905	803	710	634	567	507	456	412	371	330	306	278	254	232	212	195	179	151
270		2237	2131	1852	1571	1401	1233	1087	965	863	770	694	627	567	516	472	431	390	363	330	303	273	250	210	194	163
280		2302	2196	1913	1631	1461	1293	1147	1025	923	830	754	687	627	576	532	491	450	423	390	358	322	299	256	208	176
290		2367	2261	1975	1691	1521	1353	1207	1085	983	890	814	747	687	636	592	551	510	483	450	418	381	343	299	242	223
300		2432	2326	2035	1751	1581	1413	1267	1145	1043	950	874	807	747	696	652	611	570	543	510	473	435	397	353	292	235
310			2500	2199	1811	1601	1433	1287	1165	1063	970	894	827	767	716	672	631	590	563	530	493	455	417	379	322	265
320			2565	2269	1875	1661	1493	1347	1225	1123	1030	954	887	827	776	732	691	650	623	590	553	515	477	439	382	325
330			2630	2334	1939	1731	1573	1427	1305	1203	1110	1034	967	907	856	812	771	730	693	656	619	581	543	505	448	391
340			2695	2403	2007	1801	1633	1487	1365	1263	1170	1094	1027	967	916	872	831	790	753	716	679	641	603	565	527	470
350			2760	2472	2075	1871	1703	1557	1435	1333	1240	1164	1097	1037	986	942	901	860	823	786	749	711	673	635	597	540
360				2547	2101	1881	1673	1527	1405	1303	1210	1134	1067	1007	956	912	871	830	793	756	719	681	643	605	567	510
370					2161	1951	1743	1597	1475	1373	1280	1204	1137	1077	1026	982	941	900	863	826	789	751	713	675	637	580
380					2226	2017	1809	1663	1541	1439	1346	1270	1203	1143	1092	1048	1007	970	933	896	859	821	783	745	707	650
390					2291	2083	1875	1729	1607	1495	1402	1326	1259	1199	1148	1104	1063	1026	989	952	915	877	839	801	763	706
400					2356	2148	1940	1793	1671	1559	1466	1390	1323	1263	1212	1168	1127	1090	1053	1016	979	941	903	865	827	770
410						2421	2213	2005	1883	1771	1678	1602	1535	1475	1424	1380	1339	1302	1265	1228	1191	1153	1115	1077	1039	982
420						2486	2278	2070	1948	1836	1743	1667	1600	1540	1489	1445	1404	1367	1330	1293	1256	1218	1180	1142	1104	1047
430						2551	2343	2135	2013	1901	1808	1732	1665	1605	1554	1510	1469	1432	1395	1358	1321	1283	1245	1207	1169	1112
440						2616	2408	2200	2078	1966	1873	1807	1740	1680	1629	1585	1544	1507	1470	1433	1396	1359	1321	1283	1245	1188
450						2681	2473	2265	2143	2031	1938	1872	1805	1745	1694	1650	1609	1572	1535	1498	1461	1424	1387	1349	1311	1254
460							2746	2538	2330	2218	2125	2059	1992	1932	1881	1837	1796	1759	1722	1685	1648	1611	1574	1537	1499	1442
470								2811	2603	2395	2283	2190	2124	2064	2013	1969	1928	1891	1854	1817	1780	1743	1706	1669	1632	1575
480								2876	2670	2462	2350	2257	2191	2131	2080	2036	1995	1958	1921	1884	1847	1810	1773	1736	1699	1642
490								2941	2737	2529	2417	2324	2258	2198	2147	2103	2062	2025	1988	1951	1914	1877	1840	1803	1766	1709
500								3006	2804	2596	2484	2391	2325	2265	2214	2170	2129	2092	2055	2018	1981	1944	1907	1870	1833	1776
510									3071	2871	2663	2551	2458	2392	2341	2297	2256	2219	2182	2145	2108	2071	2034	1997	1960	1903
520										3136	2938	2730	2618	2525	2459	2408	2364	2323	2286	2249	2212	2175	2138	2101	2064	2007
530										3201	3005	2797	2685	2592	2526	2475	2431	2390	2353	2316	2279	2242	2205	2168	2131	2074
540										3266	3072	2864	2752	2659	2593	2542	2498	2457	2420	2383	2346	2309	2272	2235	2198	2141
550										3331	3139	2931	2819	2726	2660	2609	2565	2524	2487	2450	2413	2376	2339	2302	2265	2208
560										3396	3206	3008	2896	2803	2737	2686	2642	2601	2564	2527	2490	2453	2416	2379	2342	2285
570										3461	3271	3073	2961	2868	2802	2751	2707	2666	2629	2592	2555	2518	2481	2444	2407	2350
580										3526	3336	3138	3026	2933	2867	2816	2772	2731	2694	2657	2620	2583	2546	2509	2472	2415
590										3591	3401	3203	3091	3008	2942	2891	2847	2806	2769	2732	2695	2658	2621	2584	2547	2490
600										3656	3466	3268	3156	3073	3007	2956	2912	2871	2834	2797	2760	2723	2686	2649	2612	2555
610										3721	3531	3333	3221	3138	3072	3021	2977	2936	2899	2862	2825	2788	2751	2714	2677	2620
620										3786	3596	3398	3286	3203	3137	3086	3042	3001	2964	2927	2890	2853	2816	2779	2742	2685
630										3851	3661	3463	3351	3268	3202	3151	3107	3066	3029	2992	2955	2918	2881	2844	2807	2750
640										3916	3726	3528	3416	3333	3267	3216	3172	3131	3094	3057	3020	2983	2946	2909	2872	2815
650										3981	3791	3593	3481	3398	3332	3281	3237	3196	3159	3122	3085	3048	3011	2974	2937	2880



**PRESSURE DROP ACROSS BIT NOZZLE FOR TWO CONE BITS & "TRICONE" BITS WITH ONE BLANK NOZZLE**

GPM	COMBINATIONS OF NOZZLES																					
	2 1/4"	1 1/4" and 1 1/2"	2 3/32"	1 9/32" and 1 5/16"	2 5/16"	1 1/8" and 1 11/32"	2 11/32"	1 11/32" and 1 3/8"	2 3/8"	1 3/8" and 1 13/32"	2 13/32"	1 13/32" and 1 7/8"	2 7/8"	1 7/8" and 1 15/32"	2 15/32"	1 15/32" and 1 1/2"	2 1/2"	1 1/2" and 1 17/32"	2 17/32"	1 17/32" and 1 9/16"	2 9/16"	
150	2154	1631	1342	1079	883	722	604	502	424	360	303	263	231	200								
160	2445	1906	1539	1227	1005	822	686	572	485	403	353	302	260	228	197							
170	2765	2154	1728	1384	1135	928	773	647	545	454	397	339	295	254	225	195						
180		2417	1940	1552	1267	1041	866	722	614	519	444	382	332	285	251	219	195					
190		2636	2154	1728	1413	1161	969	805	681	577	493	424	362	318	279	245	216	189				
200			2383	1915	1567	1287	1072	894	758	642	550	472	403	353	308	270	239	211	187			
210			2637	2110	1723	1413	1181	987	833	706	601	519	452	390	343	296	253	234	208	184		
220				2316	1898	1552	1294	1079	917	773	667	572	493	422	375	329	289	254	228	203		182
230				2531	2076	1697	1420	1181	999	849	727	624	541	468	409	360	315	279	248	222		197
240					2251	1849	1544	1287	1091	923	789	676	586	510	444	390	346	305	270	259		216
250					2455	2007	1674	1399	1181	999	860	737	637	554	485	424	375	329	292	250		234
260					2047	2172	1808	1507	1280	1035	829	705	601	523	460	405	357	313	282	251		251
270						2343	1948	1627	1377	1152	909	782	672	583	503	436	386	343	306	273		273
280						2521	2102	1752	1485	1253	1079	923	800	691	609	532	468	413	368	329		292
290						2696	2252	1882	1569	1349	1155	983	860	742	652	572	502	444	394	350		315
300							2408	2007	1702	1441	1233	1000	861	755	656	561	484	424	375	325		336
310								2509	1816	1537	1222	1109	961	849	742	652	577	506	452	401		360
320								2745	2288	1643	1406	1207	1048	905	795	696	614	541	481	428		382
330									2436	2058	1744	1492	1290	1110	963	844	752	652	570	456		405
340									2190	1949	1689	1453	1181	1023	894	784	691	609	541	491		432
350									2316	1905	1681	1441	1253	1085	946	833	732	647	577	510		459
360									2455	2076	1776	1529	1322	1148	1005	877	773	686	609	541		455
370									2538	2183	1882	1610	1399	1213	1060	923	822	722	642	572		510
380										2316	1982	1657	1478	1280	1116	981	866	763	676	604		541
390										2406	2004	1782	1582	1342	1181	1023	911	805	711	633		553
400										2559	2159	1882	1635	1413	1240	1055	957	844	752	667		600
410											2307	1982	1713	1485	1301	1142	1005	888	789	701		626
420											2427	2076	1800	1559	1363	1194	1054	934	827	737		657
430											2540	2181	1890	1635	1434	1253	1104	975	866	773		691
440												2279	1973	1713	1500	1315	1161	1023	911	805		722
450												2360	2067	1792	1587	1370	1213	1056	952	844		755
460												2493	2163	1873	1635	1434	1267	1116	993	883		789
470												2598	2252	1956	1713	1500	1322	1168	1035	923		827
480													2352	2041	1784	1559	1377	1213	1079	963		860
490													2435	2128	1857	1627	1434	1267	1129	999		894
500													2560	2216	1931	1697	1500	1322	1174	1041		934
510														2298	2016	1760	1559	1370	1220	1085		969
520														2389	2093	1820	1620	1427	1267	1129		1011
530														2463	2172	1906	1681	1485	1315	1174		1048
540															2261	1973	1744	1537	1370	1220		1091
550															2343	2050	1808	1597	1420	1260		1129
560															2427	2128	1873	1658	1470	1309		1174
570															2512	2199	1918	1713	1522	1356		1213
580																2279	2016	1776	1582	1406		1253
590																2352	2084	1841	1635	1456		1301
600																2426	2154	1898	1689	1500		1342
610																2521	2225	1965	1744	1552		1391
620																	2298	2033	1800	1604		1434
630																	2371	2093	1865	1658		1485
640																	2455	2163	1923	1713		1529
650																	2531	2234	1982	1760		1582





## LINE (15) - NOZZLE VELOCITY

The bit hydraulics required to give satisfactory performance depends on the size of the hole, formation being drilled, type and weight of mud, weight on bit, and speed of rotation.

As high a jet velocity as possible should be used while maintaining the minimum annular velocity decided on in line (1).

The tables on the following sheets are provided to determine the nozzle velocity for "Tri-Cone" and Two-Cone bits when the circulation rate and nozzle size is known. Separate tables are provided for "Tri-Cone" bits using nozzle combinations; "Tri-Cone" bits with two different nozzle sizes and one nozzle blank; and Two-Cone bits with two different nozzles.

### EXAMPLE

As already determined, the circulation rate is to be 320 gallons per minute and the permissible nozzle sizes are shown in line (14a). Referring to the table for "Tri-Cone" bits using combinations of three nozzles and reading out the 320 GPM line, it is found that three  $\frac{5}{16}$ " nozzles will give a jet velocity of 445 feet per second. Enter the jet velocities for each combination of nozzles in line (15).

LINE 15  
NOZZLE VELOCITY

LINES 16, 17, & 18



# NOZZLE SIZES FOR "TRI-CONE" AND TWO-CONE BITS

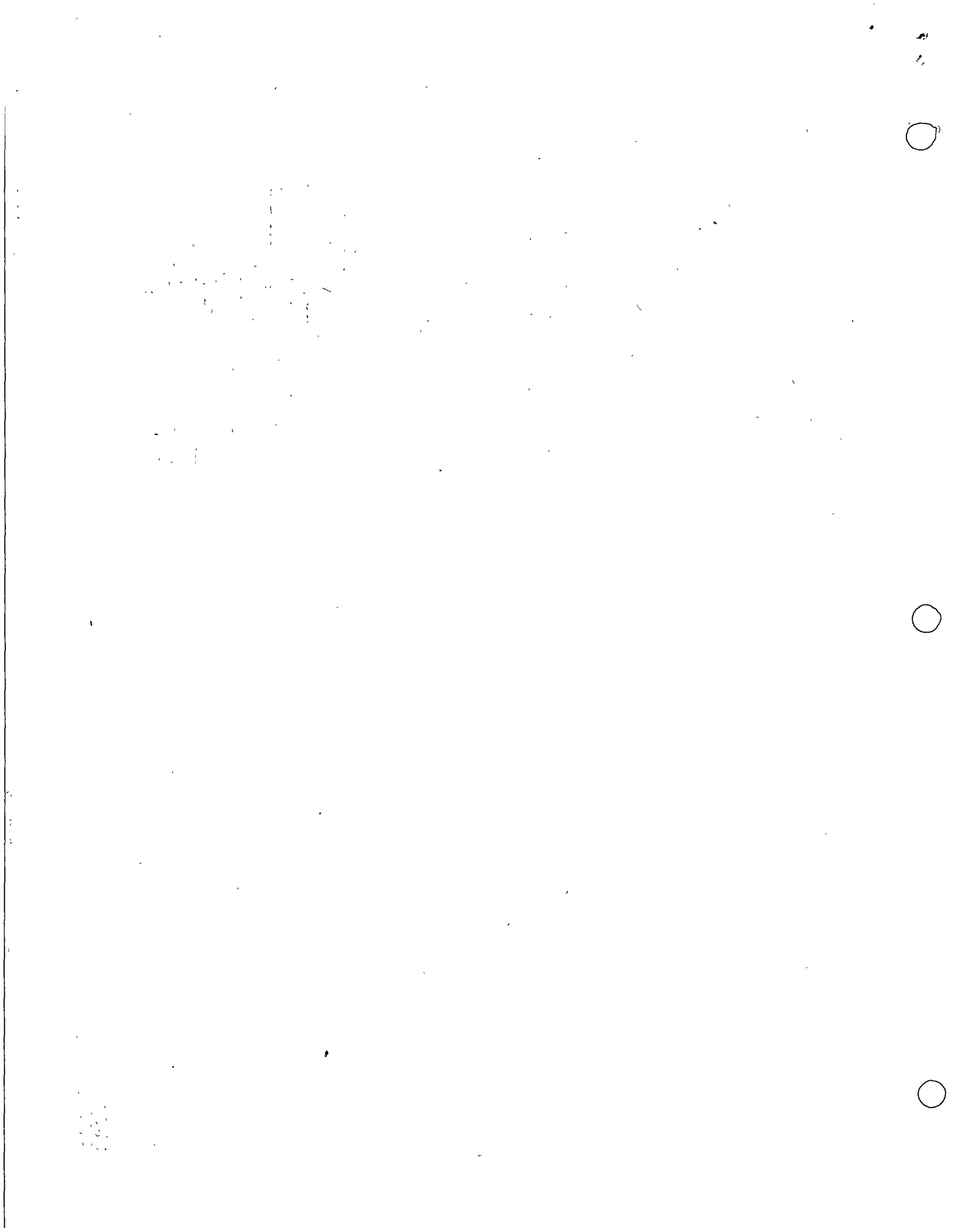
Gal. Per Min.	JET VELOCITY USING NOZZLE SIZE SHOWN																				
	TRI-CONE BITS													TWO-CONE BITS							
	3/4"	7/8"	1 1/16"	1 1/8"	1 1/4"	1 3/8"	1 1/2"	1 5/8"	1 3/4"	1 7/8"	2"	2 1/8"	2 1/4"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"	
100	218	172	130	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
110	230	180	153	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
120	281	205	167	148	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
130	283	223	191	150	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
140	305	210	195	161	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
150	320	258	209	173	145	...	...	...	...	...	...	...	...	97	...	...	...	...	...	...	
160	348	275	225	184	159	...	...	...	...	...	...	...	...	103	...	...	...	...	...	...	
170	370	292	237	198	164	...	...	...	...	...	...	...	...	109	...	...	...	...	...	...	
180	392	309	250	207	174	148	...	...	...	...	...	...	...	147	116	...	...	...	...	...	
190	413	326	264	219	187	156	...	...	...	...	...	...	...	155	122	99	...	...	...	...	
200	428	343	274	230	193	165	...	...	...	...	...	...	...	163	129	104	...	...	...	...	
210	457	361	292	242	203	173	149	...	...	...	...	...	...	171	135	109	...	...	...	...	
220	470	378	305	253	212	181	158	...	...	...	...	...	...	179	142	115	...	...	...	...	
230	500	395	320	265	222	189	163	...	...	...	...	...	...	187	148	120	99	...	...	...	
240	522	412	334	276	232	197	170	148	...	...	...	...	...	195	155	125	104	...	...	...	
250	544	429	348	287	241	205	177	155	...	...	...	...	...	204	161	130	103	...	...	...	
255	550	435	352	289	241	211	181	161	...	...	...	...	...	212	167	136	112	...	...	...	
270	567	455	375	311	255	222	191	167	117	115	...	...	...	220	174	141	115	93	...	...	
280	609	481	390	322	270	240	199	174	152	120	...	...	...	228	180	146	121	101	...	...	
290	631	498	403	334	280	239	206	179	158	124	101	...	...	235	187	151	125	105	...	...	
300	...	515	417	345	290	247	213	185	163	129	101	...	...	244	193	156	129	109	...	...	
310	...	532	431	357	299	255	220	192	168	133	103	...	...	252	200	162	134	112	...	...	
320	...	549	445	368	309	263	227	193	174	137	111	...	...	261	206	167	138	116	99	...	
330	...	567	459	380	313	271	234	201	179	142	115	...	...	269	212	172	142	119	132	...	
340	...	584	473	391	323	280	241	210	185	146	118	...	...	277	219	177	147	123	105	...	
350	...	601	487	403	338	288	248	218	190	150	121	101	...	285	225	183	151	127	108	...	
360	...	...	501	414	347	296	255	223	196	155	125	103	...	293	232	188	155	130	111	...	
370	...	...	515	426	357	304	263	229	201	159	127	105	...	301	238	193	159	134	114	...	
380	...	...	529	437	367	313	270	235	206	163	132	107	...	309	245	198	164	138	117	...	
390	...	...	543	449	376	321	277	241	212	167	136	112	...	318	251	203	168	141	120	...	
400	...	...	557	460	386	329	284	247	217	172	139	115	...	326	258	209	172	143	123	...	
410	...	...	...	472	390	337	291	253	223	176	143	118	99	...	334	264	214	177	149	127	...
420	...	...	...	483	406	346	298	260	228	180	146	121	101	...	342	270	219	181	152	130	...
430	...	...	...	495	416	354	305	266	234	185	150	124	104	...	350	277	224	185	156	133	...
440	...	...	...	507	425	362	312	272	239	190	153	126	106	...	358	283	229	190	159	136	...
450	...	...	...	513	428	370	319	278	245	193	156	129	109	...	366	290	235	194	163	139	...
460	...	...	...	520	435	373	326	281	250	197	160	132	111	...	375	296	240	198	167	142	...
470	...	...	...	524	434	387	334	291	255	202	163	135	114	...	383	303	245	203	170	143	...
483	...	...	...	533	464	395	341	297	261	208	167	137	116	...	391	309	250	207	174	149	...
490	...	...	...	...	474	406	348	303	266	210	170	141	118	...	399	316	256	211	177	151	160
500	...	...	...	...	483	411	355	309	272	215	174	144	121	...	407	322	261	216	181	154	162
510	...	...	...	...	493	420	362	315	277	219	177	146	123	...	415	328	266	220	185	157	164
520	...	...	...	...	501	428	369	321	283	223	181	149	126	...	423	335	271	224	189	160	169
530	...	...	...	...	510	438	376	328	288	227	184	152	128	...	432	341	276	228	192	164	168
540	...	...	...	...	522	444	383	334	293	232	188	155	130	...	440	348	282	233	198	167	170
550	...	...	...	...	532	452	391	340	299	236	191	158	133	...	448	354	287	237	199	170	172
660	...	...	...	...	541	461	398	346	304	240	195	161	135	...	456	361	292	241	203	173	174

A48



# NOZZLE SIZES FOR "TRI-CONE" AND TWO-CONE BITS

GALLONS PER MINUTE	JET VELOCITY USING NOZZLE SIZE SHOWN																	
	TRI-CONE BITS										TWO-CONE BITS							
	5/16"	3/8"	1 3/32"	7/16"	10/32"	1/2"	9/16"	5/8"	1 1/16"	3/4"	1"	1/2"	9/16"	5/8"	1 1/16"	3/4"	1"	
570	...	551	469	404	352	310	245	198	164	138	...	464	367	297	246	206	176	118
580	...	...	477	412	353	315	249	202	167	140	...	472	374	302	250	210	179	119
590	...	...	485	419	365	321	253	205	170	142	...	480	380	303	254	214	182	120
600	...	...	494	428	371	326	258	209	172	145	...	489	386	313	259	217	185	122
610	...	...	502	433	377	331	262	212	175	147	...	497	393	318	263	221	188	124
620	...	...	510	440	383	337	266	216	178	150	...	505	399	323	267	225	191	126
630	...	...	518	447	389	342	270	219	181	152	...	513	406	329	272	228	194	128
640	...	...	526	454	396	348	275	223	184	155	...	521	412	334	276	232	198	130
650	...	...	535	461	402	353	279	226	187	157	...	529	419	339	280	235	201	132
660	...	...	543	468	409	358	283	229	189	159	...	537	425	344	284	239	204	134
670	...	...	551	475	414	364	288	233	192	162	...	546	431	349	289	243	207	136
680	...	...	...	482	420	369	292	236	195	164	...	554	438	355	293	246	210	138
690	...	...	...	490	426	375	296	240	198	167	...	...	444	360	297	250	213	141
700	...	...	...	497	433	380	300	243	201	169	...	...	451	365	302	254	216	143
710	...	...	...	504	439	386	305	247	204	171	...	...	457	371	306	257	219	145
720	...	...	...	511	445	391	309	250	207	174	...	...	464	376	310	261	222	147
730	...	...	...	518	451	396	313	254	210	176	...	...	470	381	315	264	225	149
740	...	...	...	525	457	402	318	257	212	179	101	...	476	387	319	268	228	151
750	...	...	...	532	464	407	322	261	215	181	102	...	483	392	323	272	231	153
760	...	...	...	539	470	413	326	265	218	184	103	...	489	397	328	275	235	155
770	...	...	...	546	476	418	330	269	221	186	105	...	496	401	332	279	238	157
780	...	...	...	553	482	424	335	271	224	188	106	...	502	407	336	283	241	159
790	...	...	...	...	488	429	339	275	227	191	107	...	509	412	340	286	244	161
800	...	...	...	...	494	435	343	278	230	193	109	...	515	417	345	290	247	163
810	...	...	...	...	501	440	348	282	232	196	110	...	522	422	349	293	250	165
820	...	...	...	...	507	...	352	285	235	198	111	...	529	427	353	297	253	167
830	...	...	...	...	513	451	356	289	238	200	113	...	534	433	358	301	256	169
840	...	...	...	...	519	456	360	292	241	203	114	...	541	438	362	304	259	171
850	...	...	...	...	525	462	365	296	244	205	115	...	547	443	366	308	262	173
860	...	...	...	...	532	467	369	299	247	208	117	...	554	448	371	311	265	175
870	...	...	...	...	538	473	373	302	250	210	118	...	...	453	375	315	268	177
880	...	...	...	...	544	478	378	305	253	213	120	...	...	459	379	319	272	179
890	...	...	...	...	550	484	382	309	255	215	121	...	...	464	384	322	275	181
900	...	...	...	...	556	489	386	313	258	217	122	...	...	469	388	326	278	183
910	...	...	...	...	...	494	390	316	261	220	124	...	...	474	392	330	281	185
920	...	...	...	...	...	500	395	320	264	222	125	...	...	479	397	333	284	187
930	...	...	...	...	...	505	399	324	267	225	126	...	...	485	401	337	287	189
940	...	...	...	...	...	511	403	327	270	227	128	...	...	490	405	340	290	191
950	...	...	...	...	...	516	408	331	273	229	129	...	...	495	410	344	294	194
960	...	...	...	...	...	522	412	334	276	232	130	...	...	500	414	348	297	196
970	...	...	...	...	...	527	416	338	278	234	132	...	...	506	418	351	300	198
980	...	...	...	...	...	532	420	341	281	237	133	...	...	511	423	355	303	200
990	...	...	...	...	...	538	425	345	284	239	134	...	...	516	427	358	306	202
1000	...	...	...	...	...	543	429	348	287	242	136	...	...	521	431	362	309	204
1010	...	...	...	...	...	549	433	351	290	244	137	...	...	525	436	366	312	206
1020	...	...	...	...	...	554	438	355	293	246	139	...	...	532	440	369	315	208
1030	...	...	...	...	...	...	442	358	298	249	140	...	...	537	444	373	318	210



## JET VELOCITIES FOR "TRI-CONE" BITS USING COMBINATIONS OF THREE NOZZLES WITH DIFFERENT INSIDE DIAMETER

JET VELOCITY (FT/SEC) USING NOZZLE COMBINATIONS SHOWN

GPM	1 1/8"			1 1/2"			1 3/4"			2"			2 1/4"			2 3/4"			3"			
	3 1/8"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/4" and 2 1/2"	3 3/4"	2 1/2" and 1 1/4"	1 1/2" and 2 1/8"	3 5/8"	2 1/2" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/8"	3 7/8"	2 1/2" and 1 1/4"	1 1/2" and 2 1/8"	3 1"	2 1/4" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/8"	3 1 1/8"	2 1/4" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/8"	3 1 1/4"	2 3/4" and 1 1/2"	1 1/2" and 2 1/8"	
150	226	299	277	258	239	223	209	195	183	173	162	153	145									
160	242	319	296	275	255	238	223	208	195	184	173	163	154	146								
170	257	339	314	292	271	252	237	221	207	196	184	173	164	155	147							
180	272	359	332	309	287	267	252	234	220	207	195	183	174	164	156	148						
190	287	379	351	326	303	282	267	247	232	219	205	194	183	174	165	157	148					
200	302	399	360	343	315	297	274	250	234	220	206	193	183	173	165	157	149					
210	317	419	383	361	334	312	292	273	256	242	227	214	203	192	182	173	164	156	149			
220	332	439	405	372	350	327	306	286	268	253	236	221	212	201	190	181	172	164	156	149		
230	347	459	425	395	366	342	320	299	281	265	249	233	222	210	199	190	181	171	163	155	149	
240	362	479	443	412	382	356	332	312	293	276	259	245	232	219	208	197	188	179	170	162	155	149
250	377	499	461	429	398	371	346	325	305	288	270	255	241	228	216	206	195	186	177	168	161	155
260	392	519	480	446	414	386	362	338	317	299	281	265	251	237	225	211	203	193	185	176	168	161
270	407	539	498	464	430	401	376	351	329	311	292	276	261	247	234	220	211	201	192	183	174	167
280	422	559	517	481	446	416	391	366	342	322	303	283	270	256	242	228	219	209	199	189	181	173
290	437	579	535	498	462	431	406	377	354	334	315	296	280	265	251	236	226	216	206	196	187	179
300	452	599	554	515	478	445	417	390	366	345	324	305	290	274	260	247	233	223	213	203	193	185
310	467	619	572	532	494	460	431	403	378	357	335	316	299	283	268	255	242	231	220	210	200	192
320	482	639	591	549	510	475	445	416	390	368	346	327	309	292	277	263	250	238	227	216	206	196
330	497	659	609	567	525	490	459	429	403	380	357	337	318	301	286	271	258	245	234	223	213	204
340	512	679	628	584	541	505	473	442	415	391	368	347	328	311	294	280	265	253	241	230	220	210
350	527	699	646	601	557	520	487	455	427	403	378	357	338	320	303	287	273	259	248	237	226	216
360	542	719	665	618	573	534	501	468	439	414	389	367	347	329	312	295	281	268	255	243	232	223
370	557	739	683	635	589	549	513	481	451	426	400	379	357	338	320	303	289	275	262	250	239	229
380	572	759	701	653	605	564	528	494	463	437	411	389	367	348	330	313	299	285	272	260	249	239
390	587	779	720	670	621	579	543	507	476	449	422	399	376	356	338	320	305	291	277	264	253	243
400	602	799	738	687	637	594	557	520	489	460	432	406	382	363	345	327	309	294	280	267	255	245
410	617	819	757	704	653	609	570	533	500	472	443	418	396	374	355	337	320	303	289	277	265	253
420	632	839	775	721	669	624	584	546	512	483	454	429	406	384	364	346	328	312	298	284	272	260
430	647	859	794	738	686	638	599	559	525	495	465	439	416	393	372	354	336	320	305	291	278	266
440	662	879	812	755	701	655	612	572	537	507	476	449	426	402	381	362	344	327	312	298	284	272
450	677	899	831	773	717	668	625	585	549	518	486	459	435	411	390	370	352	335	319	304	290	278
460	692	919	849	790	732	682	640	598	561	530	497	469	445	420	398	378	359	342	326	311	297	284
470	707	939	868	807	748	696	654	611	573	541	508	480	454	429	407	387	367	350	334	318	304	291
480	722	959	886	821	764	713	670	624	586	553	519	490	464	438	416	395	375	357	341	325	310	297
490	737	979	905	841	780	728	681	637	598	563	532	500	474	447	424	403	383	364	347	331	316	303
500	752	999	923	858	796	742	695	650	610	575	541	510	483	457	433	411	391	372	355	338	323	309
510	767	1018	941	875	812	757	709	663	622	585	551	520	493	466	442	420	399	379	362	345	329	315
520	782	1038	960	893	828	772	723	676	634	596	562	531	503	475	451	428	407	387	369	352	335	321
530	797	1058	978	910	844	787	737	689	647	609	573	541	512	484	459	436	414	394	376	358	342	328
540	812	1078	997	927	860	802	751	702	659	621	584	551	522	493	468	444	422	402	383	365	349	334
550	827	1098	1015	944	876	817	765	715	671	632	595	561	532	502	476	452	429	409	391	372	355	340
560	842	1118	1034	961	892	831	779	728	683	644	605	571	541	511	485	461	438	417	398	379	362	346
570	857	1138	1052	979	908	846	793	741	695	655	616	582	551	521	494	469	445	424	405	385	368	352
580	872	1158	1071	996	924	861	807	754	706	667	627	592	560	530	502	477	453	431	412	392	375	358
590	887	1178	1089	1012	939	876	821	767	720	678	638	602	570	539	511	486	461	439	419	399	381	365
600	902	1198	1108	1030	955	891	834	780	732	690	649	612	580	548	519	494	469	446	426	406	387	371
610	917	1218	1126	1047	971	908	848	793	744	701	659	622	588	557	528	502	477	454	433	413	394	377
620	932	1238	1145	1064	987	921	862	806	756	713	670	633	599	566	537	510	484	461	440	419	400	383
630	947	1258	1163	1082	1003	935	876	819	769	724	681	643	609	575	545	519	492	469	447	426	407	389
640	962	1278	1181	1099	1019	950	890	832	781	736	692	653	618	584	554	527	500	476	454	433	413	396
650	977	1297	1200	1116	1035	965	904	845	793	747	703	663	628	594	563	535	508	483	461	440	420	402

71

150





# JET VELOCITIES FOR TWO-CONE BITS & "TRI-CONE" BITS WITH ONE BLANK NOZZLE

GPM	COMBINATIONS OF NOZZLES																						
	2 1/4"	1 1/4" and 1 1/2"	2 3/32"	1 3/32" and 1 1/4"	2 5/16"	1 5/16" and 1 1/2"	2 1 1/2"	1 1 1/2" and 1 3/8"	2 3/8"	1 3/8" and 1 1/2"	2 1 3/32"	1 1 3/32" and 1 7/16"	2 7/16"	1 7/16" and 1 5/8"	2 1 5/32"	1 5/8" and 1 1/2"	2 1/2"	1 1/2" and 1 1/4"	2 1 1/32"	1 1 1/32" and 1 1/8"	2 9/16"		
150	469	432	386	346	313	283	239	236	217	200	185	171	160	149									
160	521	460	412	369	334	302	276	252	232	213	198	183	170	159	146								
170	554	489	438	392	355	321	295	268	246	227	210	194	181	163	158	147							
180		518	464	415	375	340	310	283	261	240	222	205	192	178	167	155	147						
190		547	489	438	396	359	328	299	275	253	235	217	202	188	176	165	155	145					
200			515	461	417	378	345	315	290	267	247	229	213	198	185	173	163	153	144				
210			541	484	438	396	362	331	304	280	259	240	224	208	195	182	171	161	152	143			
220				507	459	415	379	346	319	293	272	252	234	218	204	191	179	168	159	150	142		
230				530	480	434	397	362	333	307	284	263	245	228	213	200	187	176	166	156	148		
240					501	453	414	378	348	320	296	274	255	238	222	208	196	184	173	163	155		
250					522	472	431	394	362	333	309	286	266	248	232	217	204	191	180	170	161		
260					542	491	448	409	377	347	321	297	277	259	241	226	212	199	188	177	167		
270						510	465	425	391	360	333	309	287	268	250	234	220	207	195	184	174		
280						529	483	441	406	373	346	320	298	277	260	243	228	214	202	191	180		
290						547	500	457	420	387	358	332	309	287	269	252	235	222	209	197	187		
300							517	472	435	400	370	343	319	297	278	260	245	230	217	204	193		
310								534	488	449	413	383	354	330	307	287	259	237	224	211	200		
320								552	504	464	427	395	366	341	317	297	278	261	245	231	218		
330									520	478	440	407	377	351	327	306	286	269	253	238	225		
340									535	493	453	420	389	362	337	315	295	277	260	245	231		
350										507	467	432	400	373	347	324	304	285	268	253	233		
360										522	480	444	412	383	357	334	312	293	276	260	245		
370										536	493	457	423	394	367	343	321	302	283	267	252		
380											507	469	434	405	377	352	330	310	291	274	256		
390											520	481	446	415	386	362	338	318	299	281	265		
400											533	494	457	426	396	371	347	326	306	289	272		
410												506	469	436	406	380	355	334	314	296	279		
420												519	480	447	416	389	364	342	322	303	286		
430												531	492	458	426	399	373	350	329	310	293		
440													503	468	436	408	382	359	337	318	299		
450													514	479	446	417	390	367	344	325	306		
460														526	490	456	426	399	375	352	332		
470														537	500	466	436	408	383	360	339		
480															511	476	445	416	391	367	346		
490															522	486	454	425	399	375	354		
500															532	496	463	434	408	383	361		
510																505	473	442	416	390	368		
520																515	482	451	424	398	375		
530																525	491	460	432	406	382		
540																	501	463	440	413	390		
550																	510	477	448	421	397		
560																519	485	456	429	404	381		
570																528	494	465	438	411	388		
580																	503	473	444	419	395		
590																	512	481	452	426	402		
600																	520	489	459	433	408		
610																	529	497	467	440	415		
620																		505	476	447	422		
630																		513	482	455	429		
640																		522	490	462	436		
650																		530	498	469	442		



## LINE (16) – PRESSURE REMAINING FOR DRILL STEM

The pressure remaining for the drill stem is the pressure of line (10) less the pressure losses through the bit nozzles determined in line (14b).

### EXAMPLE

In line (10) it was found that the pressure remaining for bit and drill stem was 1791 psi. Line (14b) gives a pressure loss of 1782 psi for the bit nozzles. The difference of these two is the pressure available for the drill stem which is 9 psi. Enter this figure in line (16). Note that with the larger nozzles in the example the pressures remaining for the drill stem range from 236 to 715 psi.

## LINE (17) – LENGTH OF DRILL STEM THAT MAY BE ADDED

The pressure remaining for the drill stem was determined in line (16), and the pressure losses for each 1000 feet of drill stem were determined in line (13). From this the amount of drill stem that may be added can be obtained.

### EXAMPLE

In line (16), the pressure remaining for drill stem was 9 psi, and in line (13) the pressure losses for each 1000 feet of drill stem were determined to be 53 psi. Dividing the 9 psi by 53 psi and multiplying by 1000 feet gives 170 feet of drill stem that may be added to fully load the pump. Enter this figure in line (17).

## LINE (18) – DEPTH AT WHICH PUMP WILL BE FULLY LOADED

Line (18) is the sum of line (17) and the drill collar length. This sum represents the depth at which the pump will be fully loaded when using nozzle sizes given in line (14a).

### EXAMPLE

Drill collar length was given at 450 feet and the drill stem length determined on line (17) was 170 feet; this total, 620 feet, is entered on line (18).

LINE 16  
INPUT FROM COVER

LINE 16, 17, & 18

452



### LINE (19) - INPUT HORSEPOWER REQUIRED

The table on the next sheet was prepared to simplify the calculations required to determine the input horsepower needed for the pump. This table is for use on power pumps and the calculations are based on a mechanical efficiency of 85 per cent. In order to simplify the table, the figures shown are the input horsepower required per psi used. To find the total input horsepower required, it is necessary to multiply the figure from the table by the total pressure used in psi.

#### EXAMPLE

It has already been determined that a circulation rate of 320 gallons per minute is to be used. By referring to the table it will be found that this requires .220 input horsepower per psi. Also from line (8) it is shown that the pressure rating of the pump is 2100 psi. By multiplying .220 by 2100, the total input horsepower is found to be 462. This is then shown on line (19).



# INPUT HORSEPOWER REQUIRED

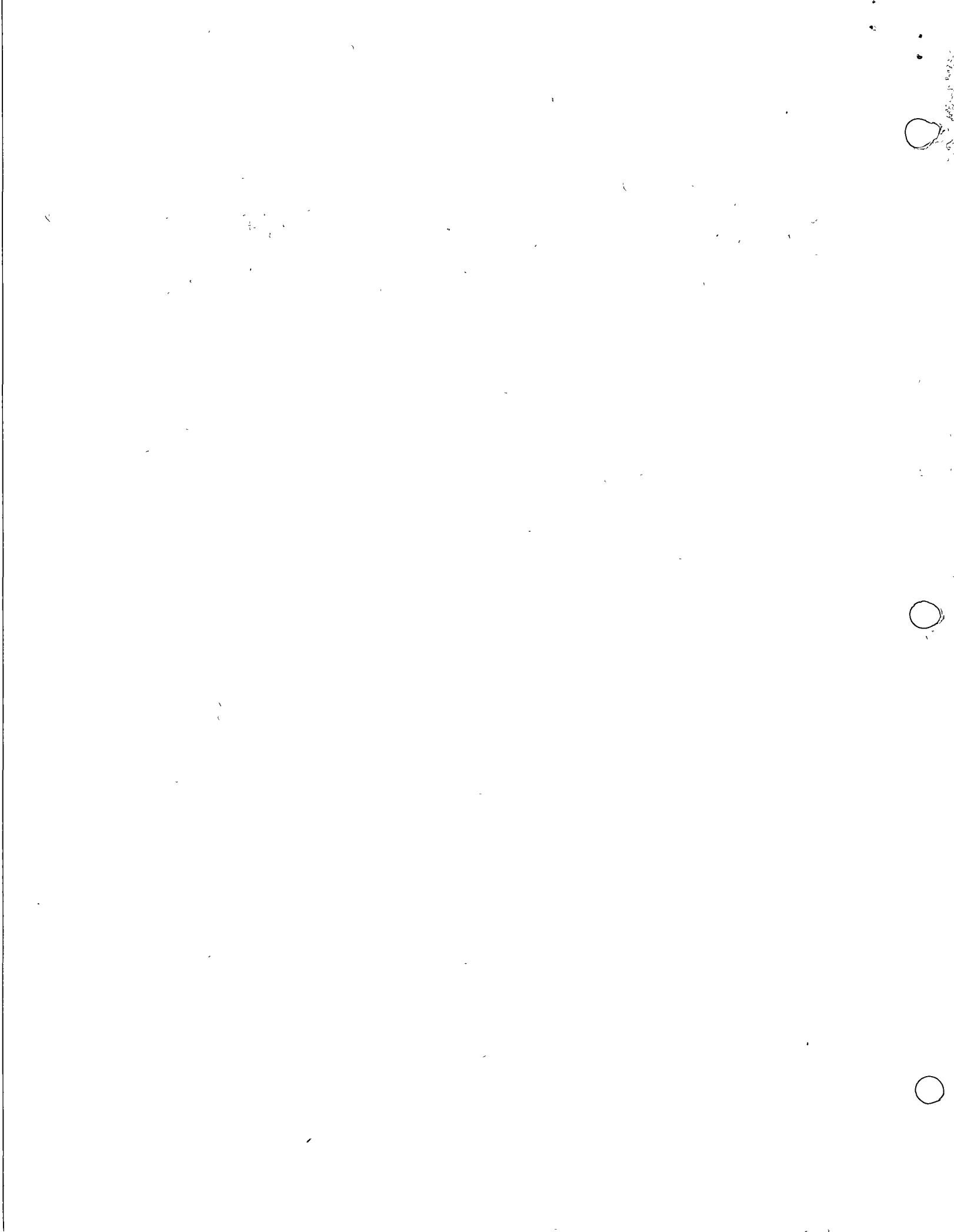
GALLONS PER MINUTE	INPUT HORSEPOWER PER PSI
50	.084
60	.091
70	.098
80	.105
90	.112
100	.119
110	.126
120	.133
130	.140
140	.147
150	.154
160	.161
170	.168
180	.175
190	.182
200	.189
210	.196
220	.203
230	.210
240	.217
250	.224
260	.231
270	.238
280	.245
290	.252
300	.259
310	.266
320	.273
330	.280
340	.287
350	.294
360	.301
370	.308
380	.315
390	.322
400	.329
410	.336
420	.343
430	.350
440	.357
450	.364

GALLONS PER MINUTE	INPUT HORSEPOWER PER PSI
540	.371
550	.377
560	.384
570	.391
580	.398
590	.405
600	.412
610	.419
620	.426
630	.433
640	.439
650	.446
660	.453
670	.460
680	.467
690	.474
700	.480
710	.487
720	.494
730	.501
740	.508
750	.515
760	.522
770	.529
780	.535
790	.542
800	.549
810	.556
820	.563
830	.570
840	.577
850	.583
860	.590
870	.597
880	.604
890	.611
900	.618
910	.625
920	.631
930	.638
940	.645
950	.652
960	.659
970	.666
980	.673
990	.679
1000	.686
1010	.693
1020	.700

GALLONS PER MINUTE	INPUT HORSEPOWER PER PSI
1030	.707
1040	.713
1050	.720
1060	.727
1070	.734
1080	.741
1090	.748
1100	.755
1110	.762
1120	.769
1130	.776
1140	.782
1150	.789
1160	.796
1170	.803
1180	.810
1190	.817
1200	.824
1210	.830
1220	.837
1230	.844
1240	.851
1250	.858
1260	.865
1270	.872
1280	.879
1290	.885
1300	.892
1310	.899
1320	.906
1330	.913
1340	.920
1350	.927
1360	.933
1370	.940
1380	.947
1390	.954
1400	.961
1410	.968
1420	.975
1430	.981
1440	.988
1450	.995
1460	1.002
1470	1.009
1480	1.016
1490	1.023
1500	1.030

$$\text{VISCOSITY CORRECTION FACTOR} = \left( \frac{\mu}{\mu_0} \right)^{.14}$$
 2.0  
1.8  
1.6  
1.4  
1.3  
1.2  
1.1  
1.0

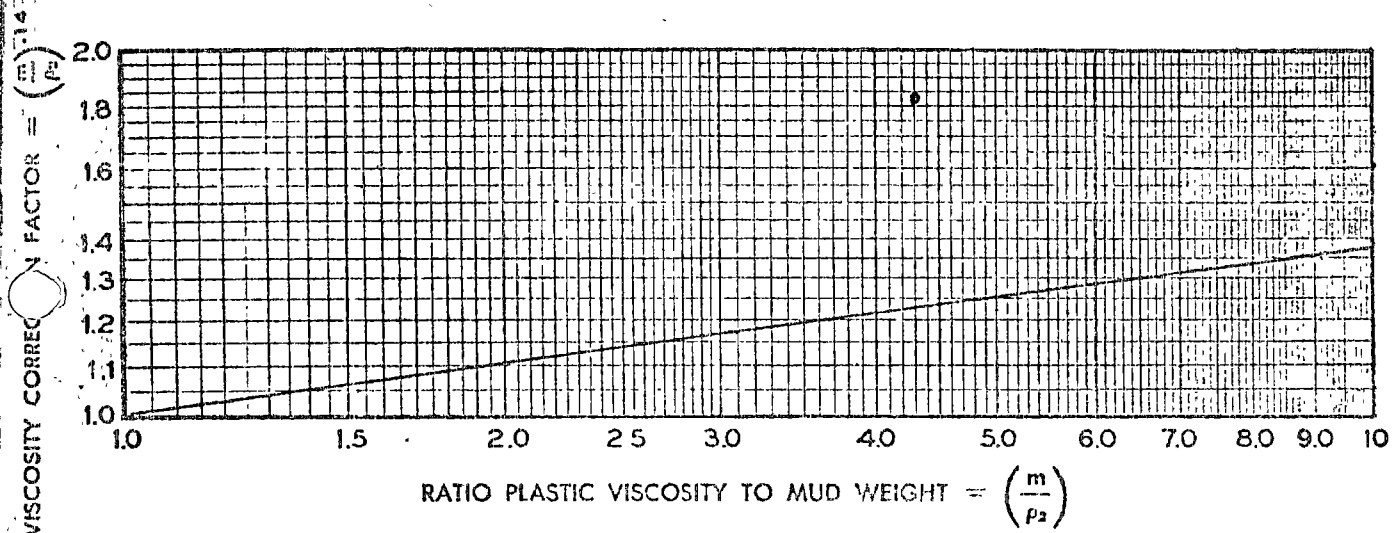
A54





## VISCOSITY CORRECTION FOR WEIGHTED DRILLING FLUIDS

The pressure loss calculations included in this bulletin are valid for most drilling fluids. For fluids up to 14 pounds per gallon a pressure loss correction based on mud weight alone is generally sufficient since in this range the weight to viscosity ratio is fairly constant. For drilling fluids with weights above 14 pounds per gallon and for lighter fluids with abnormal viscosities, a viscosity correction should be applied in addition to the weight correction. The correction factor may be read from the following curve. It should be applied only to line (7) and line (13). It should not be applied to pressure losses through the nozzles.



### EXAMPLE

Given: Flow Rate  $\left(\frac{m}{\rho_2}\right)$  = 320 GPM  
 Mud Weight,  $\rho_2$  = 11 pounds per gallon  
 Plastic Viscosity,  $m$  = 22 centipoises (Fann V-G meter)

$$\frac{m}{\rho_2} = \frac{22}{11} = 2. \text{ From the above curve, correction factor} = 1.1$$

In Line (7) correct pressure loss from 118 to 130 by multiplying 118 x 1.1.  
 In Line (13) correct pressure from 53 to 58 by multiplying 53 x 1.1.

10

11

12



# HYDRAULIC DATA--WORK SHEET

CONTRACTOR \_\_\_\_\_ Rig No. \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

Well Name \_\_\_\_\_ Field, County & State \_\_\_\_\_

### SURFACE EQUIPMENT

Pump Make: No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Model No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Length of Stroke No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Strokes Per Minute No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Rod Size No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_

### DRILLING EQUIPMENT

Size of Hole \_\_\_\_\_  
 Drill Stem Size \_\_\_\_\_ Wt. \_\_\_\_\_  
 Type Tool Joints \_\_\_\_\_ O.D. \_\_\_\_\_ I.D. \_\_\_\_\_  
 Drill Collars Length \_\_\_\_\_ O.D. \_\_\_\_\_ I.D. \_\_\_\_\_  
 Mud Type \_\_\_\_\_ Mud Weight \_\_\_\_\_

Surface Equipment, Case \_\_\_\_\_

- (1) Minimum Annular Velocity \_\_\_\_\_ FPM
- (2) Circulation Rate Required for Minimum Annular Velocity \_\_\_\_\_ GPM
- (3) a. Size of Liners (Smallest to Give Minimum Annular Velocity) \_\_\_\_\_ IN.
- b. Circulation Rate with this Liner \_\_\_\_\_ GPM
- c. Annular Velocity with this Liner \_\_\_\_\_ FPM

### PRESSURE LOSSES FOR SURFACE EQUIPMENT AND COLLARS

(Use Circulation Rate of Line 3b)

- (4)\* Through Surface Equipment \_\_\_\_\_ PSI
- (5)\* Through Drill Collar Bore (PSI/100') x Hundreds of Feet = \_\_\_\_\_ x  $\frac{\quad}{100}$  = \_\_\_\_\_ PSI
- (6)\* Around Drill Collars (PSI/100') x Hundreds of Feet = \_\_\_\_\_ x  $\frac{\quad}{100}$  = \_\_\_\_\_ PSI
- (7)\* Total Pressure Loss. (Add Lines (4) Through (6)) \_\_\_\_\_ PSI
- (8) Pressure Rating of Pump \_\_\_\_\_ PSI
- (9) Correction for Mud Weight:  $\frac{\text{Line (8)} \times 10}{\text{Mud Weight}} = \quad \times 10$  \_\_\_\_\_ PSI
- (10)\* Pressure Remaining for Bit and Drill Stem (Subtract Line (7) from Line (9)) \_\_\_\_\_ PSI

### PRESSURE LOSSES FOR 1000 FEET OF DRILL STEM

- (11)\* Losses through 1000 Ft. of Drill Stem \_\_\_\_\_ PSI
- (12)\* Losses Around 1000 Ft. of Drill Stem \_\_\_\_\_ PSI
- (13)\* Total Pressure Loss: (Add Lines (11) and (12)). \_\_\_\_\_ PSI

### NOZZLE SELECTION

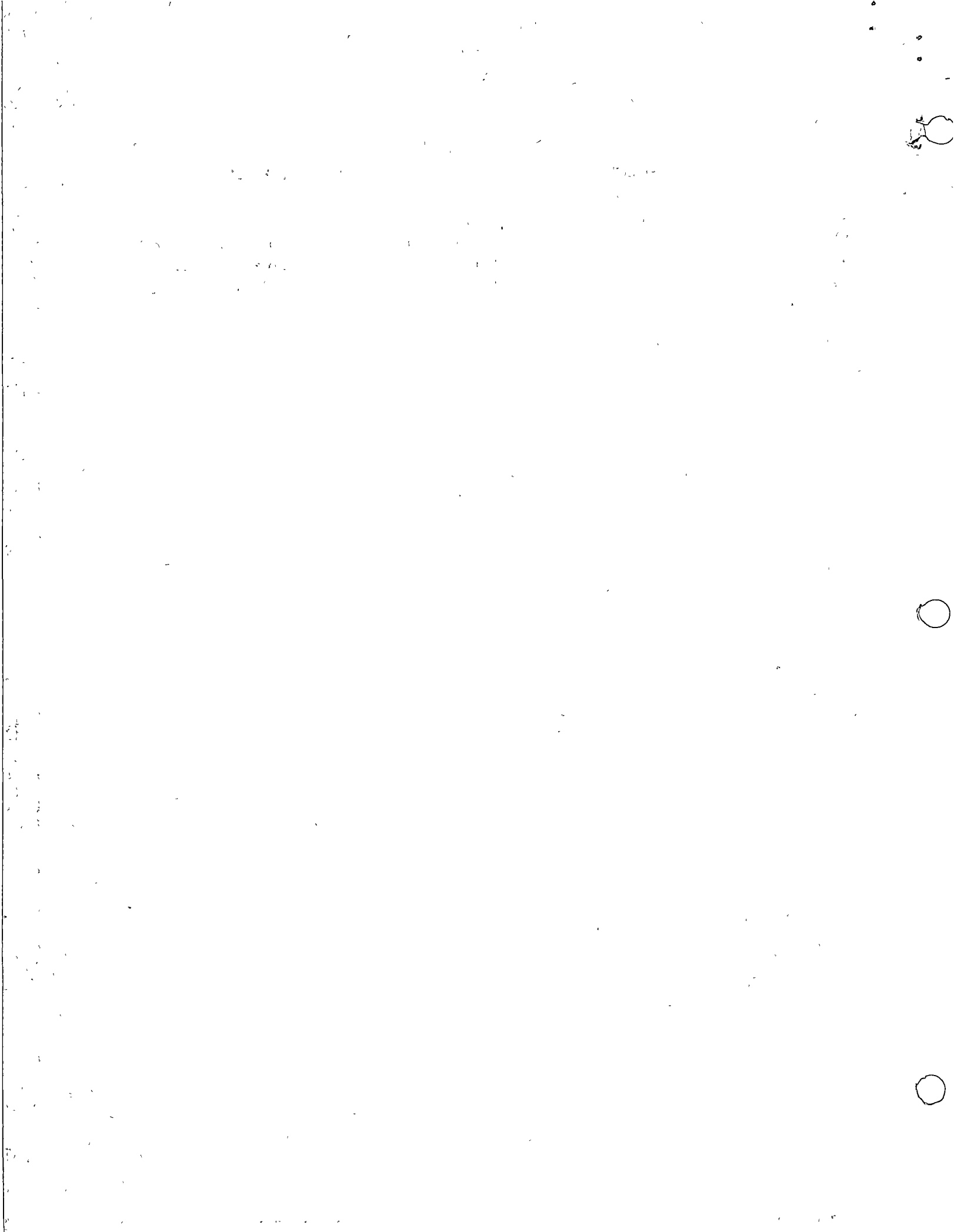
(14) a. Nozzle Combination _____						PSI
*b. Pressure Drop Through Nozzles _____						PSI
(15) Nozzle Velocity _____						FPS
(16)* Pressure Remaining for Drill Stem (Subtract Line (14b) from Line (10)) _____						PSI
(17) Length of Drill Stem that can be Added $\frac{\text{Line (16)}}{\text{Line (13)}} \times 1000$ _____						FT.
(18) Depth at which Pump will be Fully Loaded (Line (17) Plus Drill Collar Length) _____						FT.
(19) Input Horsepower Required with Pump Fully Loaded (IHP/PSI) x Line (8) = _____ x _____ = _____						IHP

\* These losses are for 10# mud. The single correction in line (9) properly corrects for mud weight. However, if actual losses are needed multiply by  $\frac{10}{\text{mud weight}}$ .

See Your Hughes Tool Co. Representative for additional copies of Work Sheet

Compiled By \_\_\_\_\_

456





# HYDRAULIC DATA - WORK SHEET

CONTRACTOR \_\_\_\_\_ Rig No \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

Well Name \_\_\_\_\_ Field, County & State \_\_\_\_\_

## SURFACE EQUIPMENT

Pump: Make: No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Model: No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Length of Stroke: No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Strokes Per Minute: No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_  
 Rod Size: No. 1 \_\_\_\_\_ No. 2 \_\_\_\_\_

Surface Equipment, Case \_\_\_\_\_

## DRILLING EQUIPMENT

Size of Hole \_\_\_\_\_  
 Drill Stem: Size: \_\_\_\_\_ Wt: \_\_\_\_\_  
 Type Tool Joints \_\_\_\_\_ O.D. \_\_\_\_\_ I.D. \_\_\_\_\_  
 Drill Collars: Length: \_\_\_\_\_ O.D. \_\_\_\_\_ I.D. \_\_\_\_\_  
 Mud Type \_\_\_\_\_ Mud Weight \_\_\_\_\_

- (1) Minimum Annular Velocity \_\_\_\_\_ FPM
- (2) Circulation Rate Required for Minimum Annular Velocity \_\_\_\_\_ GPM
- (3) a. Size of Liners (Smallest to Give Minimum Annular Velocity) \_\_\_\_\_ IN.
- b. Circulation Rate with this Liner \_\_\_\_\_ GPM
- c. Annular Velocity with this Liner \_\_\_\_\_ FPM

## PRESSURE LOSSES FOR SURFACE EQUIPMENT AND COLLARS

(Use Circulation Rate of Line 3b)

- (4)\* Through surface Equipment \_\_\_\_\_ PSI
- (5)\* Through Drill Collar Bore:  $(PSI/100') \times \text{Hundreds of Feet} = \frac{\quad}{100} \times \quad$  \_\_\_\_\_ PSI
- (6)\* Around Drill Collars:  $(PSI/100') \times \text{Hundreds of Feet} = \frac{\quad}{100} \times \quad$  \_\_\_\_\_ PSI
- (7)\* Total Pressure Loss. (Add Lines (4) Through (6)). \_\_\_\_\_ PSI
- (8) Pressure Rating of Pump \_\_\_\_\_ PSI
- (9) Correction for Mud Weight  $\frac{\text{Line (8)} \times 10}{\text{Mud Weight}} \times 10$  \_\_\_\_\_ PSI
- (10)\* Pressure Remaining for Bit and Drill Stem: (Subtract Line (7) from Line (8)) \_\_\_\_\_ PSI

## PRESSURE LOSSES FOR 1000 FEET OF DRILL STEM

- (11)\* Losses through 1000 Ft. of Drill Stem \_\_\_\_\_ PSI
- (12)\* Losses Around 1000 Ft. of Drill Stem \_\_\_\_\_ PSI
- (13)\* Total Pressure Loss: (Add Lines (11) and (12)) \_\_\_\_\_ PSI

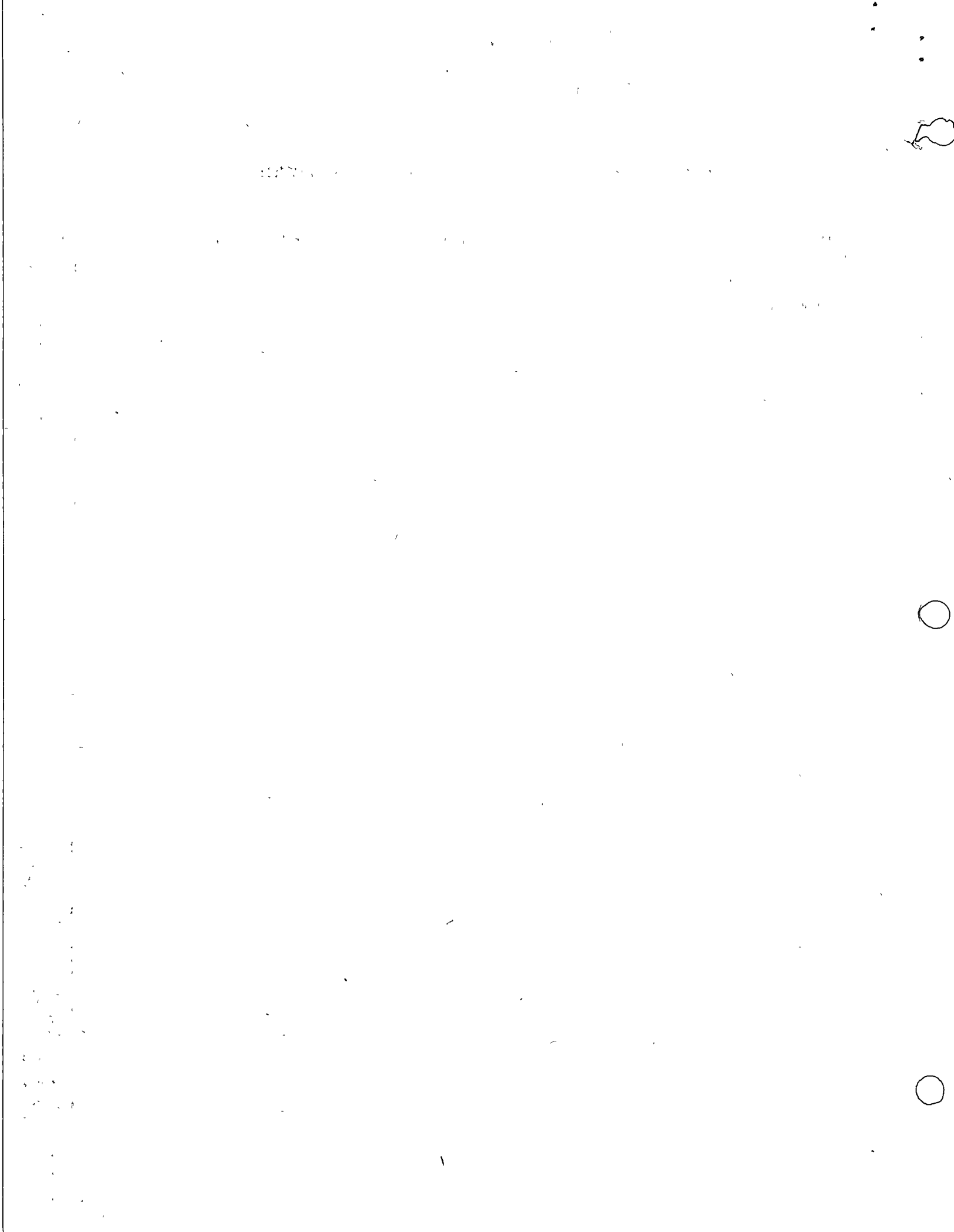
## NOZZLE SELECTION

(14) a. Nozzle Combination _____										PSI
*b. Pressure Drop Through Nozzles _____										PSI
(15) Nozzle Velocity _____										FPS
(16)* Pressure Remaining for Drill Stem: (Subtract Line (14b) from Line (10)) _____										PSI
(17) Length of Drill Stem that can be Added: $\frac{\text{Line (16)}}{\text{Line (13)}} \times 1000$ _____										FT.
(18) Depth at which Pump will be Fully Loaded (Line (17) Plus Drill Collar Length) _____										FT.
(19) Input Horsepower Required with Pump Fully Loaded. (IHP/PSI) $\times$ Line (8) = _____ $\times$ _____ = _____										IHP

\* These losses are for 10# mud. The single correction in line (9) properly corrects for mud weight. However, if actual losses are needed multiply by \_\_\_\_\_  
 10

See Your Hughes Tool Co. Representative for additional copies of Work Sheet

Compiled By \_\_\_\_\_

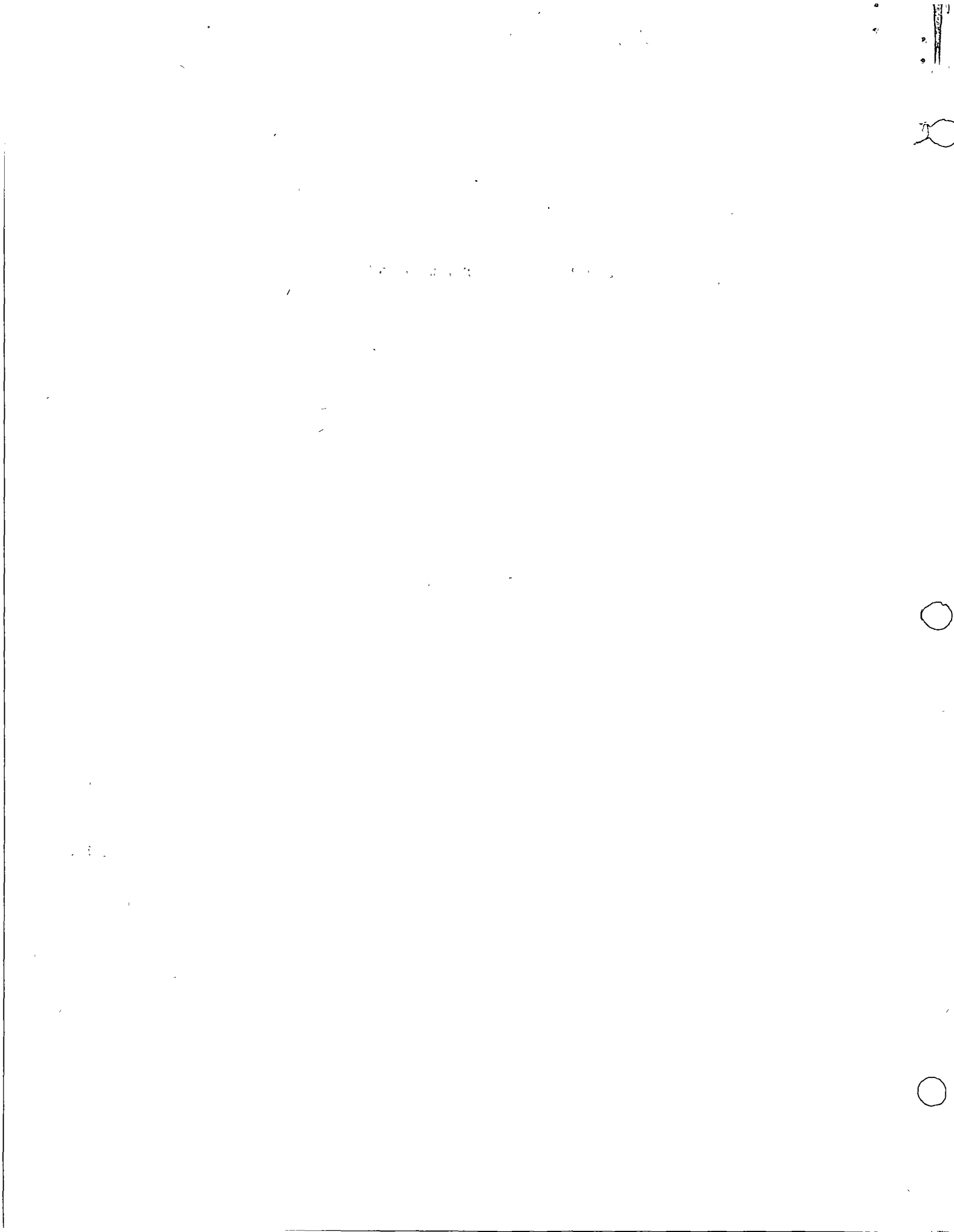


HIDROLOGIA SUBTERRANEA

REGISTRO DE CAMPO Y SU UTILIDAD

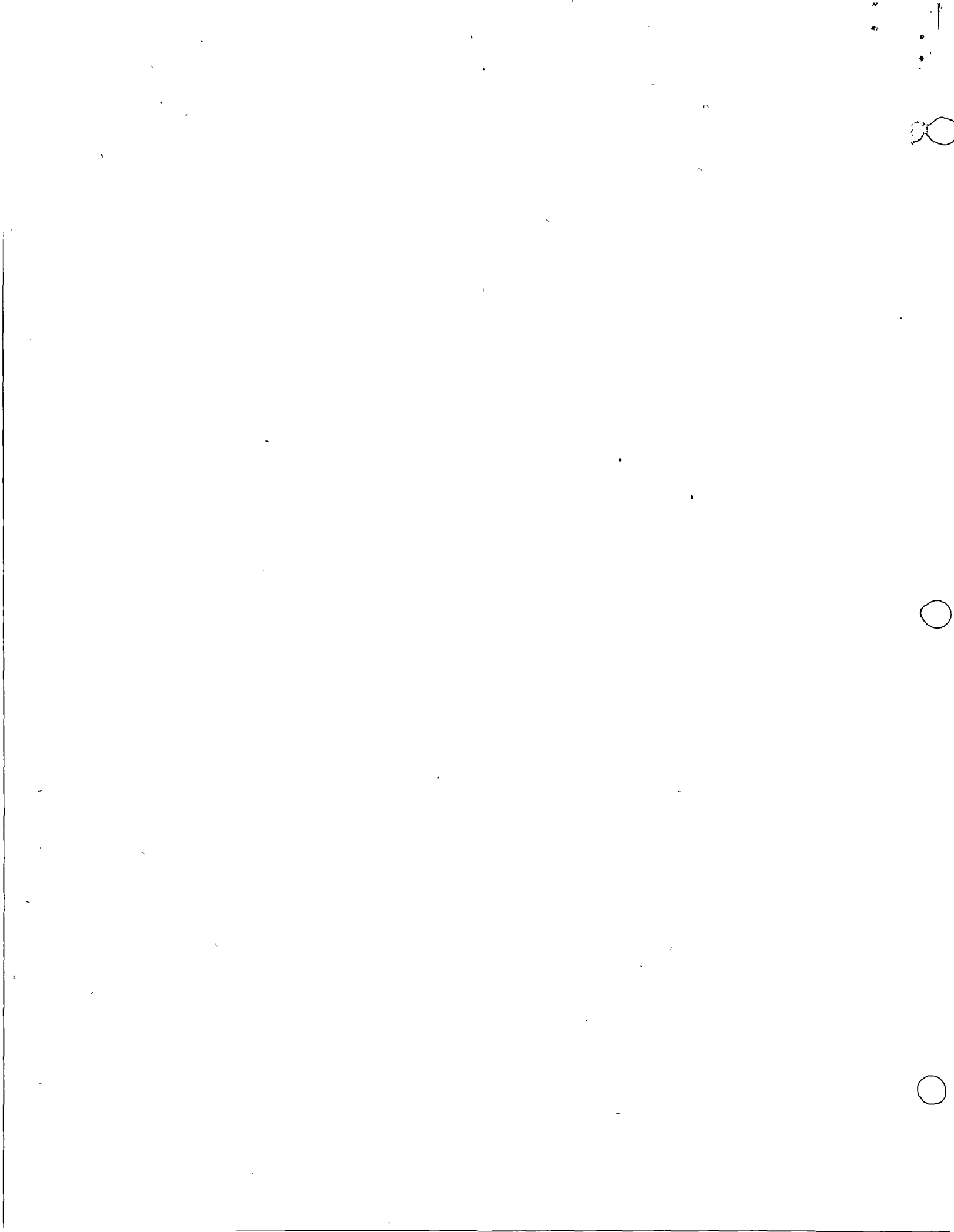
ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ

JULIO DE 1976.

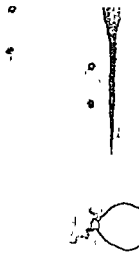




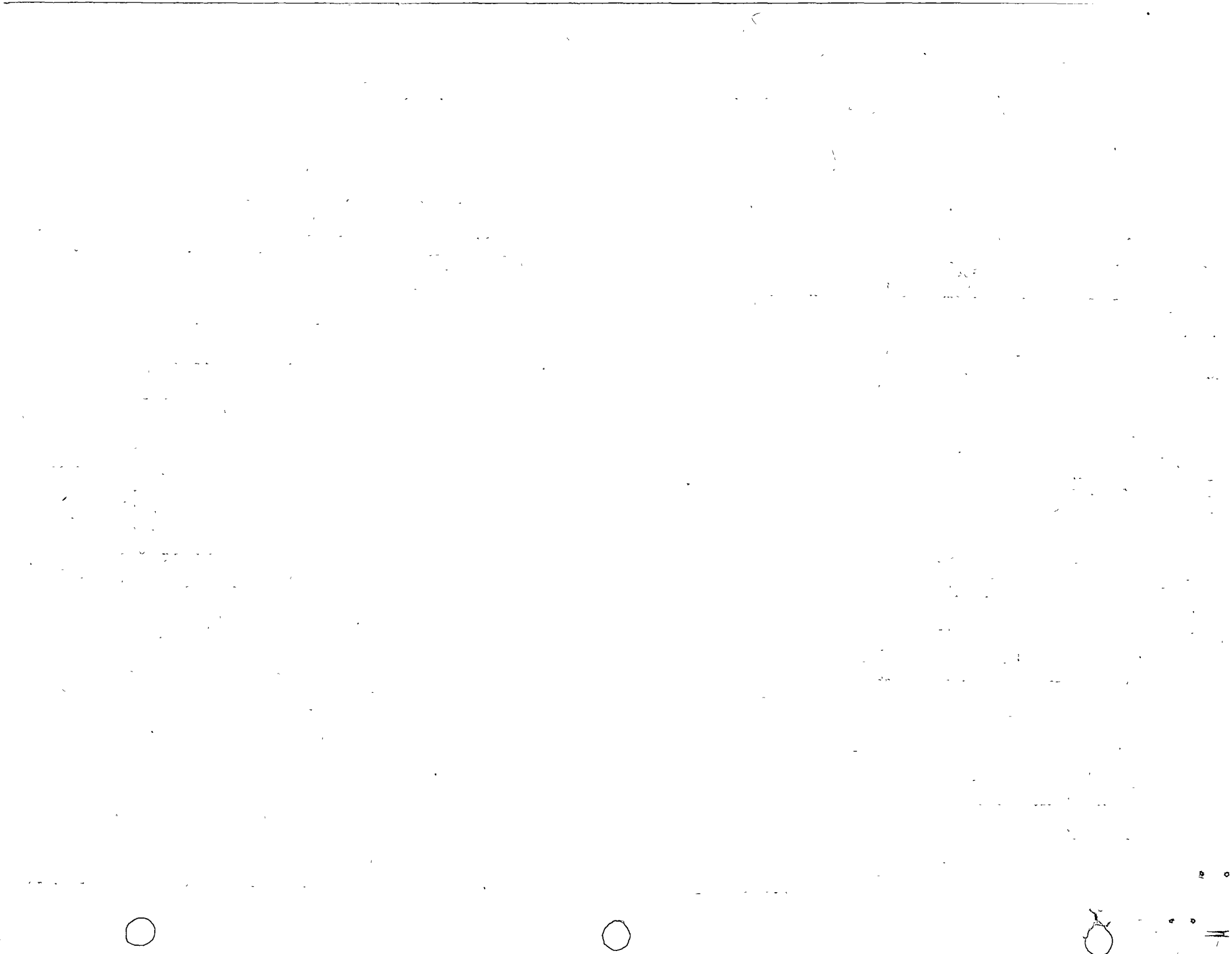
CAPITULO No. 2



REGISTRO DE CAMPO Y SU UTILIDAD.













HIDROLOGIA SUBTERRANEA

DESVIACIONES REGISTRADAS EN UN POZO  
Y SU INTERPRETACION

ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ

JULIO DE 1976.

11



CAPITULO No. 3

1  
2



DESVIACIONES REGISTRADAS EN UN POZO  
Y SU INTERPRETACION.



11

FECHA:

FORMULA EMPLEADA PARA EL CALCULO DE LA DESVIACION CORRESPONDIENTE

LA PROFUNDIDAD:  $X = (P + K) \dots = \text{m.m.}$ 

EN LA CUAL P - Profundidad K

K - Altura entre Polea y Retícula.

LR - Longitud registrada en m.m.

REGISTRO DE VERTICALIDAD K = 5.75

C.	PROF. EN M.	LONGITUD		REGISTRADA		DESVIACION CALCULADA				DESVIACION CALCULADA							
		NORTE	SUR.	ORIENTE	PONENT.	SOBRE EJE Y - Y'				SOBRE EJE X - X'							
1	5.75	0	2	0	1	11500	X	2/5750	=	4	S	11500	X	1/5750	=	2	W
2	11.50	0	0	2	0	17250	X	0/ "	=	0	"	17250	X	2/ "	=	6	E
3	17.25	0	3	0	0	23000	X	3/ "	=	12	"	23000	X	0/ "	=	0	"
4	23.00	0	7	3	0	28750	X	7/ "	=	35	"	28750	X	3/ "	=	15	"
5	28.75	0	6	5	0	34500	X	6/ "	=	36	"	34500	X	5/ "	=	30	"
6	34.50	0	3	9	0	40250	X	3/ "	=	21	"	40250	X	9/ "	=	63	"
7	40.25	0	4	8	0	46000	X	4/ "	=	32	"	46000	X	8/ "	=	64	"
8	46.00	0	2	6	0	51250	X	2/ "	=	18	"	51250	X	6/ "	=	54	"
9	51.75	0	3	5	0	67500	X	3/ "	=	30	"	67500	X	5/ "	=	50	"
10	57.50	0	2	7	0	63250	X	2/ "	=	20	"	63250	X	7/ "	=	77	"
11	63.25	0	1	5	0	69000	X	1/ "	=	12	"	69000	X	5/ "	=	60	"
12	69.00	0	1	4	0	74750	X	1/ "	=	18	"	74750	X	4/ "	=	52	"
13	74.75	0	0	2	0	80500	X	0/ "	=	0	"	80500	X	2/ "	=	28	"
14	76.92	0	1	0	0	82670	X	1/ "	=	14.37	"	82670	X	0/ "	=	0	"

... ..  
... ..



FALTA GRAFICA.



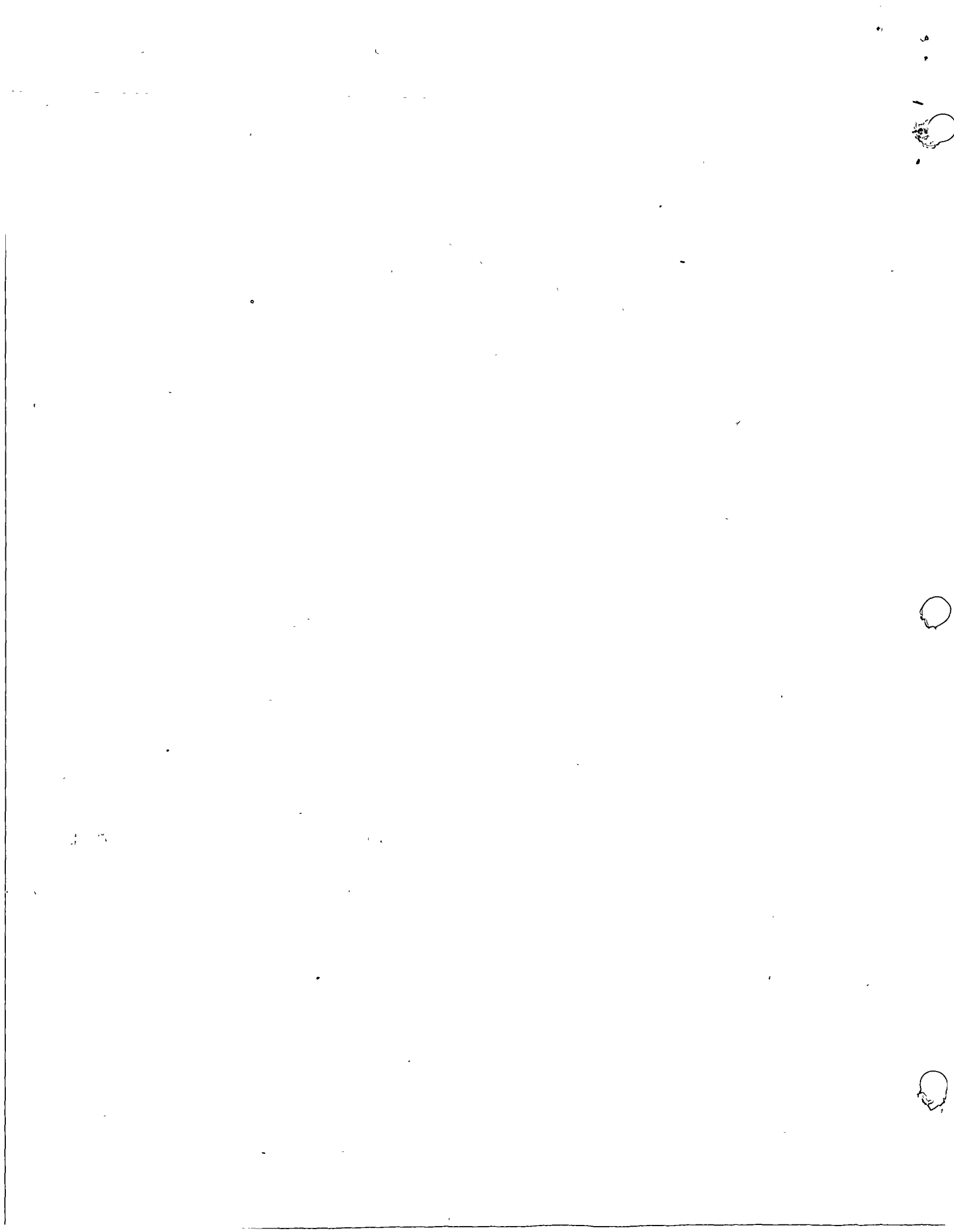
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

EJEMPLO ANALISIS DE COSTOS PARA UN EQUIPO  
DE PERFORACION ROTATORIO

ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ

JULIO DE 1976.

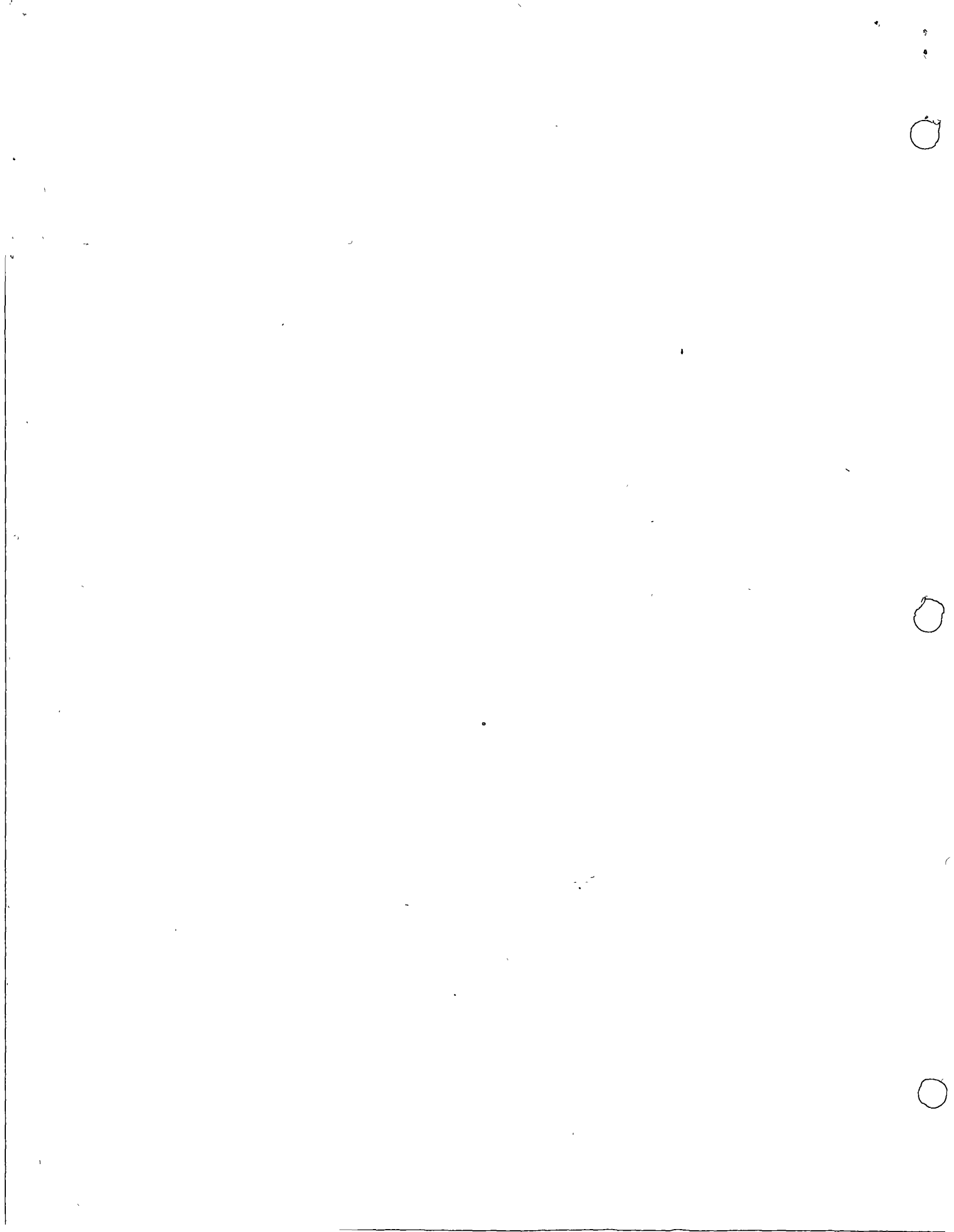


°  
CAPITULO No. 4

23



EJEMPLO ANALISIS DE COSTOS PARA UN EQUIPO  
DE PERFORACION ROTATORIO.





CLASE Y MODELO DE MAQUINA :	Valor de Adquisición
MAQUINA: <u>FRANKS SS-25 (ó similar)</u>	\$ <u>1,897,390.79</u>
MOTOR: <u>DIESEL</u> de <u>296</u> H.P.	\$ _____
EQUIPO ADICIONAL: _____	\$ <u>121,352.40</u>
VALOR DE ADQUISICION :	\$ <u>2,018,743.19</u>
VALOR DE RESCATE :	\$ <u>210,874.31</u>
VALOR DE LLANTAS	\$ <u>22,367.60</u>
VALOR DE ACCESORIOS :	\$ _____
VALOR POR DEPRECIAR :	\$ <u>1,794,591.28</u>

Vida Económica 7 Años, 2000 Horas/Año.

### CARGOS FIJOS :

$$\text{DEPRECIACION : } \left( \frac{\text{Valor x Dep.}}{\text{Nº Hrs. Totales}} \right) = \frac{\$ 1,794,591.28}{14000} = \$ 128.19 \text{ /hora}$$

$$\text{INTERESES : } \left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Tasa} \right)$$

$$\frac{\$ 2,018,743.19}{4000 \text{ hrs.}} \times 0.13 = \$ 65.61 \text{ /hora}$$

$$\text{SEGUROS : } \left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Primo Anual} \right)$$

$$\frac{\$ 2,018,743.19}{4000 \text{ hrs.}} \times 0.03 = \$ 15.14 \text{ /hora}$$

$$\text{ALMACENAJE : } (\text{Dep. Horaria} \times \text{Coeficiente de Alm.})$$

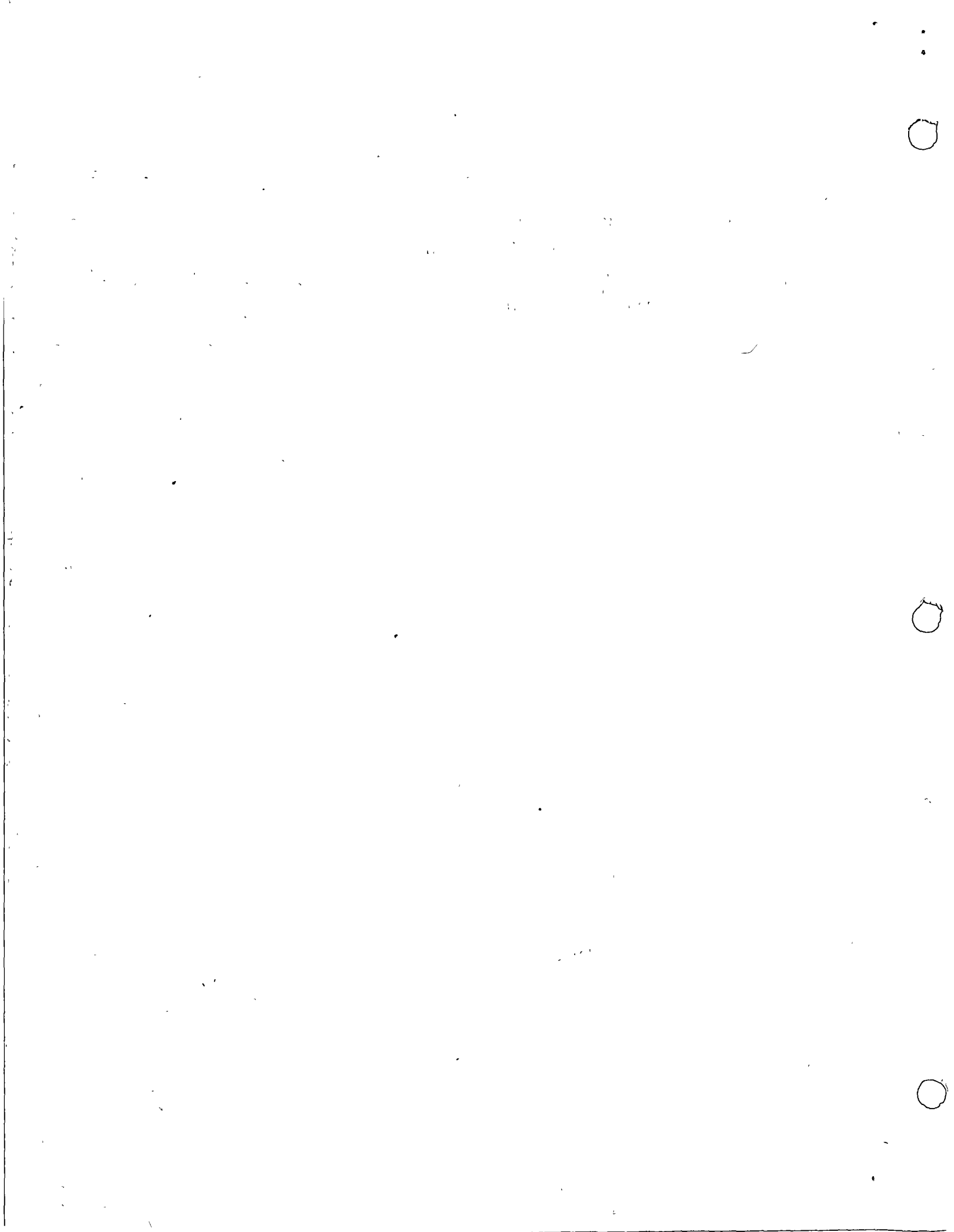
$$\frac{\$ 128.19}{1} \times 0.025 = \$ 3.20 \text{ /hora}$$

### MANTENIMIENTO :

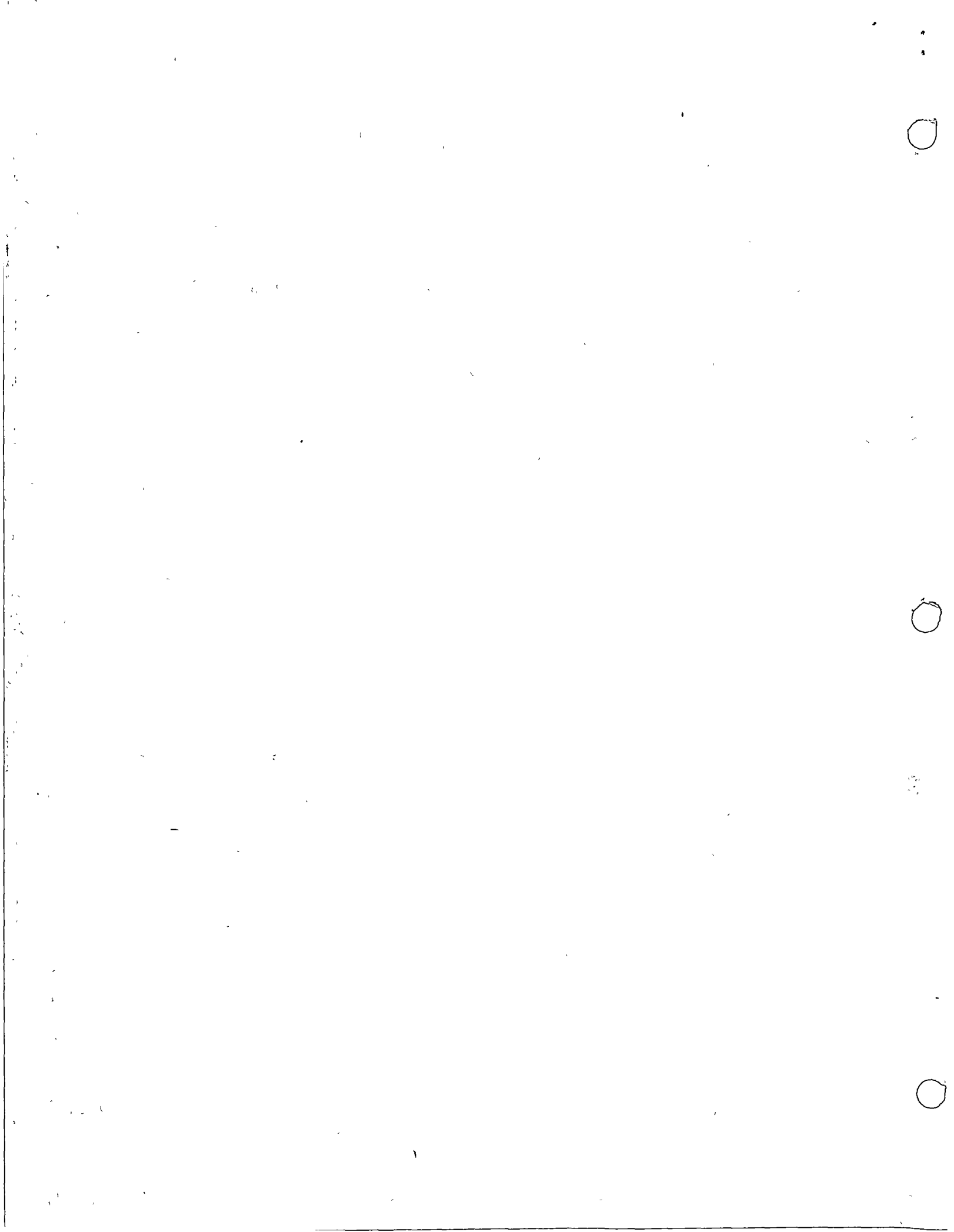
$$\text{Reparación Mayor (1)} \quad \$ 128.19 \text{ /hora} \times 75 \% = \$ 96.14 \text{ /hora}$$

$$\text{Reparación Menor (1)} \quad \$ 128.19 \text{ /hora} \times 25 \% = \$ 32.05 \text{ /hora}$$

$$\text{SUMA DE CARGOS FIJOS} = \$ 340.33 \text{ /hora}$$







CONSUMOS UNITARIOS

1.- DIESEL:  $0.1514 \text{ h/hpx} 282.75 \text{ h/lts./hr.} \times \$ 0.55 / \text{lt.} = \$ 23.55 / \text{hr.}$

2.- GASOLINA; ARRANQUE DE MOTOR:  
 \_\_\_\_\_ Its/hr. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

3.- ACEITE DE LUBRICACION DE MOTOR:

Menores de 100 HP

0.00307 Its. x \_\_\_\_\_ H.P. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

de 100 HP ó Mayores

0.00358 Its x 282.75 H.P. x \$ 5.53 /lt. = \$ 5.59 /hr.

4.- ACEITE (Cambios):

Cop Certor 76 lts. ÷ 100 hr. x \$ 5.53 /lt. = \$ 4.20 /hr.

5.- LUBRICANTES, FILTROS, GRASA:

Motor \_\_\_\_\_ lt./hr x \$ \_\_\_\_\_ /lt.= \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Transmisión 0.01 lt./hr. x \$ 5.73 /lt.= \$ 0.06 /hr.

Mandos Fines \_\_\_\_\_ lt./hr x \$ \_\_\_\_\_ /lt.= \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Sistema Hidraulico 0.025 lt./hr. x \$ 5.48 /lt.= \$ 0.14 /hr.

Grasa 0.113 Kg/hr. x \$ 6.50 /Kg= \$ 0.73 /hr.

Filtros 8/100 Pza/hr. x \$ 46.00 /Pza= \$ 3.68 /hr.

= \$ 4.61 /hr.

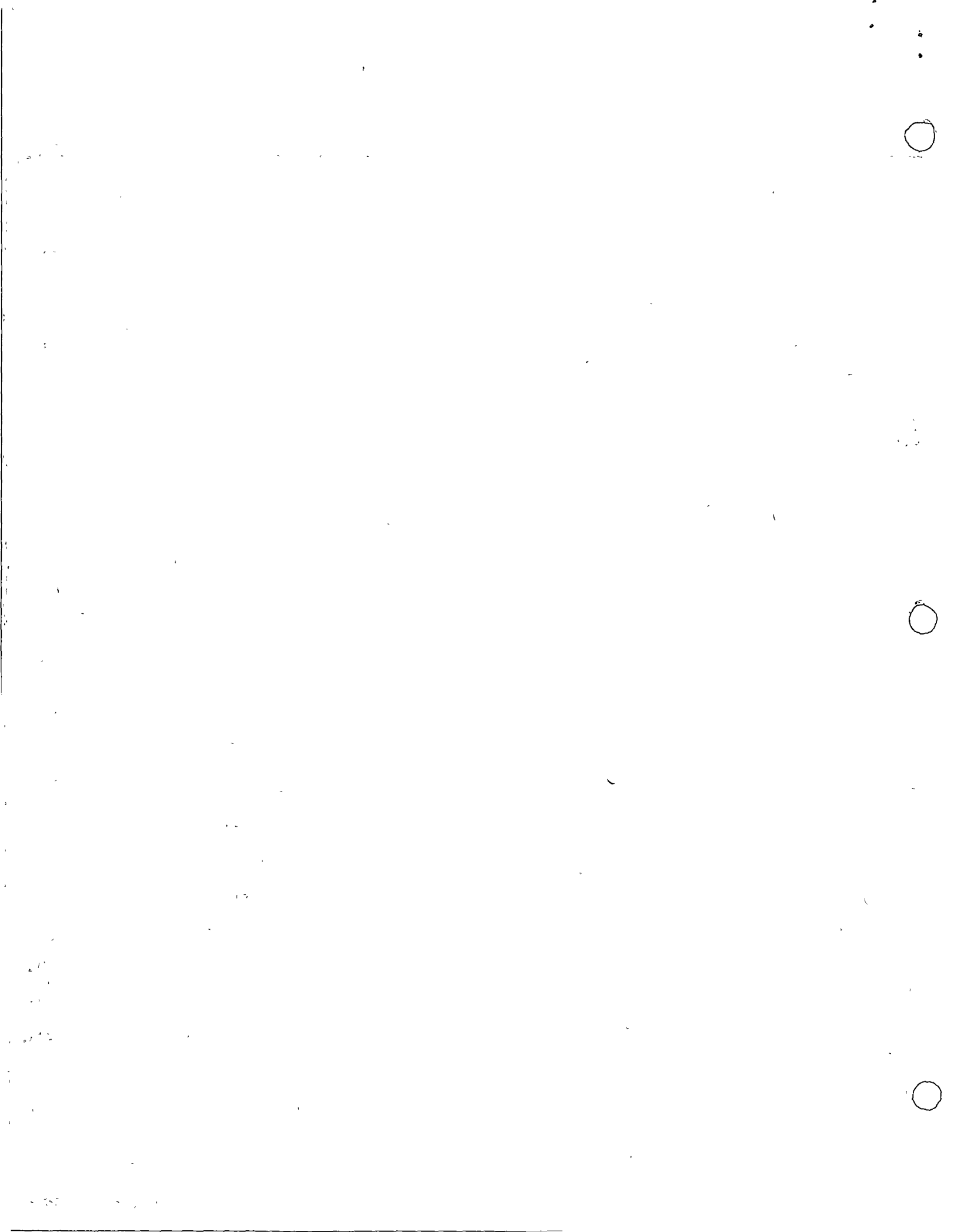
6.- ADITIVOS

= \$ 37.95 /hr.

7.- LLANTAS : =  $\frac{\text{Costo de llantas}}{\text{Duración Estimada}} = \frac{22,367.60}{3.000 \text{ hrs}} = \$ 7.46 / \text{hr.}$

8.- ACCESORIOS: =  $\frac{\text{Valor Accesorios}}{\text{Duración Estimada}} = \frac{225,000.00}{6000 \text{ hrs}} = \$ 37.55 / \text{hr.}$

SUMA DE CONSUMOS = \$ 82.56 /hr.



CLASE Y MODELO DE MAQUINA :

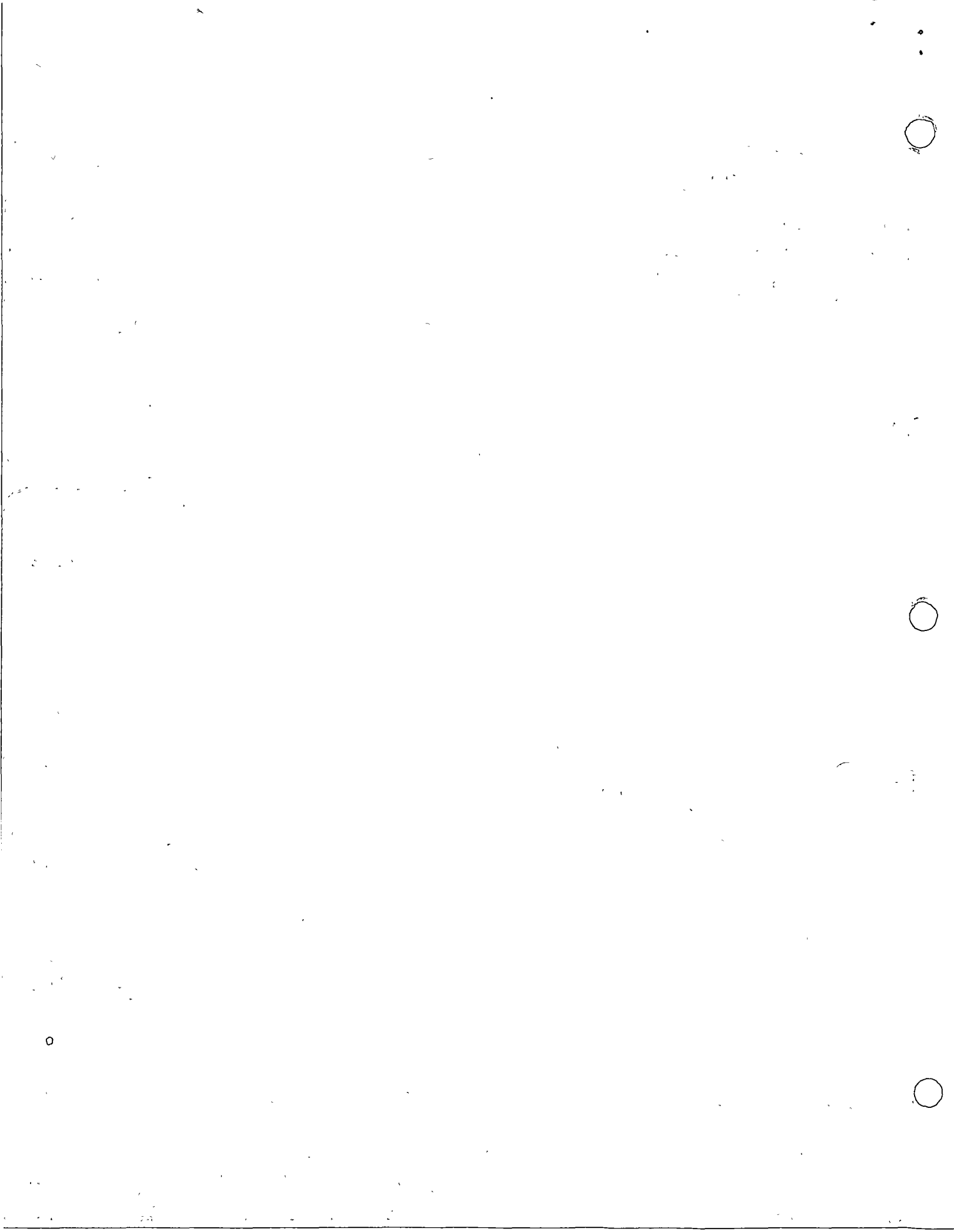
Valor de Adquisición

MAQUINA: COMPRESOR DX 900: I.R.	\$	617,750.00
MOTOR: DIESEL de 225 H.P.	\$	
EQUIPO ADICIONAL:	\$	
VALOR DE ADQUISICION :	\$	
VALOR DE RESCATE :	\$	61,775.00
VALOR DE LLANTAS :	\$	
VALOR DE ACCESORIOS :	\$	
VALOR POR DEPRECIAR :	\$	555,975.00

Vida Económica 5 Años, 2,000 Horas/Año.

CARGOS FIJOS :

1.- DEPRECIACION :	$\left( \frac{\text{Valor x Dep.}}{\text{Nº Hrs. Totales}} \right) =$	\$ 555,975.00	=	\$	55.59	/hora
		10,000				
2.- INTERESES :	$\left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Tasa} \right)$			\$	20.07	/hora
		\$ 617,750.00	x			
		4,000 hrs.				
3.- SEGUROS :	$\left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Prima Anual} \right)$			\$	4.63	/hora
		\$ 617,750.00	x			
		4,000 hrs.			0.03	
4.- ALMACENAJE :	$( \text{Dep. Horaria} \times \text{Coeficiente de Alm.} )$			\$	1.38	/hora
		\$ 55.59	x		0.025	
5.- MANTENIMIENTO :						
- Reparación Mayor (1)	\$ 55.59 /hora x	75 %	=	\$	41.59	/hora
- Reparación Menor (1)	\$ 55.59 /hora x	25 %	=	\$	13.89	/hora
SUMA DE CARGOS FIJOS =				\$	137.15	/hora





### CONSUMOS UNITARIOS

1.- DIESEL: 50 lts/hr. x \$ 0.75 /lt. = \$ 37.50 /hr.

2.- GASOLINA, ARRANQUE DE MOTOR:  
\_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

3.- ACEITE DE LUBRICACION DE MOTOR:

Menores de 100 H.P.

0.00307 lts. x \_\_\_\_\_ H.P. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

de 100 H.P. ó Mayores

0.00358 lts. x 225 H.P. x \$ 5.53 /lt. = \$ 4.45 /hr.

4.- ACEITE (Cambios):

Cap. Carter 12 lts. = 100 hr. x \$ 9.15 /lt. = \$ 1.10 /hr.

5.- LUBRICANTES, FILTROS, GRASA:

Motor \_\_\_\_\_ lt./hr x \$ \_\_\_\_\_ /lt.= \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Transmisión 0.01 lt./hr. x \$ 5.73 /lt.= \$ 0.06 /hr.

Mandos Finales \_\_\_\_\_ lt./hr. x \$ \_\_\_\_\_ /lt.= \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Sistema Hidraulico 0.025 lt./hr. x \$ 5.48 /lt.= \$ 0.14 /hr.

Grasa 0.11 Kg/hr. x \$ 6.50 /Kg= \$ 0.72 /hr.

Filtros 4/100 Pza/hr. x \$ 79.50 /Pza= \$ 3.18 /hr.

= \$ 4.10 /hr.

6.- ADITIVOS

= \$ \_\_\_\_\_ /hr.

7.- LLANTAS : =  $\frac{\text{Costo de llantas}}{\text{Duración Estimada}} = \frac{5,750.00}{6,000} = \$ 0.96$  /hr.

8.- ACCESORIOS: =  $\frac{\text{Valor Accesorios}}{\text{Duración Estimada}} = \$$  \_\_\_\_\_ /hr.

SUMA DE CONSUMOS = \$ 48.11 /hr.



OPERACION :

Salario Minimo \$ \_\_\_\_\_ /Turno ( 8 horas )  
 Salario Operador \$ 112.50 /Turno ( 8 horas )  
 Salario Ayla Op. \$ 91.00 /Turno ( 8 horas )  
 SUMA SALARIOS \$ 203.50 /Turno ( 8 horas )

Dias Trabajados en el Año = 285

Corrección por Turno Efectivo: \$  $\frac{203.50 \times 365}{285}$  = \$ 260.62 /Turno Efectivo

Eficiencia de Operación = 0.80

Corrección por hrs. Efectivos: \$  $\frac{260.62}{8} \times \frac{1}{0.8}$  = \$ 40.73 /hora

RESUMEN

Cargos Fijos \$ 137.15 /hora  
 Consumos Unitarios \$ 48.11 /hora  
 Operación \$ 40.73 /hora  
 SUMA DE CARGOS DIRECTOS : \$ 225.99 /hora



CLASE Y MODELO DE MAQUINA :

Valor de Adquisición

MAQUINA: CAMION FORD F-600	\$	135,750.00
MOTOR: GASOLINA de 225 H.P.	\$	
EQUIPO ADICIONAL: TANQUE 6,500 lts	\$	47,500.00
VALOR DE ADQUISICION :	\$	183,250.00
VALOR DE RESCATE :	\$	18,325.00
VALOR DE LLANTAS	\$	9,700.00
VALOR DE ACCESORIOS :	\$	
VALOR POR DEPRECIAR :	\$	155,225.00

Vida Económica 5 Años; 2,000 Horas/Año.

CARGOS FIJOS :

1.- DEPRECIACION :  $\left( \frac{\text{Valor x Dep.}}{\text{Nº Hrs. Totales}} \right) = \$ \frac{155,225.00}{10,000} = \$ 15.52 \text{ /hora}$

2.- INTERESES :  $\left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Tasa} \right)$   
 $\$ \frac{183,250.00}{4,000 \text{ hrs.}} \times \text{---} = \$ 5.96 \text{ /hora}$

3.- SEGUROS :  $\left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Primo Anual} \right)$   
 $\$ \frac{183,250.00}{4,000 \text{ hrs.}} \times 0.03 = \$ 1.37 \text{ /hora}$

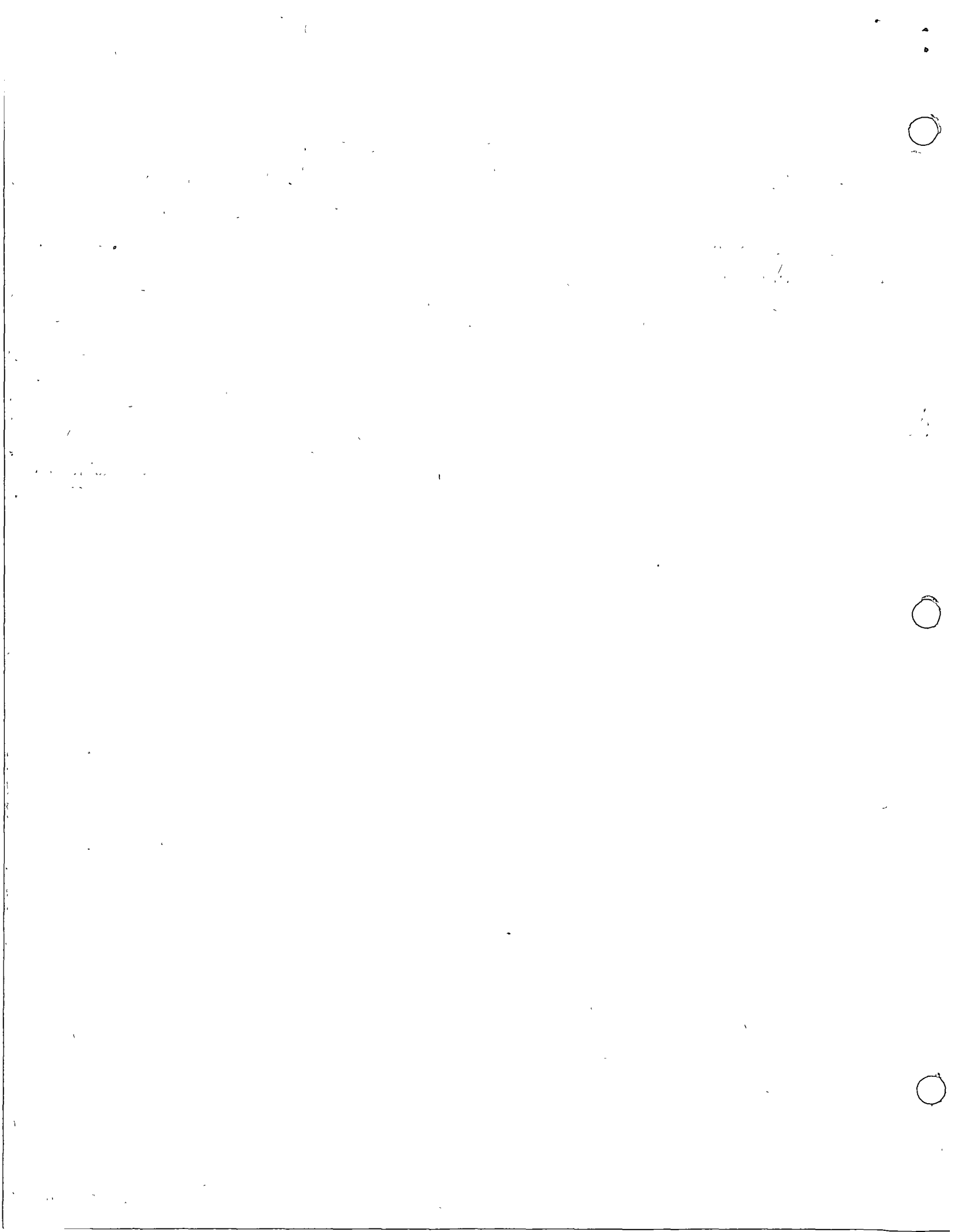
4.- ALMACENAJE : ( Dep. Horaria x Coeficiente de Alm. )  
 $\$ 15.52 \times 0.025 = \$ 0.39 \text{ /hora}$

MANTENIMIENTO :

- Reparación Mayor (1)  $\$ 15.52 \text{ /hora} \times 65 \% = \$ 10.09 \text{ /hora}$

- Reparación Menor (1)  $\$ 15.52 \text{ /hora} \times 20 \% = \$ 3.10 \text{ /hora}$

SUMA DE CARGOS FIJOS = \$ 36.43 /hora



CONSUMOS UNITARIOS

1.- DIESEL: \_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ /lt = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

2.- GASOLINA; ARRANQUE DE MOTOR:  
 \_\_\_\_\_ 15 \_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ 2.20 \_\_\_\_\_ /lt = \$ \_\_\_\_\_ 33.00 \_\_\_\_\_ /hr.

3.- ACEITE DE LUBRICACION DE MOTOR:  
Menores de 100 HP  
 0.00307 lts. x \_\_\_\_\_ HP x \$ \_\_\_\_\_ /lt = \$ \_\_\_\_\_ /hr.  
de 100 HP ó Mayores  
 0.00348 lts x \_\_\_\_\_ 225 \_\_\_\_\_ H.P. x \$ \_\_\_\_\_ 5.00 \_\_\_\_\_ /lt = \$ \_\_\_\_\_ 4.83 \_\_\_\_\_ /hr.

4.- ACEITE (Cambios):  
 Cap. Carter 0.6 lts x \_\_\_\_\_ 30 \_\_\_\_\_ hr. x \$ \_\_\_\_\_ 0.01 \_\_\_\_\_ /lt = \$ \_\_\_\_\_ 1.98 \_\_\_\_\_ /hr.

5.- LUBRICANTES, FILTROS, GRASA:

Motor	_____	lt/hr	x \$ _____	/lt = \$ _____	/hr.
Transmisión	0.01	lt/hr.	x \$ _____	5.73	/lt = \$ _____ 0.06 _____ /hr.
Mandos Finales	_____	lt/hr.	x \$ _____	/lt = \$ _____	/hr.
Sistema Hidráulico	_____	lt/hr.	x \$ _____	/lt = \$ _____	/hr.
Grasa	0.11	Kg/hr	x \$ _____	6.50	/Kg = \$ _____ 0.72 _____ /hr.
Filtros	2/100	Pza/hr.	x \$ _____	39.75	/Pza = \$ _____ 0.80 _____ /hr.

= \$ \_\_\_\_\_ 1.58 \_\_\_\_\_ /hr.  
 = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

6.- ADITIVOS

7.- LLANTAS : =  $\frac{\text{Costo de llantas}}{\text{Duración Estimada}} = \frac{9,700.00}{6,000} = \$ 1.62$  /hr.

8.- ACCESORIOS: =  $\frac{\text{Valor Accesorios}}{\text{Duración Estimada}} = \$$  \_\_\_\_\_ /hr.

SUMA DE CONSUMOS = \$ \_\_\_\_\_ 43.01 \_\_\_\_\_ /hr.





OPERACION :

Salario Minimo \$ \_\_\_\_\_ /turno ( 8 horas )

Salario Operador \$ 82.10 /turno ( 8 horas )

Salario Ayle Op. \$ 69.70 /turno ( 8 horas )

SUMA SALARIOS \$ 152.80 /turno ( 8 horas )

Dias Trabajados en el Año = 285

Corrección por Turno Efectivo: \$ 152.80 x  $\frac{285}{285}$  = \$ 195.69 /turno Efectivo

Eficiencia de Operación = 0.80

Corrección por hrs. Efectivas: \$ 195.69 x  $\frac{1}{0.8}$  = \$ 30.58 /hora

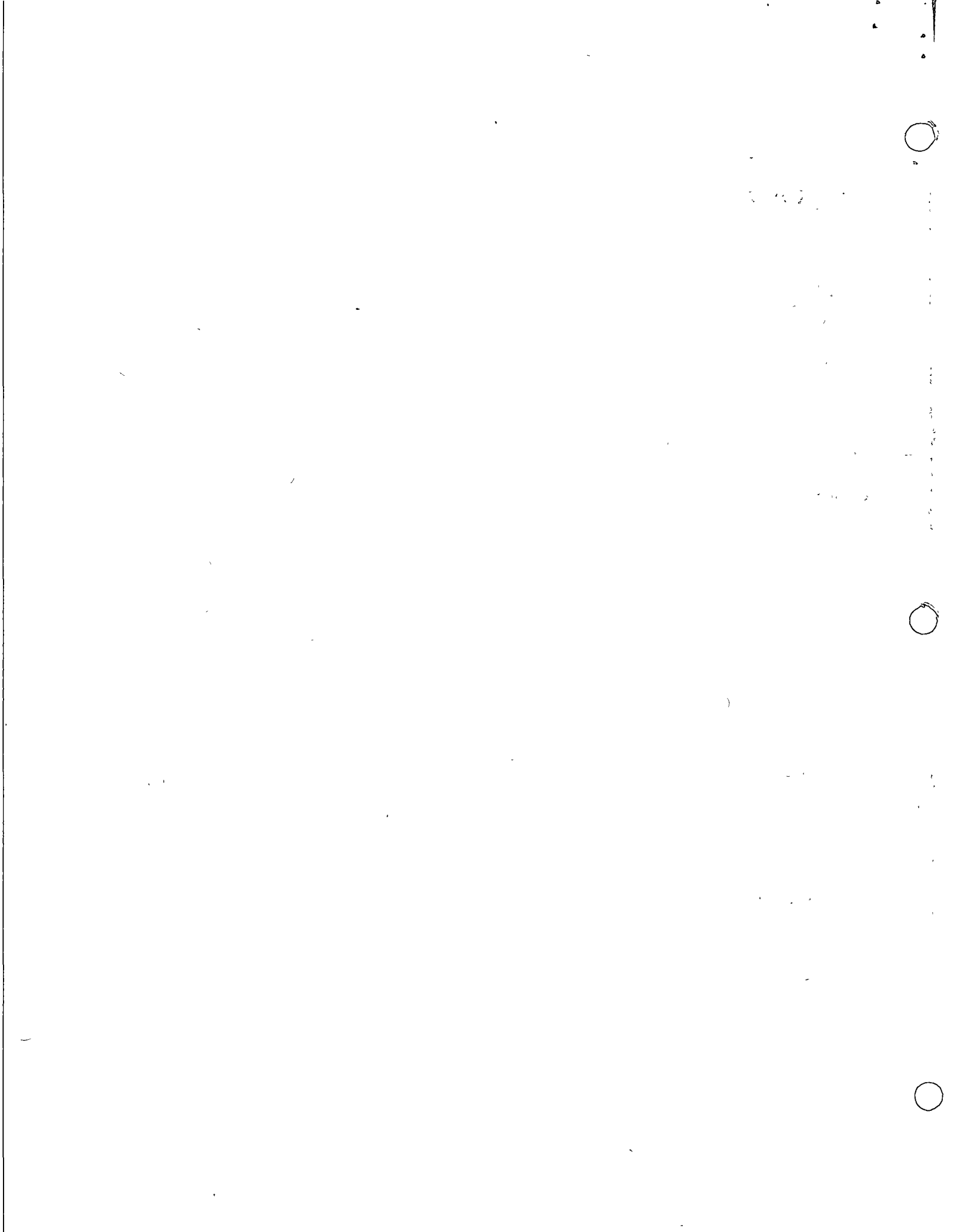
RESUMEN

Cargos Fijos \$ 36.43 /hora

Consumos Unitarios \$ 43.01 /hora

Operación \$ 30.58 /hora

SUMA DE CARGOS DIRECTOS : \$ 110.02 /hora



CLASE Y MODELO DE MAQUINA :

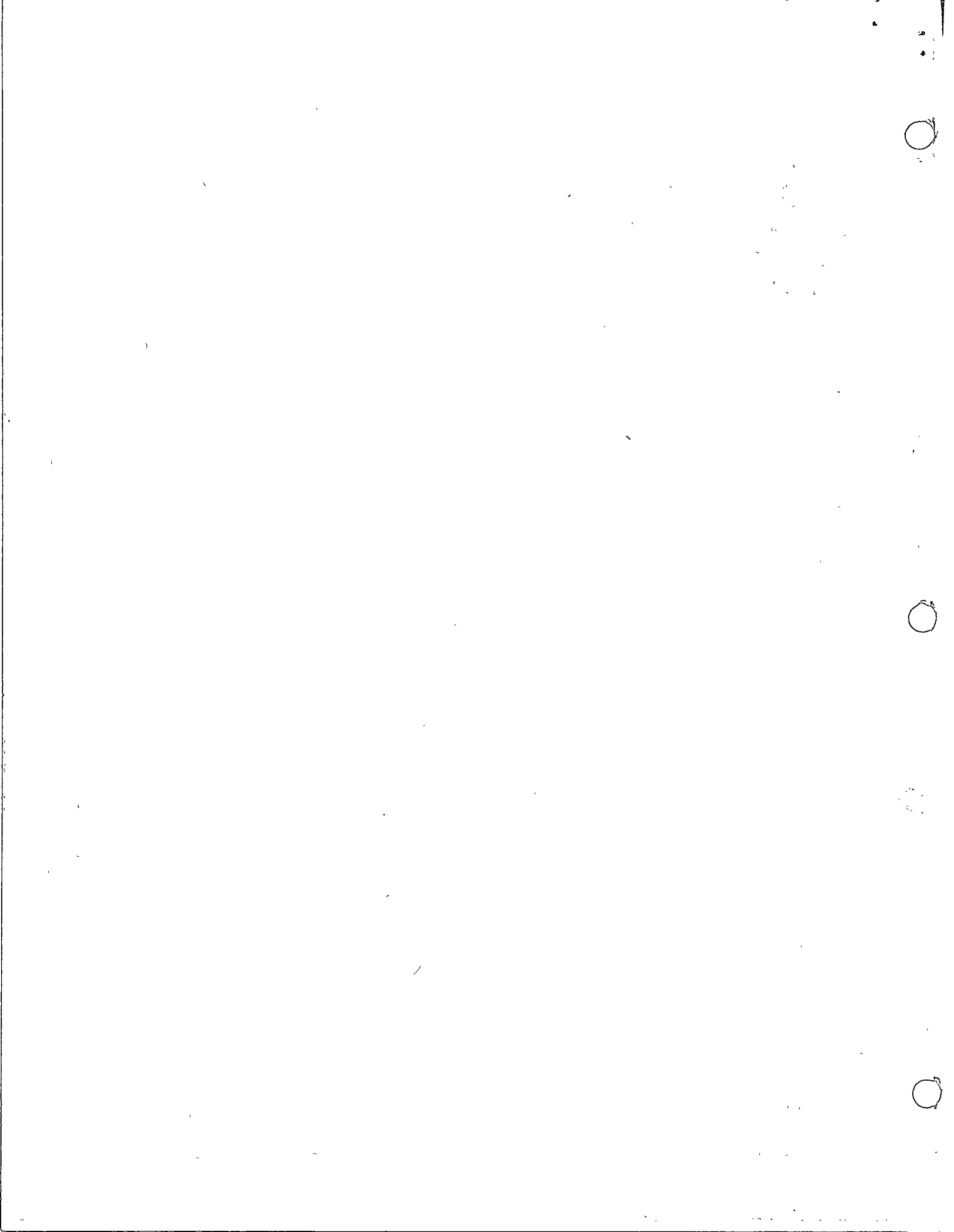
Valor de Adquisición

MAQUINA: CAMION FORD F-600	\$	135,750.00
MOTOR: GASOLINA de 225 H.P.	\$	
EQUIPO ADICIONAL: MALACATE Y GRUA	\$	62,750.00
VALOR DE ADQUISICION :	\$	198,500.00
VALOR DE RISCATE :	\$	19,850.00
VALOR DE LLANTAS	\$	9,700.00
VALOR DE ACCESORIOS :	\$	
VALOR POR DEPRECIAR :	\$	168,950.00

Vida Económica 5 Años, 2,000 Horas/Año.

CARGOS FIJOS :

1- DEPRECIACION :	$\left( \frac{\text{Valor x Dep.}}{\text{Nº Hrs Totales}} \right) =$	\$ 168,950.00	=	\$ 16.89	/hora
		10,000			
2- INTERESES :	$\left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Tasa} \right)$				
		\$ 198,500.00	x	0.13	= \$ 6.45 /hora
		4,000 hrs			
3- SEGUROS :	$\left( \frac{\text{Valor de Adquisición}}{2 \times \text{Hrs. - Año}} \times \text{Prima Anual} \right)$				
		\$ 198,500.00	x	0.03	= \$ 1.49 /hora
		4,000 hrs.			
4- ALMACENAJE :	$( \text{Dep. Horaria} \times \text{Coeficiente de Alm} )$				
		\$ 16.89	x	0.025	= \$ 0.42 /hora
5- MANTENIMIENTO :					
- Reparación Mayor (1)	\$ 16.89 /hora x 65 % =	\$ 10.98	/hora		
- Reparación Menor (1)	\$ 16.89 /hora x 20 % =	\$ 3.38	/hora		
SUMA DE CARGOS FIJOS :		\$		39.61	/hora



CONSUMOS UNITARIOS

1.- DIESEL: \_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

2.- GASOLINA; ARRANQUE DE MOTOR:

\_\_\_\_\_ 15 \_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ 2.20 \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ 33.00 \_\_\_\_\_ /hr

3.- ACEITE DE LUBRICACION DE MOTOR:

Menores de 100 H.P.

0.00307 lts. x \_\_\_\_\_ H.P. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

de 100 H.P. ó Mayores

0.00358 lts x \_\_\_\_\_ 225 \_\_\_\_\_ H.P. x \$ \_\_\_\_\_ 0.00 \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ 4.83 \_\_\_\_\_ /hr.

4.- ACEITE (Cambios):

Cap Carter 0.6 lts x \_\_\_\_\_ 30 \_\_\_\_\_ H.P. x \$ \_\_\_\_\_ 9.00 \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ 1.98 \_\_\_\_\_ /hr.

5.- LUBRICANTES, FILTROS, GRASA:

Motor \_\_\_\_\_ lts/hr x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Transmisión \_\_\_\_\_ 0.01 \_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ 5.73 \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ 0.06 \_\_\_\_\_ /hr.

Mandos Finales \_\_\_\_\_ lts/hr x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Sistema Hidraulico \_\_\_\_\_ lts/hr. x \$ \_\_\_\_\_ /lt. = \$ \_\_\_\_\_ /hr.

Grasa \_\_\_\_\_ 0.11 \_\_\_\_\_ Kg/hr x \$ \_\_\_\_\_ 6.50 \_\_\_\_\_ /Kg = \$ \_\_\_\_\_ 0.72 \_\_\_\_\_ /hr.

Filtros \_\_\_\_\_ 2/100 \_\_\_\_\_ Pza/hr. x \$ \_\_\_\_\_ 3975 \_\_\_\_\_ /Pza = \$ \_\_\_\_\_ 0.80 \_\_\_\_\_ /hr.

= \$ \_\_\_\_\_ 1.58 \_\_\_\_\_ /hr.

6.- ADITIVOS

= \$ \_\_\_\_\_ /hr.

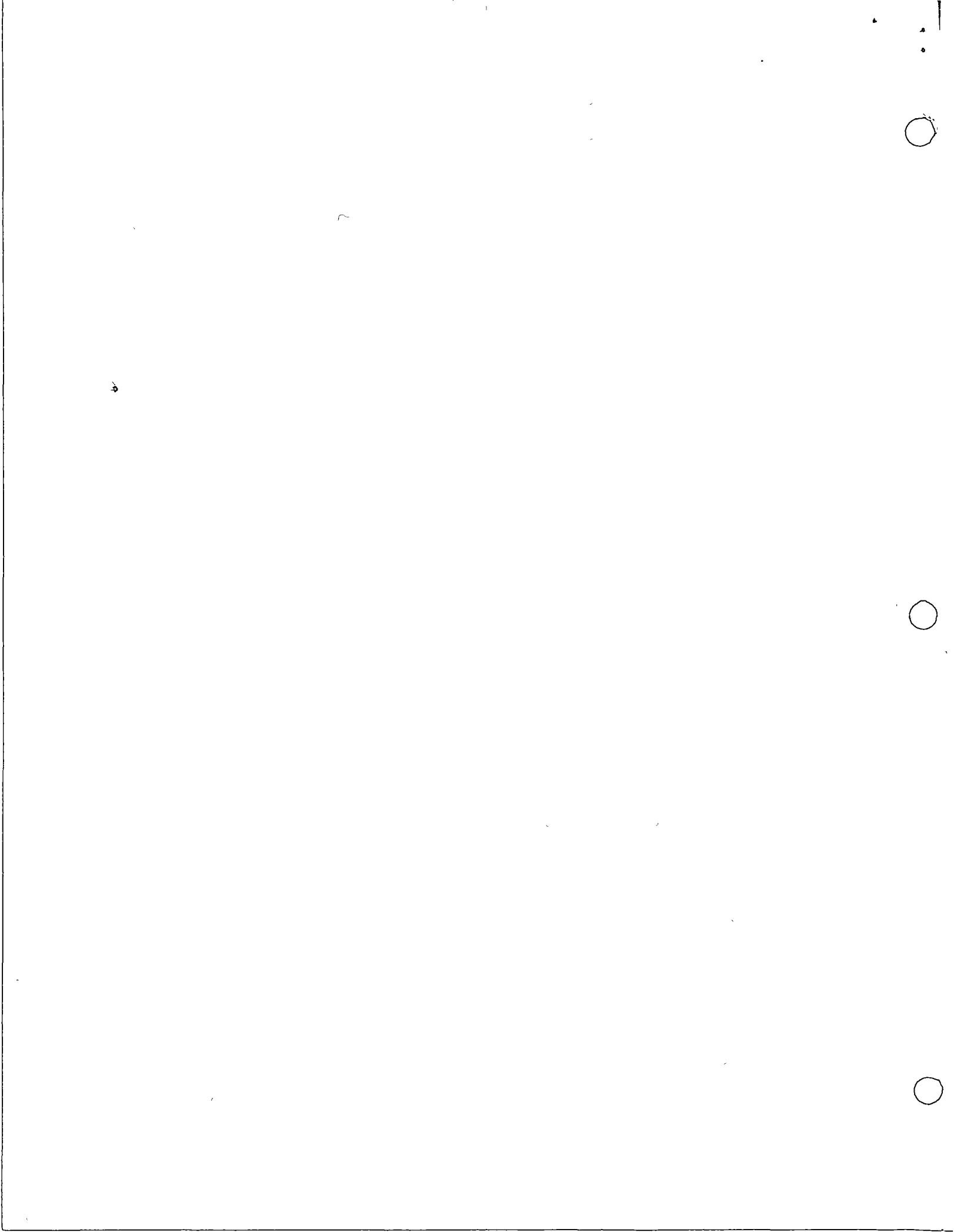
7.- LLANTAS :

=  $\frac{\text{Costo de llantas}}{\text{Duración Estimada}} = \frac{9,700.00}{6,000} = \$ \frac{1.62}{\text{hr.}}$

8.- ACCESORIOS :

=  $\frac{\text{Valor Accesorios}}{\text{Duración Estimada}} = \$ \frac{\quad}{\text{hr.}}$

SUMA DE CONSUMOS = \$ \_\_\_\_\_ 43.01 \_\_\_\_\_ /hr.



OPERACION :

Salario Minimo \$ \_\_\_\_\_ / turno ( 8 horas )

Salario Operador \$ 89.40 / turno ( 8 horas )

Salario Ayte Op. \$ 63.40 / turno ( 8 horas )

SUMA SALARIOS \$ 152.80 / turno ( 8 horas )

Dias Trabajados en el Año = 265

Corrección por Turno Efectivo \$  $\frac{152.80}{265} \times 0.8$  = \$ 195.69 /turno Efectivo

Eficiencia de Operación = 0.80

Corrección por hrs. Efectivas. \$  $\frac{195.69}{8} \times \frac{1}{0.8}$  = \$ 30.58 /hora

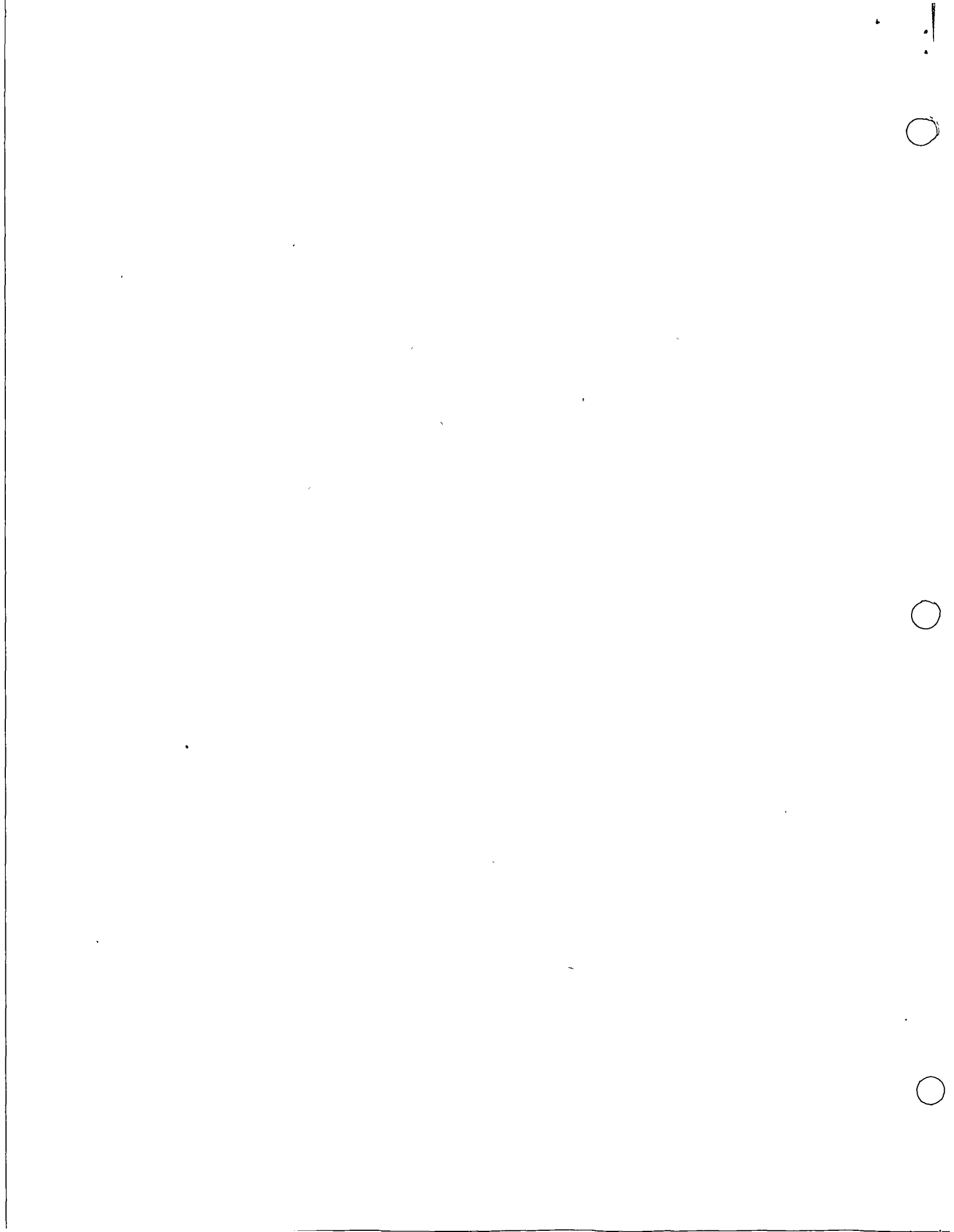
RESUMEN

Cargos Fijos \$ 39.61 /hora

Consumos Unitarios \$ 43.01 /hora

Operación \$ 30.58 /hora

SUMA DE CARGOS DIRECTOS : \$ 113.20 /hora





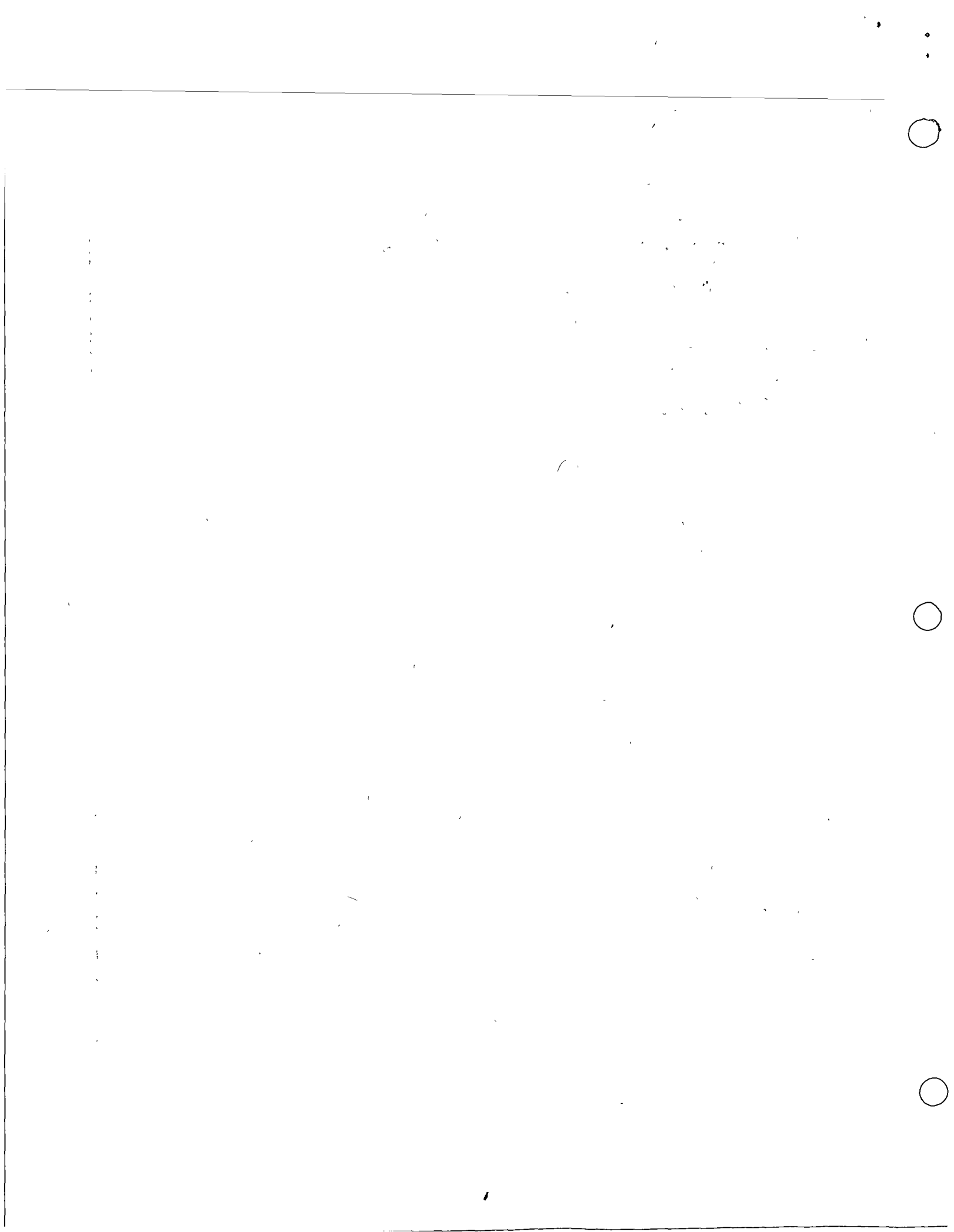
1.- MOTOBOMBA CENTRIFUGA 4 x 4'		\$ 10,534.00
2.- SOLDADORA P&H 300 AMP Y EQUIPO		\$ 43,914.00
3.- PLANTA DE LUZ 2.5 KW		\$ 13,832.00
4.- CAMIONETA FORD F-100	\$ 56,000.00	
MENOS LLANTAS 7.50 x 16 (5)	\$ 2,927.60	
	\$ 53,072.40	\$ 53,072.40
		\$ 121,352.40



Cargo adicional por metro lineal perforado por equipo adicional de perforación para control de verticalidad.

Descripción:	Precio (\$)	Vida Util ( m. l. )	Costo (\$/m.l.)
3 Estabilizadores Marca "Drilco" con cuerpo de 14.0 cm.(5 1/2") de diámetro exterior.	44,690.10	3,000	\$ 14.89
1 Lastra-Barrenas de sección cuadrada de 22.07 cm. (8 11/16")	54,022.50	2,500	21.60
1 Inclinómetro marca Sperry-Sun tipo E- C rango de 0° a 6° de desviación con barrena y amortiguador para adaptarse a cable de acero de 165 cm.	21,380.10	10,000	2.14
1 Amortiguador Marca "Drilco" (Shock - - Absorber) de acero y hule vulcanizado de 17.78 cm. (7") de diámetro.	51,476.25	2,000	25.73
			\$ 64.33 M.L.

CARGO ADICIONAL POR METRO PARA CONTROL DE VERTICALIDAD.



1.- MOTOBOMBA CENTRIFUCA 4 x 4		\$ 10,534.00
2.- SOLDADORA P&H 300 AMP Y EQUIPO		\$ 43,914.00
3.- PLANTA DE LUZ 2.5 KW		\$ 13,832.00
4.- CAMIONETA FORD F-100	\$ 56,000.00	
MENOS LLANTAS 7.50 x 16 (5)	\$ 2,927.60	
	\$ 53,072.40	\$ 53,072.40
		\$ 121,352.40



## CONCEPTO:

1.00 - Mov. de Equipo de Perforación Rot.  
hasta una distancia de 15 kms.

## DATOS:

Costo horario equipo = \$ 524.10/hr.

a).- Cargo por flete de movimiento del equipo básico hasta una distancia de 15 km. \$ 1,400.00/lote.

b).- Cargo por flete de movimiento de herramienta y equipo auxiliar hasta una distancia de 15 km. \$ 1,300.00/lote

c).- Instalación del equipo:

Tractocamión contratado en maniobras.

Costo Horario \$ 236.58/hr.

Duración de operación 8 hr.

Cargo por instalación

por Perforadora

Duración 6 Hr/Lote

\$ 1,892.64/lote

Cargo equipo = \$ 524.10/hr. x 6 Hr/Lote =

\$ 3,144.60/Lote

d).- Desmantelamiento del equipo:

Duración 3 hr.

Cargo equipo = \$ 524.10/Hr. x 3 Hr/Lote =

\$ 1,572.30/lote

COSTO DIRECTO =

\$ 9,309.54/Lote

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% =

\$ 3,723.81

PRECIO UNITARIO:-

\$ 13,033.35/Lote.

10  
9  
8





## CONCEPTO:

2.00 - Transp. de equipo de perforación rot.  
por km. subs. a los primeros kms.

Costo horario eq. de perforación = \$ 340.33/Hr.  
(cargos fijos)

Costo horario de tractocamión = \$ 236.58/Hr.

Cargo horario total = \$ 578.91/Hr.

## CONSIDERANDO:

Velocidad prom. de 10 km.

Cargo por equipo =  $\frac{\$ 576.91/\text{Hr.}}{10 \text{ Km./Hr.}}$  \$ 57.69/Km.

Cargo auxiliar por hta. y eq.  
auxiliar. = \$ 6.30/Km.

COSTO DIRECTO = \$ 63.99/Km.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 25.59

PRECIO UNITARIO:- \$ 89.58/Km.

1



## CONCEPTO:-

3.0 - Eq. de perforacion Rot. trab. en Op.  
Ord. por el Contratante., excepto --  
perforación.

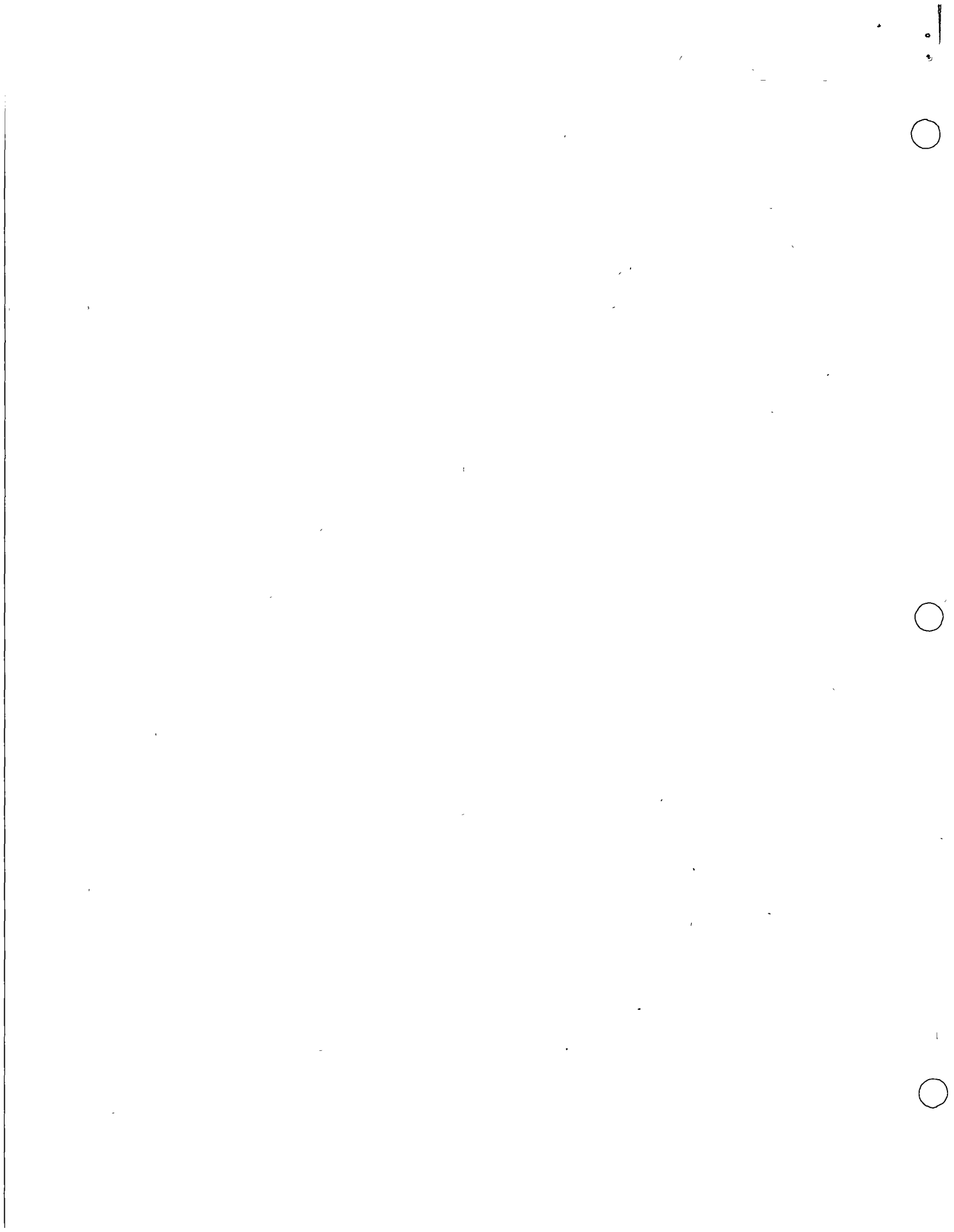
## SEGUN ANALISIS:-

Costo horario equipo = \$ 524.10/Hr.

COSTO DIRECTO = \$ 524.10/Hr.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 209.64

PRECIO UNITARIO :- \$ 733.74/Hr.



## CONCEPTO:-

4.0 - Eq. de Perf. Rot. parado en espera de órdenes del Contratante o durante fraguado de cementaciones.

## SEGUN ANALISIS DEL

Costo Horario = \$ 441.54/Hr.

COSTO HORARIO: - \$ 441.54/Hr.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 176.71

PRECIO UNITARIO = \$ 618.15/Hr.



1944



## CONCEPTO:

8.01 - PERF. DE POZO EN EQ. ROT. EN MAT. I  
DE 12"Ø COMO GUIA VERT. PARA LA CA-  
MARA DE BOMBEO DE 0 A 100 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 2.66 ML/Hr.

VIDA UTIL DE LA BARRENA = \$ 500.00 ML/Pza.

COSTO UNITARIO DE BARRENA = 13,500.00/Pza

a).- CARGO POR EQUIPO =  $\frac{\$ 524.10}{2.66 \text{ ML / Hr.}} = \$ 197.03/\text{ML}$

b).- CARGO POR BARRENA =  $\frac{\$ 13,350.00}{500 \text{ ML / Pza.}} = \$ 26.70/\text{ML}$

## POR ZARZA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82/ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LASTRA -  
BARRENA = \$ 18.53/ML

CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23/ML

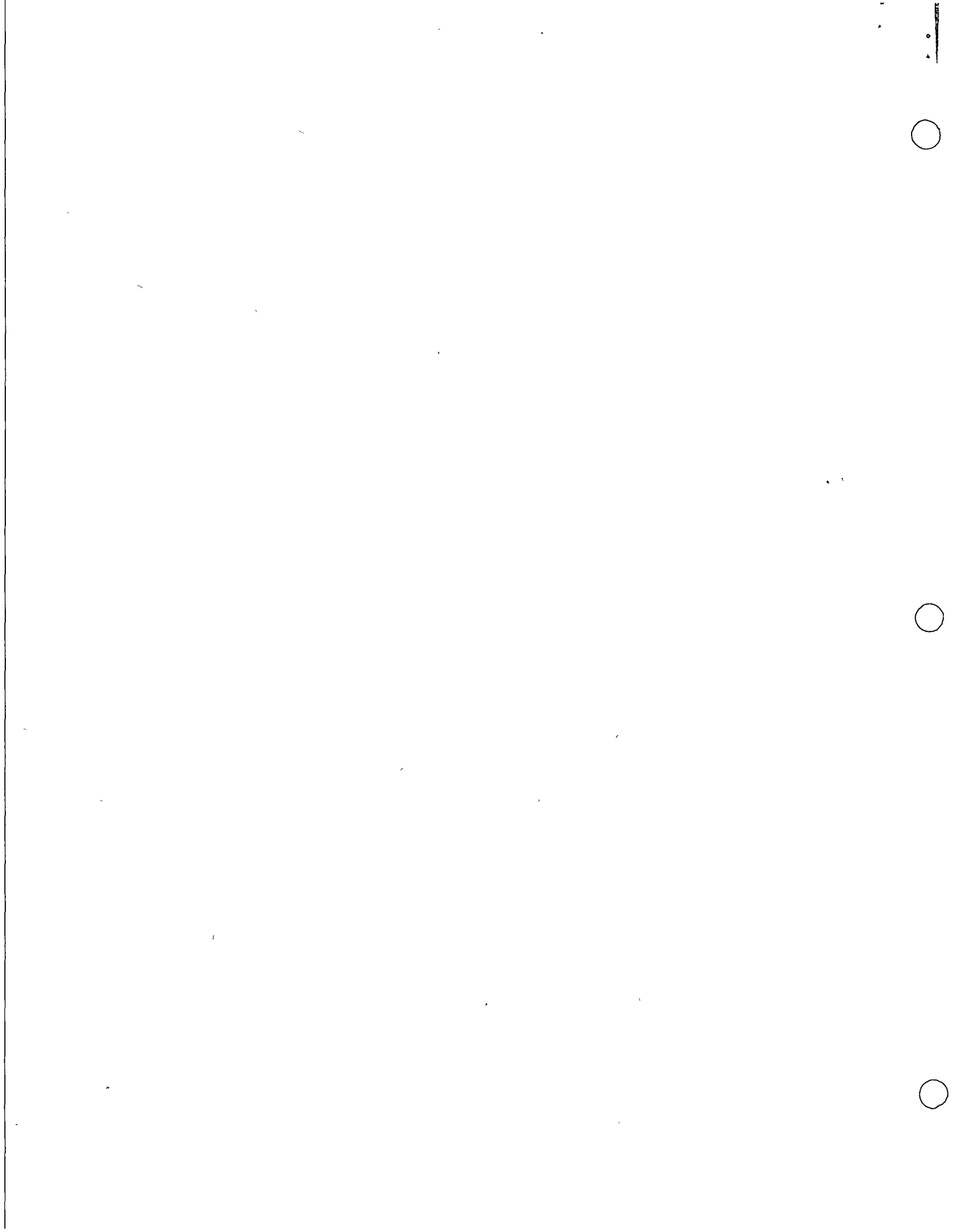
c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58/ML

d).- CARGO POR EQUIPO DE VERTICALIDAD  
( VER ANEXO GENERAL ) = \$ 64.36/ML

COSTO DIRECTO = \$ 313.67/ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 125.46

PRECIO UNITARIO = \$ 439.13/ML.





## CONCEPTO:

8.02 - PERF. DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT. I  
DE 12"Ø COMO GUIA VERT. PARA LA CAMA  
RA DE BOMBEO DE 100 A 200 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 2.66 ML/Hr.

VIDA UTIL DE LA BARRENA = 500.00 ML/Pza.

COSTO UNITARIO DE BARRENA = 13,350.00 /Pza.

a).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{2.66} \frac{\text{Hr.}}{\text{ML/Hr.}}$  = \$ 197.03 /ML

b).- CARGO POR BARRENA = \$  $\frac{13,350.00}{500} \frac{\text{Pza.}}{\text{ML/Pza.}}$  = \$ 26.70 /ML

## POR ZARZA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82 /ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LATRA -  
BARRENA = \$ 18.53 /ML

CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23 /ML

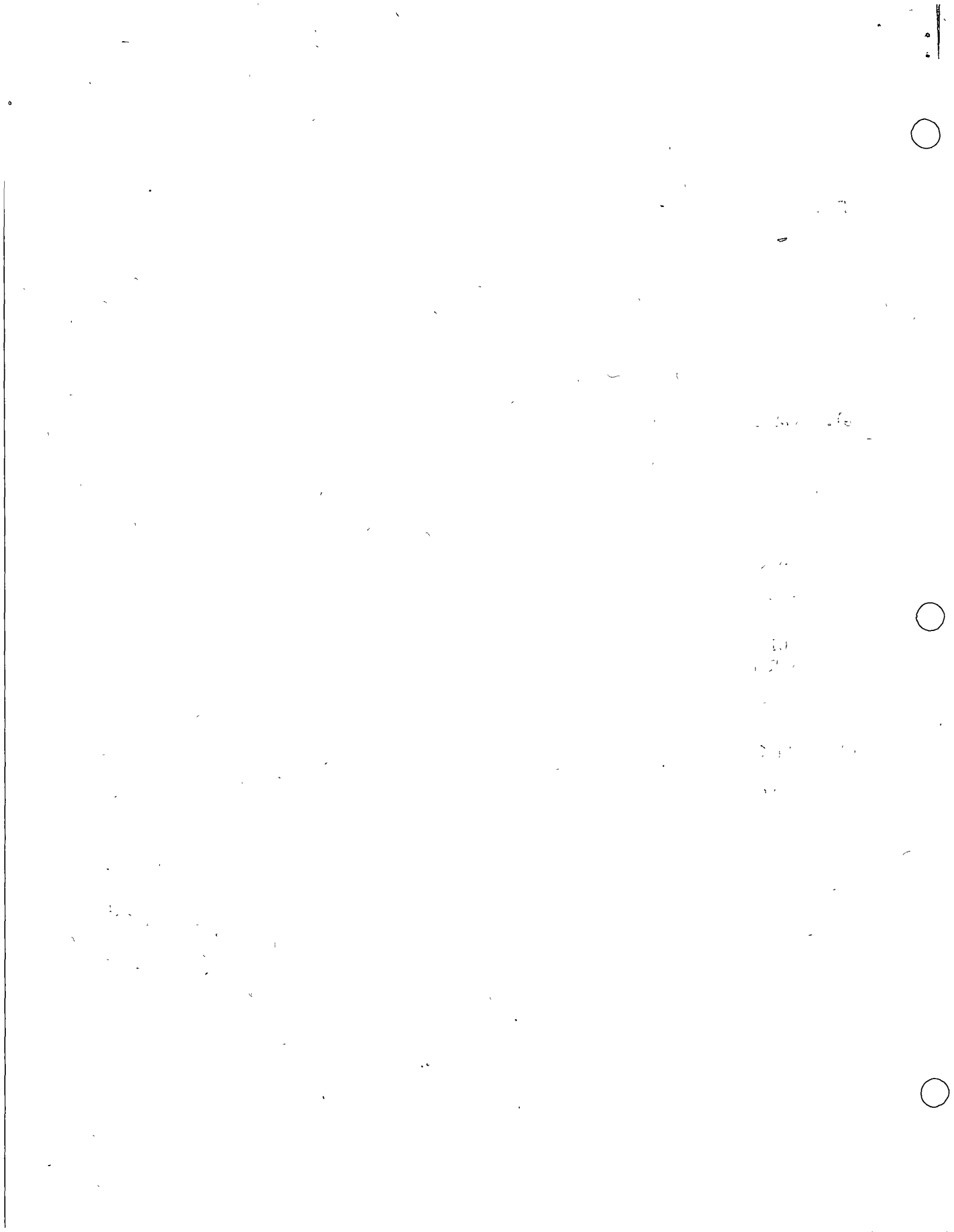
c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58 /ML

d).- CARGO POR EQUIPO DE VERTICALIDAD  
( VER ANEXO GENERAL ) = \$ 64.36 /ML

COSTO DIRECTO = \$ 313.67 /ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 125.46

PRECIO UNITARIO = \$ 439.13 /ML.



## CONCEPTO:

9.01 - PERI. DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT II  
CON 12"Ø COMO GUIA VERT. PARA LA CA-  
MARA DE BOMBEO DE 0 A 100 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 0.54 ML/Hr.

VIDA UTIL DE LA BARRENA = 500.00ML/Pza.

COSTO UNITARIO DE BARRENA = 13,350.00 /Pza.

a).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{0.53 \text{ ML/Hr.}}$  = \$ 970.55 /ML

b).- CARGO POR BARRENA = \$  $\frac{13,350.00}{500 \text{ ML/Pza.}}$  = \$ 26.70 /ML

## POR ZARTA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82 /ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LAS --  
TRA BARRENA = \$ 18.53 /ML

CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23 /ML

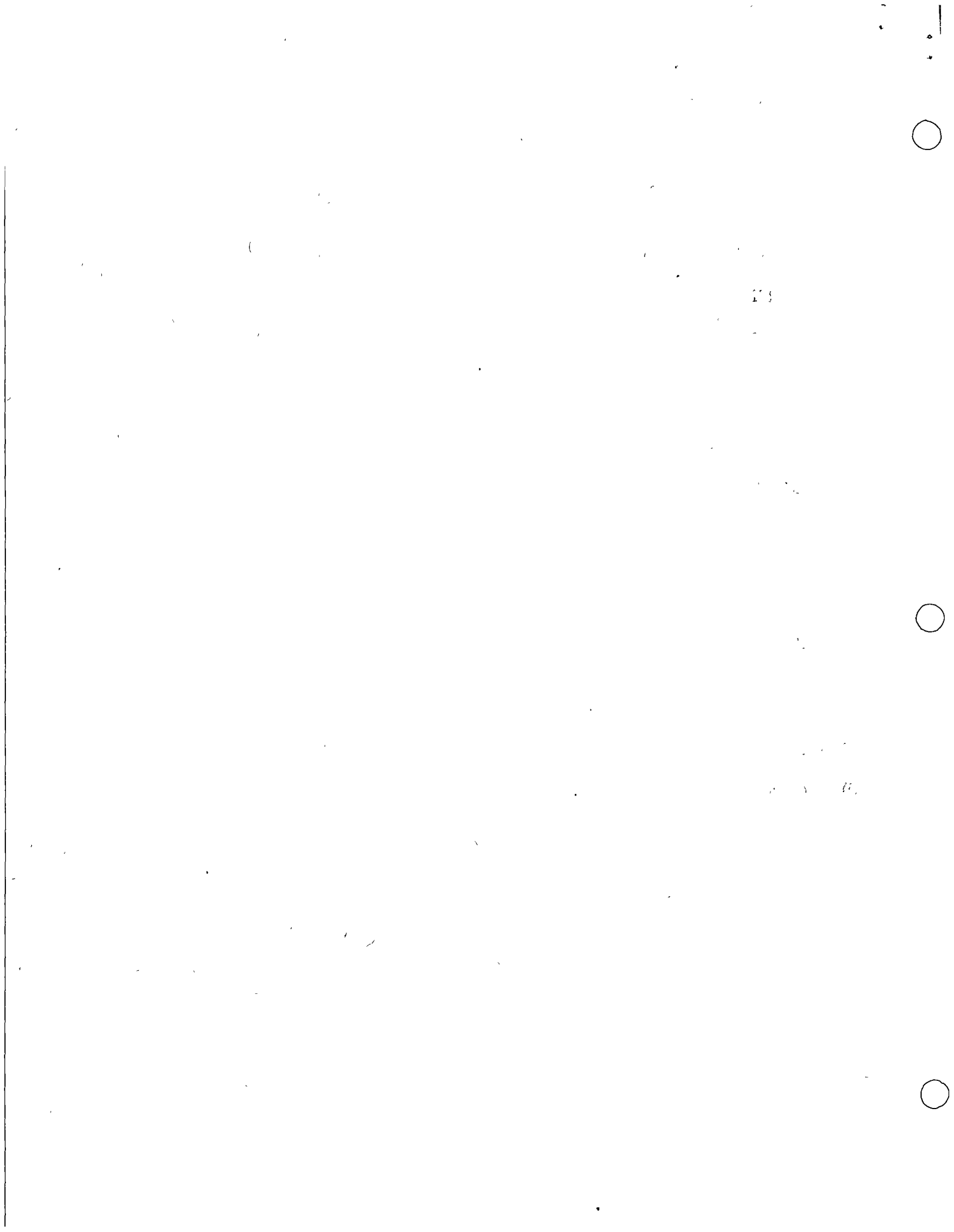
c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58 /ML

d).- CARGO POR EQUIPO DE VERTICALIDAD = \$ 64.36 /ML  
( VER ANEXO GENERAL )

COSTO DIRECTO = \$ 1,087.19 /ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 434.87

PRECIO UNITARIO = \$ 1,522.06 /ML.



## CONCEPTO:

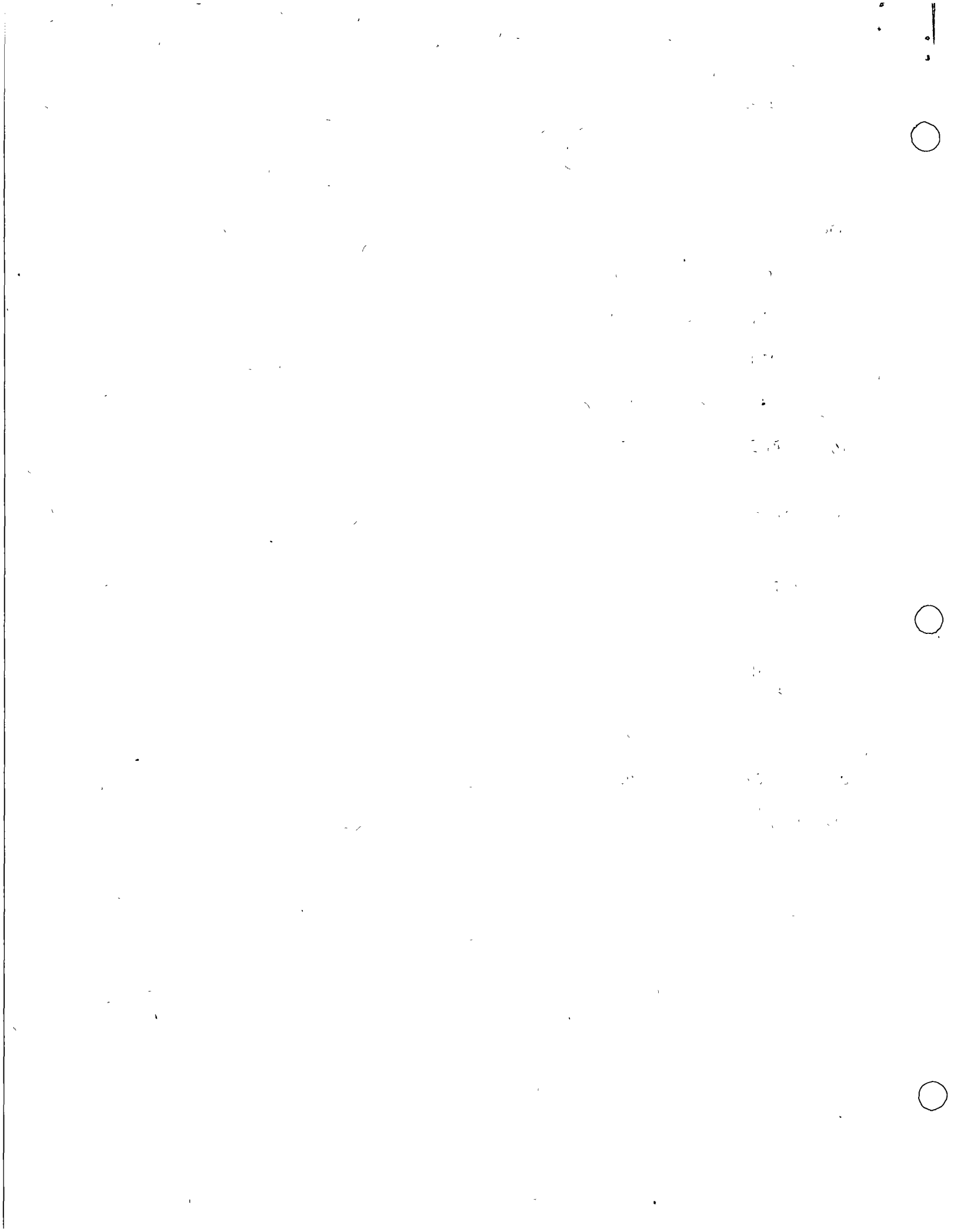
9.01 - PERI. DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT II  
 CON 12"Ø COMO GUIA VERTICAL PARA LA-  
 CAMARA DE BOMBEO DE 0 A 100 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO	=	\$ <u>524.10</u> /Hr.	
RENDIMIENTO DE PERFORACION	=	\$ <u>0.54</u> ML/Hr.	
VIDA UTIL DE LA BARRENA	=	500.00 ML/Pza.	
COSTO UNITARIO DE BARRENA	=	13,350.00 /Pza.	
a).- CARGO POR EQUIPO	=	\$ $\frac{524.10}{0.53 \text{ ML/Hr.}}$ /Hr. =	\$ 970.55 /ML
b).- CARGO POR BARRENA	=	\$ $\frac{13,350.00}{500 \text{ ML/Hr.}}$ =	\$ 26.60 /ML

## POR ZARZA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE	=	\$ 5.82 /ML	
TUBERIA DE PERFORACION Y LAS- TRA BARRENA	=	\$ 18.53 /ML	
CABLE DE PERFORACION	=	\$ 1.23 /ML	
c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION	=	\$ 25.58 /ML	
d).- CARGO POR EQUIPO DE VERTICALIDAD ( VER ANEXO GENERAL )	=	\$ 64.36 /ML	
COSTO DIRECTO	=	\$ 1,087.19 /ML	
INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%	=	\$ 434.87	
PRECIO UNITARIO	=	\$ 1,522.06 /ML.	

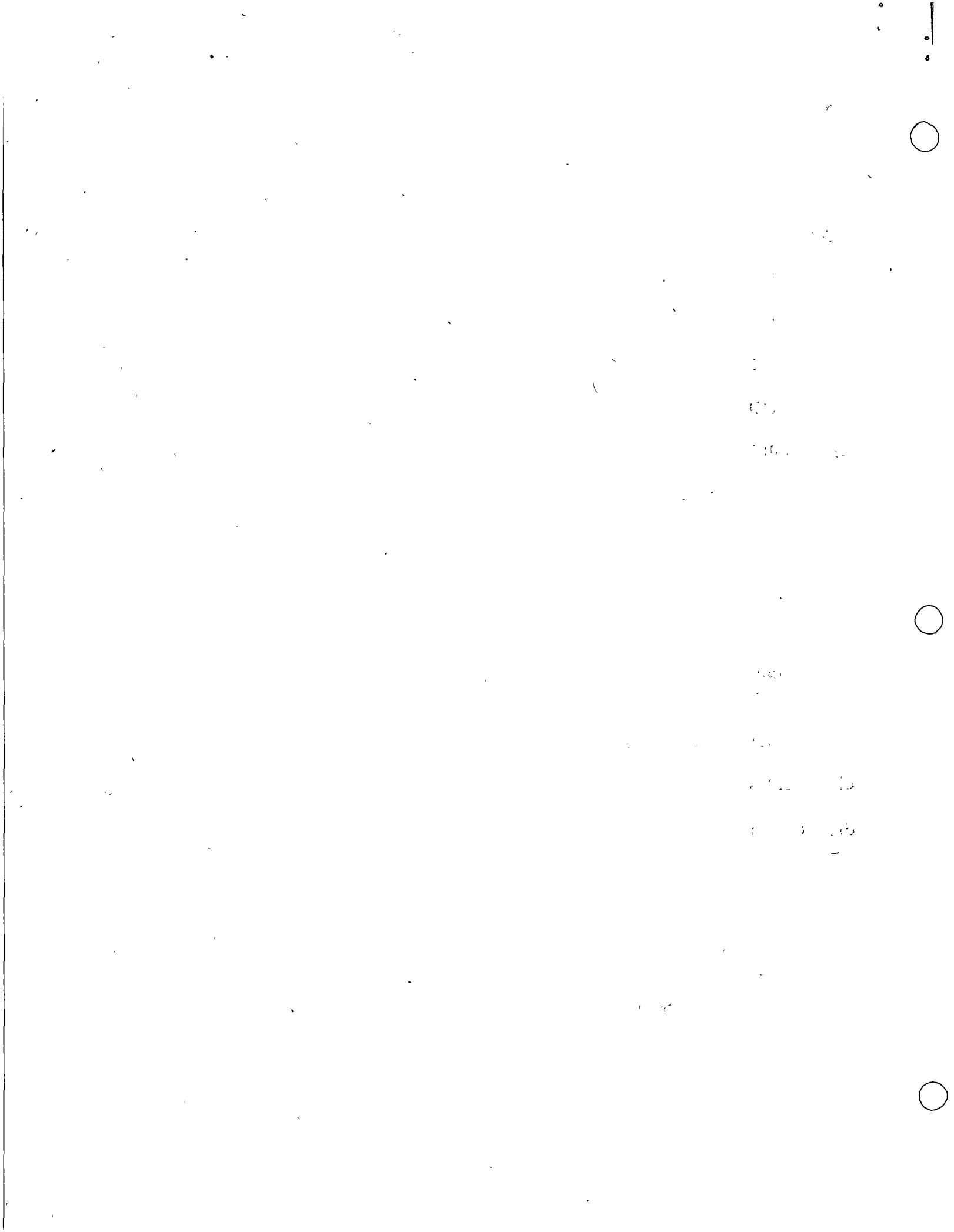


## CONCEPTO:

9.02 - PERFORACION DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT. II  
DE 12"Ø COMO GUIA VERT. PARA LA CAMA  
RA DE BOMBEO DE 100 A 200 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO	= \$	524.10	/Hr.	
RENDIMIENTO DE PERFORACION	= \$	0.54	ML/Hr.	
VIDA UTIL DE LA BARRENA	=	500.00	ML/Pza.	
COSTO UNITARIO DE BARRENA	=	13,350.00	/Pza.	
a).- CARGO POR EQUIPO	=	$\frac{\$ 524.10}{0.53}$	$\frac{\text{ML/Hr.}}{\text{ML/Hr.}}$	= \$ 970.55 /ML
b).- CARGO POR BARRENA	=	$\frac{\$ 13,350.00}{500}$	$\frac{\text{ML/Pza.}}{\text{ML/Pza.}}$	= \$ 26.70 /ML
POR ZARZA DE PERFORACION				
PARTES ADICIONALES DE ATAQUE	= \$	5.82	/ML	
TUBERIA DE PERFORACION Y LAS- TRA BARRENA	= \$	18.53	/ML	
CABLE DE PERFORACION	= \$	1.23	/ML	
c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION	=			\$ 25.58 /ML
d).- CARGO POR EQUIPO DE VERTICALIDAD ( VER ANEXO GENERAL )	=			\$ 64.36 /ML
COSTO DIRECTO	=			\$ 1,087.19 /ML
INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%	=			\$ 434.87
PRECIO UNITARIO	=			\$ 1,522.06 /ML.





## CONCEPTO:

8.03 - PERI. DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT. I  
DE 12"Ø DE 200 A 300 MTS. DE PROFUN-  
DIDAD.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 1.95 ML/Hr.

VIDA UTIL DE LA BARRENA = 500.00 ML/Pza.

COSTO UNITARIO DE BARRENA = 13,350.00 /Pza.

a).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{1.95 \text{ ML/Hr.}}$  = \$ 268.77 /ML

b).- CARGO POR BARRENA = \$  $\frac{13,350.00}{500 \text{ ML/Pza.}}$  = \$ 26.70 /ML

## POR ZARZA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82 /ML.

TUBERIA DE PERFORACION Y LAS-  
TRA BARRENA = \$ 18.53 /ML

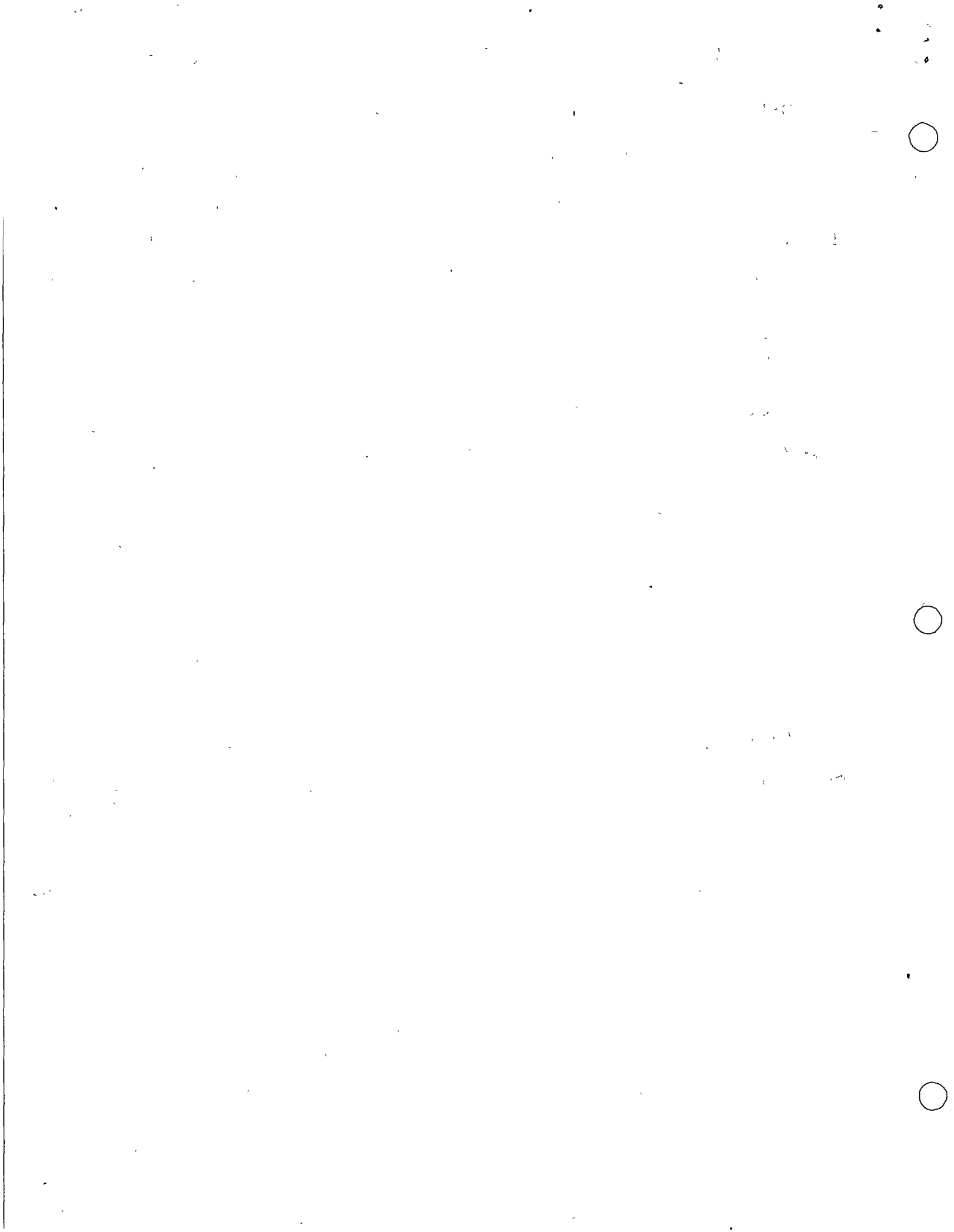
CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23 /ML

c).- CARCO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58 /ML

COSTO DIRECTO = \$ 321.05 /ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 128.42 /ML

PRECIO UNITARIO = \$ 449.47 /ML.



## CONCEPTO:

9.03 - PERF. DE POZO CON L.O. ROT. EN MAT II  
DE 12"Ø DE 200 A 300 MTS. DE PROFUN-  
DIDAD.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.  
RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 0.48 ML/Hr.  
VIDA UTIL DE LA BARRENA = 500.00 ML/Pza.  
COSTO UNITARIO DE BARRENA = \$ 13,350.00 /Pza.

a).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{0.48 \text{ ML/Hr.}}$  = \$ 1,091.88/ML

b).- CARGO POR BARRENA = \$  $\frac{13,350.00}{500 \text{ ML/Pza.}}$  = \$ 26.70/ML

## POR ZARTA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82 /ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LAS-  
TRA BARRENA = \$ 18.53 /ML

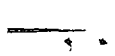
CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23 /ML.

c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58/ML

COSTO DIRECTO = \$ 1,144.16/ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 457.66

PRECIO UNITARIO = \$ 1,601.82/ML.



## CONCEPTO:

10.01 - PERF. DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT III  
DE 12"Ø COMO GUIA VERT. PARA LA CAMA  
RA DE BOMBEO DE 0 A 100 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 0.38 ML/Hr.

VIDA UTIL DE LA BARRENA = \$ 500.00 ML/Pza.

COSTO UNITARIO DE BARRENA = \$ 13,350.00 /Pza.

a).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{0.38 \text{ ML/Hr.}}$  = \$ 1,379.21/ML

b).- CARGO POR BARRENA = \$  $\frac{13,350.00}{500 \text{ ML/Pza.}}$  = \$ 26.70/ML

## POR ZARTA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82 /ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LAS-  
TRA BARRENA = \$ 18.53 /ML

CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23 /ML

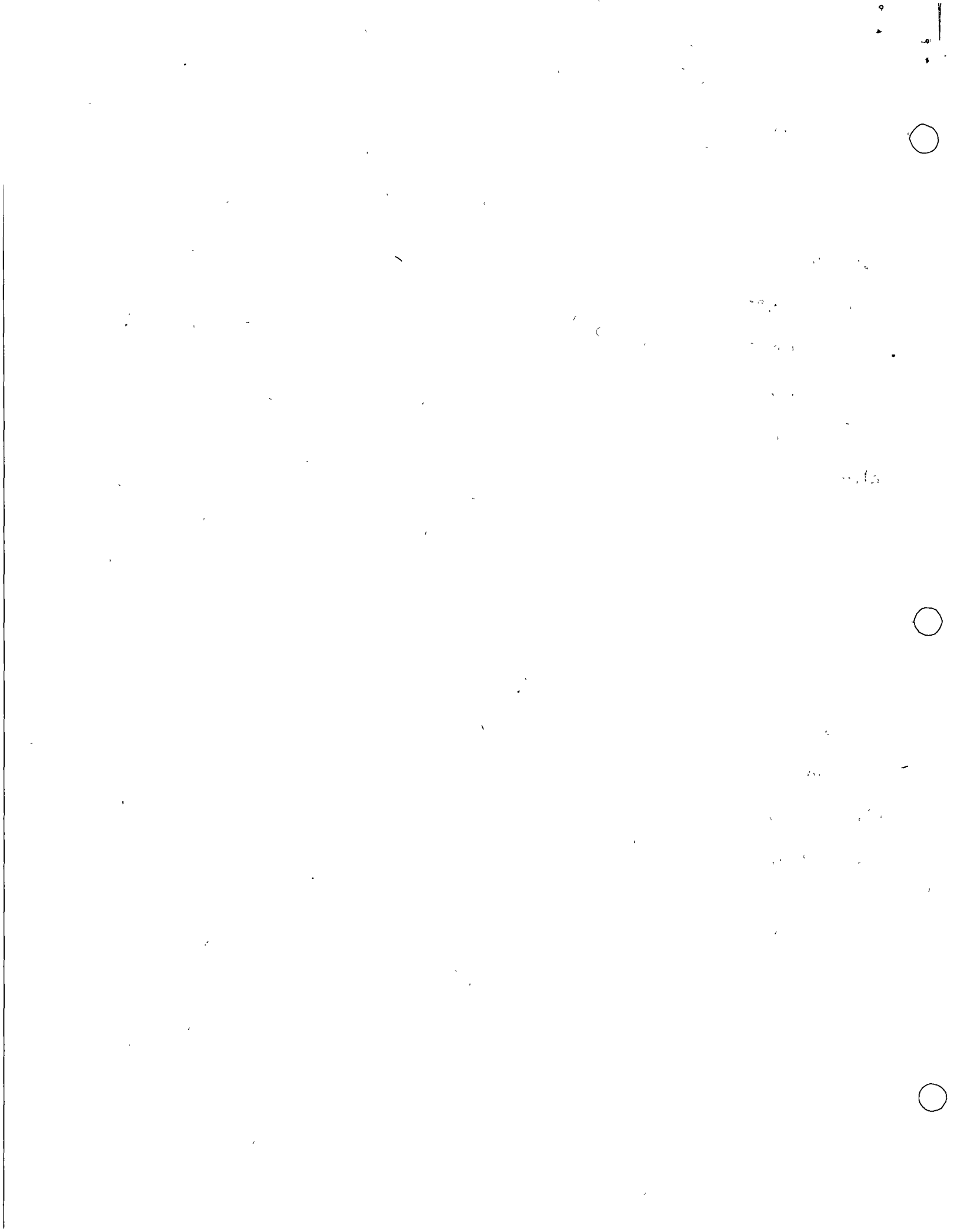
c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58/ML

d).- CARGO POR EQUIPO DE VERTICALIDAD  
( VER ANEXO GENERAL ) = \$ 64.36/ML

COSTO DIRECTO = \$ 1,495.85/ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% = \$ 598.34

PRECIO UNITARIO = \$ 2,094.19/ML



## CONCEPTO:

10.03 - PERF. DE POZO CON EQ. ROT. EN MAT. III  
DE 12"Ø COMO GUIA VERTICAL PARA LA CA-  
MARA DE BOMBEO DE 200 A 300 MTS.

## DATOS:

COSTO HORARIO DEL EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO DE PERFORACION = \$ 0.36 ML/Hr.

VIDA UTIL DE LA BARRENA = \$ 500.00 ML/Pza.

COSTO UNITARIO DE BARRENA = \$ 13,350.00 /Pza.

a).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{0.36 \text{ ML/Hr.}}$  = \$ 1,455.83/ML

b).- CARGO POR BARRENA = \$  $\frac{13,350.00}{500 \text{ ML/Hr.}}$  = \$ 26.70/ML

## POR ZARZA DE PERFORACION

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE = \$ 5.82/ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LASTRA BARRENA = \$ 18.53/ML

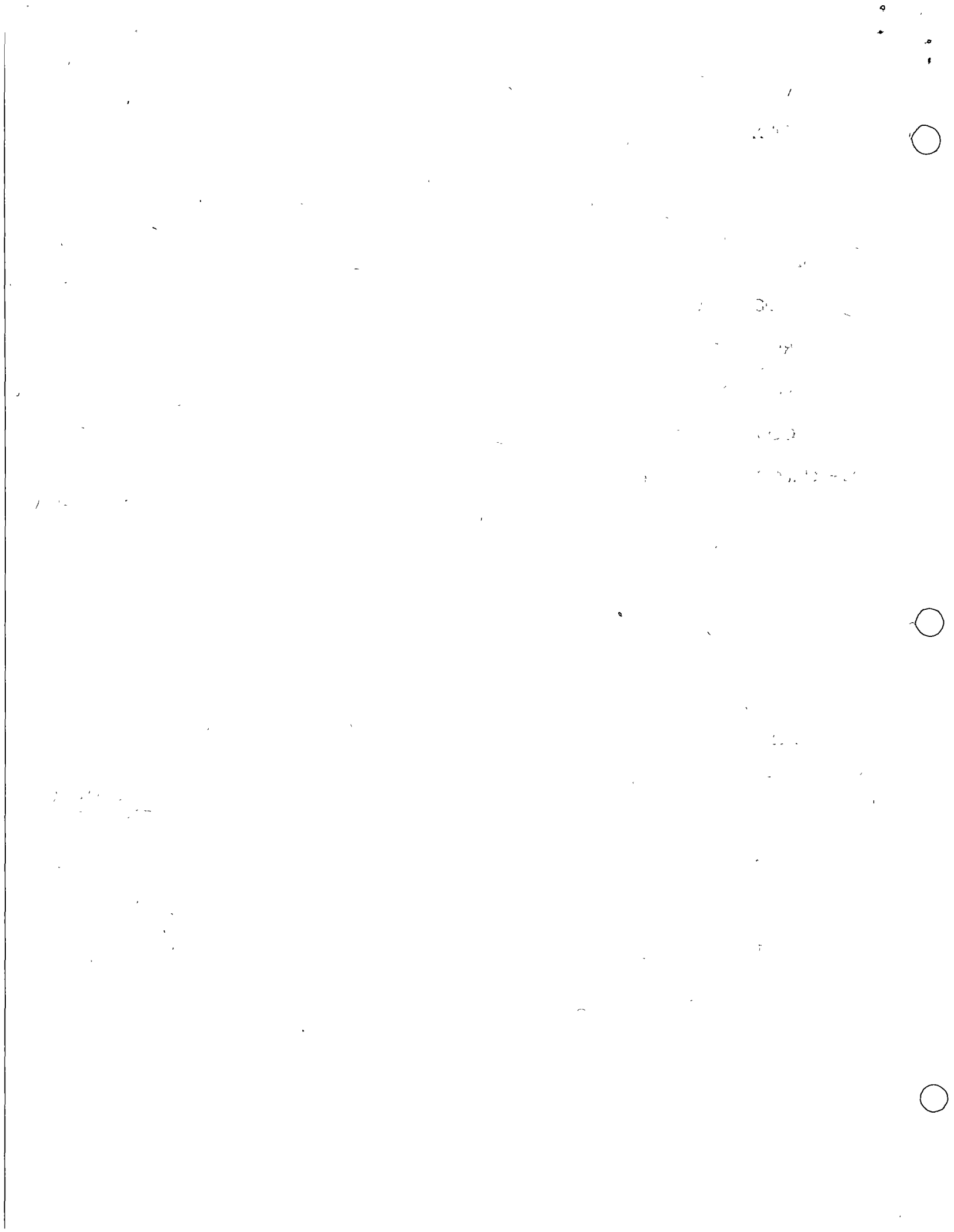
CABLE DE PERFORACION = \$ 1.23/ML

c).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION = \$ 25.58/ML

COSTO DIRECTO = \$ 1,508.11/ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD = 603.24

PRECIO UNITARIO = \$ 2,111.35/ML.





CONCEPTO:

16.01 - AMP. DE AGUJERO CON EQ. ROT. EN MAT  
DE 12" a 17 1/2" Ø DE 100 MTS. DE PROF.

DATOS:

COSTO DE LA BARRENA PILOTO \$ 30,000.00 /Pza.

VIDA UTIL 3,500.00 ML/Pza.

a).- CARGO POR BARRENA PILOTO = \$  $\frac{30,000.00}{3,500.00}$  /Pza. = \$ 8.57/ML.

CARGO POR CORTADORES = \$  $\frac{17,500.00}{500}$  /Pza.  
VIDA UTIL ML/Pza.

b).- CARGO POR CORTADORES = \$  $\frac{17,500.00}{500}$  /Pza. = \$ 35.00/ML

COSTO HORARIO EQUIPO = \$ 524.10 /Hr.

RENDIMIENTO = 3.29ML/Hr.

c).- CARGO POR EQUIPO = \$  $\frac{524.10}{3.29}$  /Hr. = \$ 159.30/ML

POR ZARTA DE PERFORACION.

PARTES ADICIONALES DE ATAQUE \$ 5.82 /ML

TUBERIA DE PERFORACION Y LAS-  
TRA BARRENAS \$ 18.53 /ML

CABLE DE PERFORACION \$ 1.23 /ML

d).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION \$ 25.58/ML

COSTO DIRECTO \$ 228.45/ML

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% \$ 91.38

PRECIO UNITARIO \$ 319.83/ML.



1000

1000

1000

1000

1000



1000

1000

1000

1000

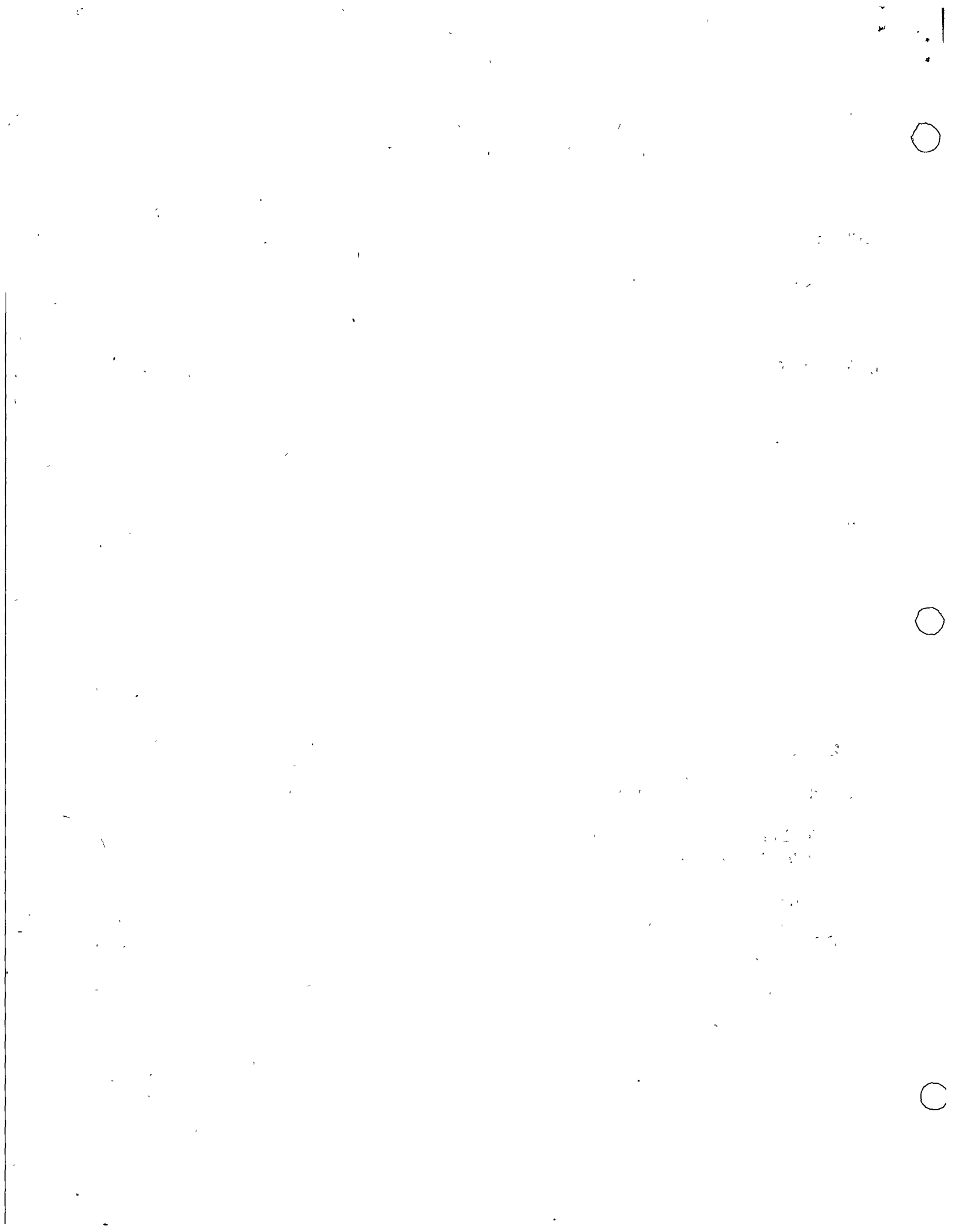


## CONCEPTO:

17.03 - AMP. DEL AGUJERO CON EQ. ROT. EN MAT  
II DE 12"Ø a 17 1/2"Ø DE 200 A 300 MTS.  
DE PROFUNDIDAD.

## DATOS:

COSTO DE LA BARRENA PILOTO	\$ 30,000.00	/Pza.	
VIDA UTIL	3,500.00	ML/Pza.	
a).- CARGO POR BARRENA PILOTO	\$ $\frac{30,000.00}{3,500.00}$	/Pza. =	\$ 8.57/ML
CARGO POR CORTADORES	\$ 17,500.00	/Pza.	
VIDA UTIL	500.00	ML/Pza.	
b).- CARGO POR CORTADORES	\$ $\frac{17,500.00}{500}$	/Pza. =	\$ 35.00/ML
COSTO HORARIO EQUIPO	\$ 524.10	/Hr.	
RENDIMIENTO	1.33	ML/Pza.	
c).- CARGO POR EQUIPO	\$ $\frac{524.10}{1.33}$	/Hr. =	\$ 394.06/ML
POR ZARTA DE PERFORACION			
PARTES ADICIONALES DE ATAQUE	\$ 5.82	/ML	
TUBERIA DE PERFORACION Y LAS TRA BARRENAS	\$ 18.53	/ML	
CABLE DE PERFORACION	\$ 1.23	/ML	
d).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION			\$ 25.58/ML
COSTO DIRECTO			\$ 463.21/ML
INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%			\$ 185.28
PRECIO UNITARIO			\$ 648.49/ML

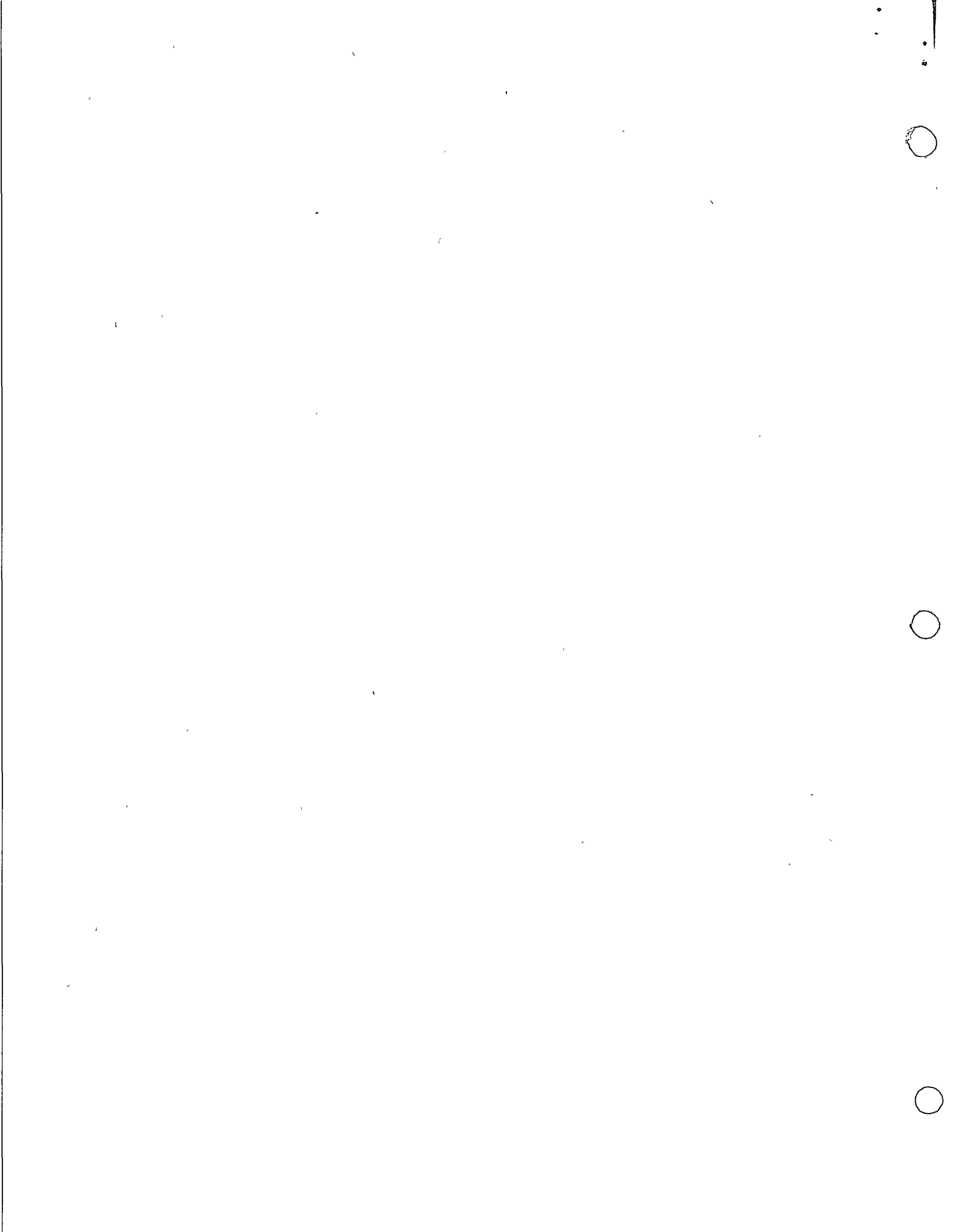


## CONCEPTO:

22.01 - AMP. DEL AGUJERO CON EQ. ROT. EN MAT. I  
DE 17 1/2" a 24"Ø DE 0 A 100 MTS. DE PRO-  
FUNDIDAD.

## DATOS:

COSTO DE LA BARRENA PILOTO	\$ 30,000.00	/Pza.	
VIDA UTIL	3,500.00	ML/Pza.	
a).- CARGO POR BARRENA PILOTO	\$ <u>30,000.00</u>	/Pza. =	\$ 8.57/ML
	3,500.00	ML/Pza.	
CARGO POR CORTADORES	\$ <u>17,500.00</u>	/Pza.	
	500	ML/Pza.	
b).- CARGO POR CORTADORES	\$ <u>17,500.00</u>	/Pza. =	\$ 35.00/ML
	500	ML/Pza.	
COSTO HORARIO EQUIPO	\$ <u>524.10</u>	/Hr.	
RENDIMIENTO	<u>3.14</u>	ML/Hr.	
c).- CARGO POR EQUIPO	\$ <u>524.10</u>	/ Hr. =	\$ 166.91/ML
	3.14	ML/Hr.	
POR ZARTA DE PERFORACION			
PARTES ADICIONALES DE ATA - QUE	\$	5.82/ML	
TUBERIA DE PERFORACION Y LAS TRA BARRENAS	\$	18.53/ML	
CABLE DE PERFORACION	\$	1.23/ML	
d).- CARGO POR TUBERIA DE PERFORACION			\$ <u>25.58/ML</u>
COSTO DIRECTO			\$ 236.06/ML
INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%			\$ <u>94.42</u>
PRECIO UNITARIO			\$ 330.48/ML.



## CONCEPTO:

39.05 - COLOC. DE TUBERIA DE ACERO PARA ADEME SOLD.  
JUNTAS CON DOBLE CORDON AL ARCO ELECTRICO -  
DE 12"Ø x 5/16 DE ESPESOR.

COSTO HORARIO EQUIPO = \$ 524.10/hr.  
= \$ 8.74/minuto  
COSTO SOLDADURA = \$ 22.50/Kg.

ANALISIS POR JUNTA.

EQUIPO: TIEMPO EN MANIOBRAS = 12.0 MIN.  
TIEMPO EN SOLDAR = 13.0 MIN.  
25.0 MIN

## MATERIALES:

CONSUMOS SOLDADURA = 0.89 KG.  
MERMAS Y DESPERDICIOS = 0.08 KG.  
0.97 KG.

ANALISIS POR OCHO JUNTAS:

Equipo 8 x 25 Min. = 200 Min.  
Materiales 8 x 0.97 Kg. = 7.76 Kg.

ANALISIS POR METRO DE TUBERIA:

Equipo:  $\frac{200 \text{ Min}}{54 \text{ Mts.}} = 3.70 \text{ Min./Mt.}$

Materiales:  $\frac{7.76 \text{ Kg}}{54 \text{ Mts.}} = 0.14 \text{ Kg./Mt.}$

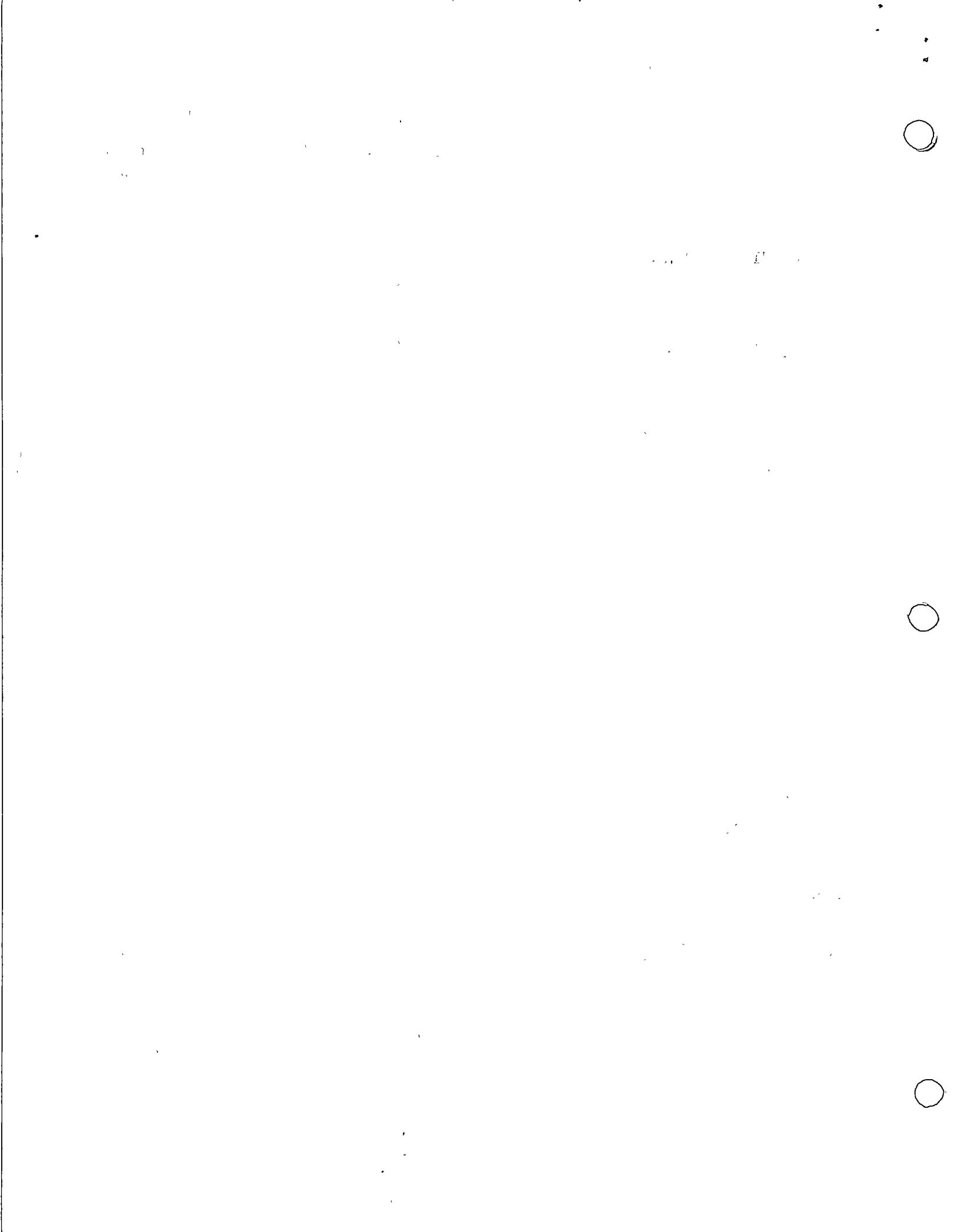
COSTO POR METRO DE TUBERIA:

Equipo: 3.70 Min./mt. x \$ 8.74 / Min. = \$ 32.34/Mt.  
Materiales: 0.14 Kg./Mt. x \$ 22.40 /Kg. = \$ 3.15/Mt.

COSTO DIRECTO \$ 35.49/Mt.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% 14.20

PRECIO UNITARIO \$ 49.69/Mt.





## CONCEPTO:

39.12 - COLOC. DE TUBERIA DE ACERO PARA ADEME SOLD.  
JUNTAS CON DOBLE CORDON AL ARCO ELECTRICO -  
DE 26"Ø x 5/16" DE ESPESOR.

COSTO HORARIO EQUIPO	=	\$ 524.10/Hr.
	=	\$ 8.74/Min.
COSTO SOLDADURA	=	\$ 22.50/Kg.

ANALISIS POR JUNTA:

Equipo:	Tiempo en maniobras	=	22.3 Min.
	Tiempo en soldar	=	26.5 Min.
			<u>48.8 Min.</u>

## Materiales;

	Consumos soldadura	=	1.38 Kg.
	Mermas y desperdicios	=	0.13 Kg.
			<u>1.51 Kg.</u>

ANALISIS POR OCHO JUNTAS:

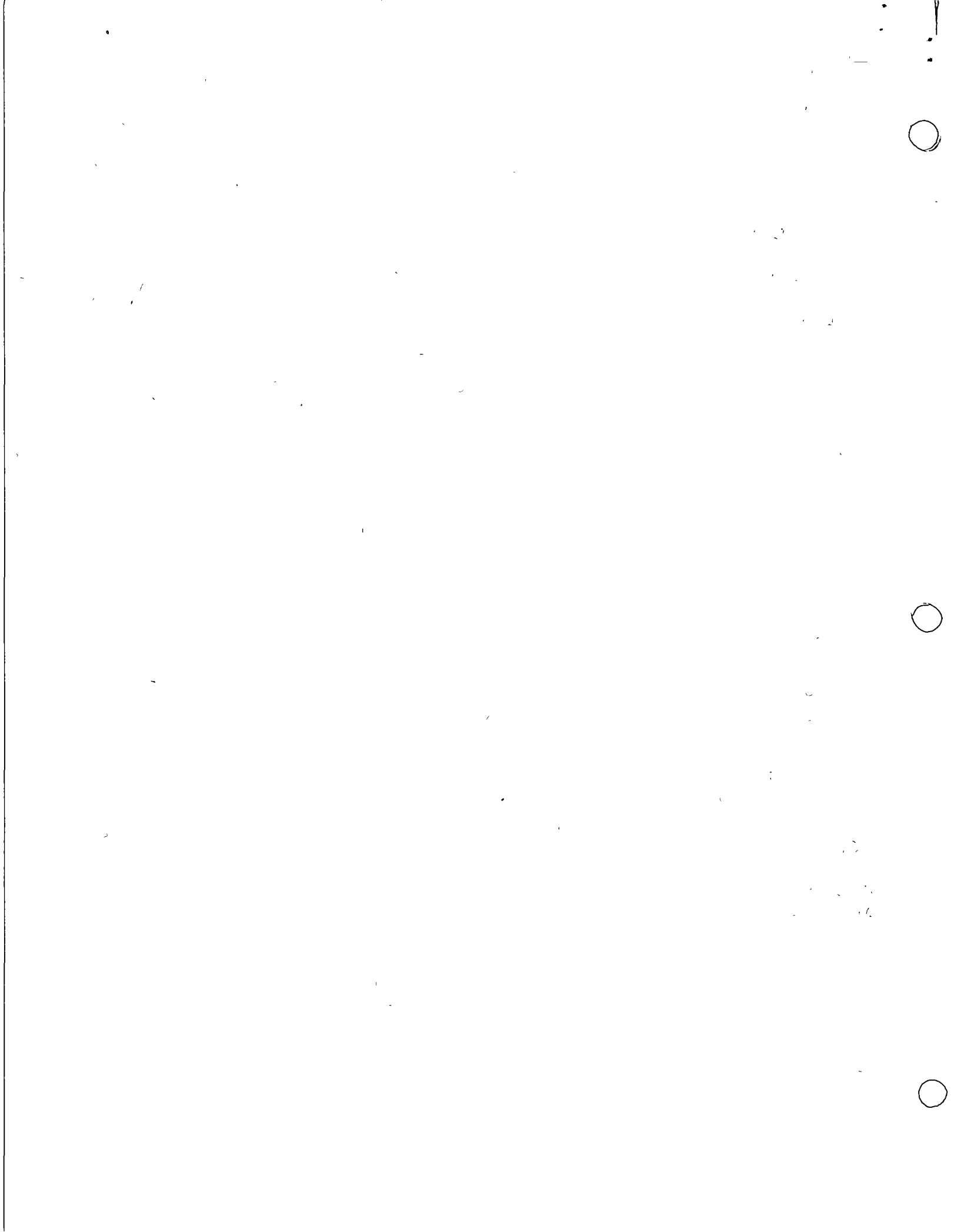
Equipo:	8 x 48.8 Min.	=	390.4 Min.
Materiales:	8 x 1.15 Kg.	=	12.08 Kg.

ANALISIS POR METRO DE TUBERIA:

Equipo:	$\frac{390.4 \text{ Min.}}{54 \text{ Mts.}}$	=	7.23 Min./Mt.
Materiales:	$\frac{12.08 \text{ Kg.}}{54 \text{ Mts.}}$	=	0.22 Kg./Mt.

COSTO POR METRO DE TUBERIA:

Equipo:	7.23 Min./Mt. x \$8.74/Min.	=	\$ 63.19/Mt.
Materiales:	0.22 Kg/Mt, x \$ 22.50 /Kg.	=	4.95/Mt.
			<u>68.14/Mt.</u>
	COSTO DIRECTO	=	\$ 68.14/Mt.
	INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%	=	27.26
			<u>95.40/Mt.</u>
	PRECIO UNITARIO		\$ 95.40/Mt.



## CONCEPTO:

46.20 CEMENTACION TUBERIA DE 26 " Ø  
EN PERFORACION DE 34 " Ø

## DATOS:

Vol. del espacio anular	=	110 lts/ml.
40% irregularidades	=	<u>44</u>
Vol. Total	=	154 lt/ml.

## a).- Lechada

1 saco = 46 lts. lechada

cemento necesario =  $\frac{154 \text{ lt/m.}}{46}$  = 3.35 sacos

3.35 sacos x 50 Kg/ saco =

167.50 Kg

valor cemento = 0.63/ Kg.

Cargo por cemento = 0.63/Kg x \$ 67.50 Kg. =

\$ 105.52/mt.

## b).- Cargo por agua y mano de obra =

13.60/mt.

## c).- Cargo fijo por equipo =

24.62/mt.

COSTO DIRECTO =

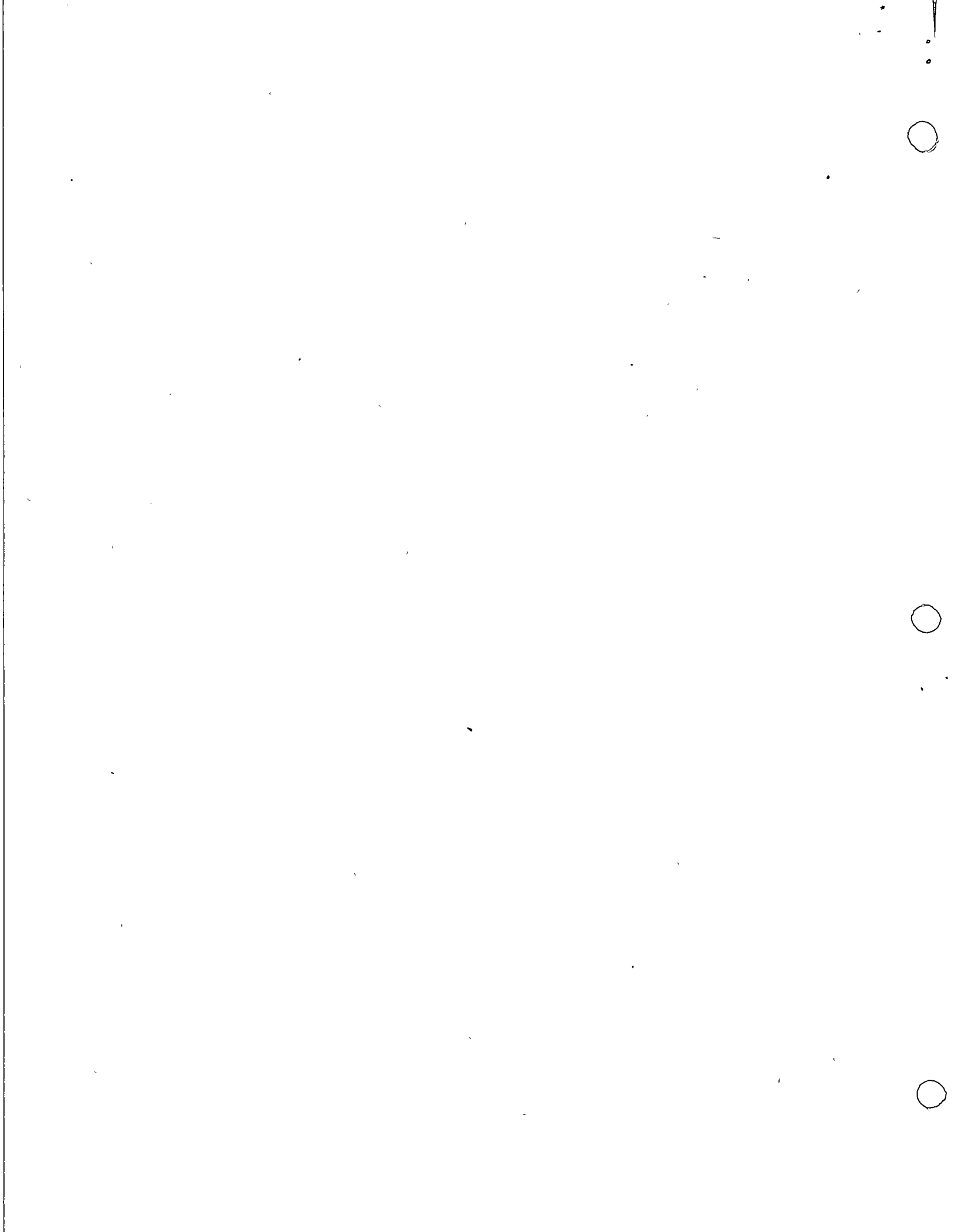
\$ 143.74/mt.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% =

57.49

PRECIO UNITARIO =

\$ 201.23/Mt.



## CONCEPTO:

48.00 - LODO DE PERFORACION CON AGUA DULCE  
Y BENTONITA.

VALOR DE ADQUISICION: = \$ 680.00/Ton.

a).- Por materiales:

Bentonita 60 Kg. x m<sup>3</sup> de agua

Cargo por materiales = 60 Kg./m<sup>3</sup> x \$0.63/kg = \$ 37.80/m<sup>3</sup>

b).- Por equipo:

Costo horario equipo = \$ 524.10/Hr.

Calculado sobre el vol. por presas de 24 m<sup>3</sup>  
tiempo por mezclado y preparación 2.35 hr.

Cargo por equipo =  $\frac{\$524.10/\text{Hr.} \times 2.35 \text{ Hrs.}}{24 \text{ m}^3}$  = \$ 51.30/m<sup>3</sup>

COSTO DIRECTOR \$ 89.10/m<sup>3</sup>

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40% \$ 35.64

PRECIO UNITARIO \$ 124.74/m<sup>3</sup>



## CONCEPTO:

52.11 - SUMINISTRO DE GRAVA EN DIFERENTES DIA  
METROS DE 26"Ø A 16"Ø.

a).- Por materiales:

$$\begin{array}{rcl} \text{Vol. de espacio anular} & = & 0.16 \text{ m}^3/\text{ml.} \\ \text{mermas y desperdicio 40 \%} & = & \frac{0.06}{0.22 \text{ m}^3/\text{ml.}} \\ \text{VOL TOTAL} & = & \end{array}$$

$$\text{Valor de adquisición} = \$ 165.00/\text{m}^3$$

ASI:

$$\text{Cargo por materiales} = 0.22 \text{ m}^3/\text{ml} \times \$165.00/\text{m}^3 = \$ 36.30/\text{m.}$$

$$\text{b).- Cargo fijo por fletes por m}^3 = \$ 1.63/\text{m.}$$

c).- Por equipo.

$$\text{Costo horario equipo} = \$ 524.10/\text{Hr.}$$

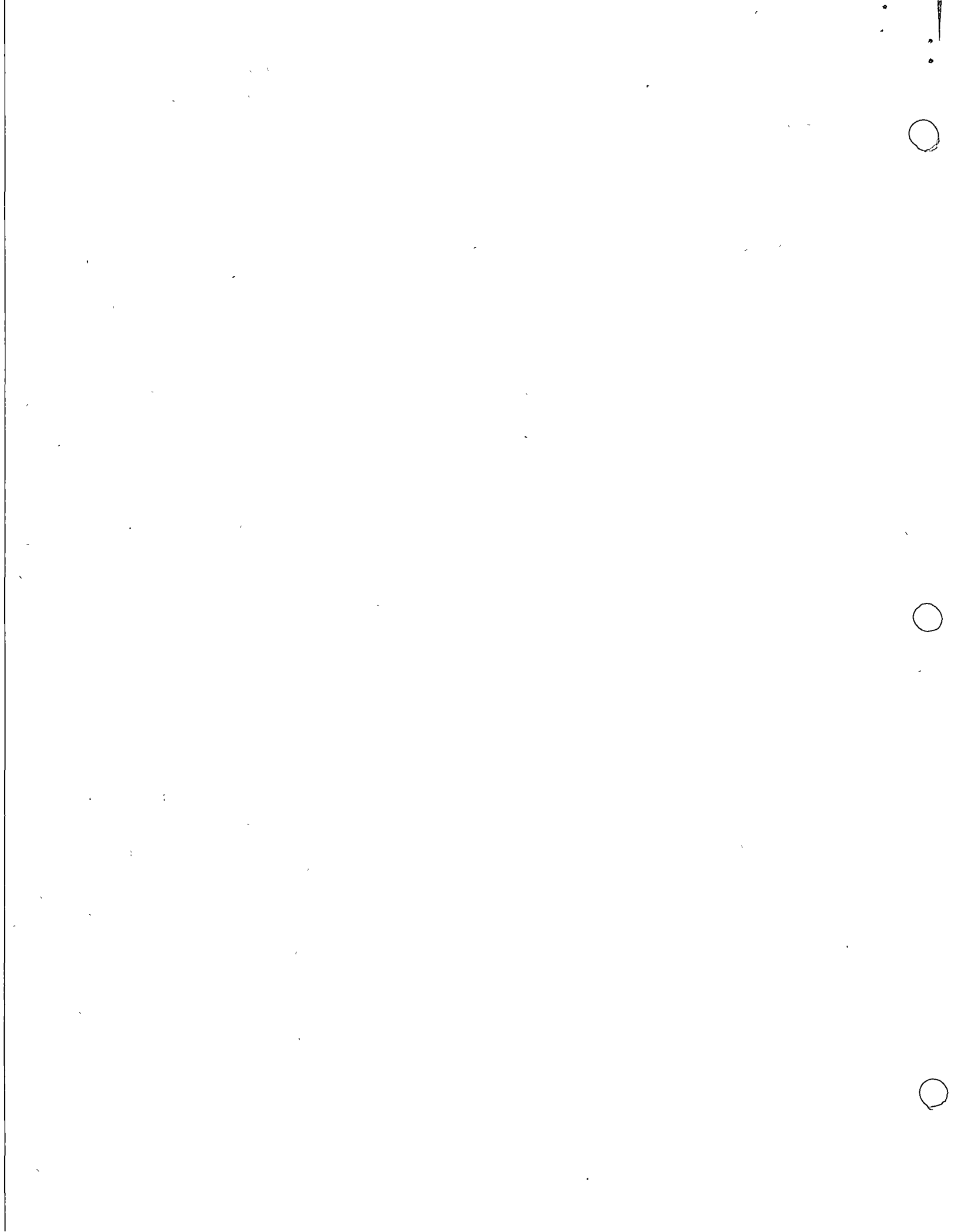
$$\text{Rendimiento} = 0.012 \text{ hr}/\text{m.}$$

$$\begin{array}{rcl} \text{Cargo por equipo} = & & \\ \$ 524.10/\text{Hr.} \times 0.012 \text{ Hr.}/\text{m} = & & \underline{\$ 6.28/\text{m.}} \end{array}$$

$$\text{COSTO DIRECTO} = \$ 44.21/\text{m.}$$

$$\text{INDIRECTOS Y UTILIDAD 40\%} = \$ 17.68$$

$$\text{PRECIO UNITARIO} = \$ 61.89/\text{m.}$$





CONCEPTO:

ACARREO DE AGUA EN CAMION TANQUE  
PARA PERFORACION.

Costo horario camión pipa = \$ 110.02/Hr.

Vol. tanque = 6,500 lts. = 6.5 m<sup>3</sup>

Distancia media recorrido = 50 Km.

Rendimiento = 9,000 lts.

ASI:-

50 Km. x 6.5 m<sup>3</sup> = 320 m<sup>3</sup>/Km.

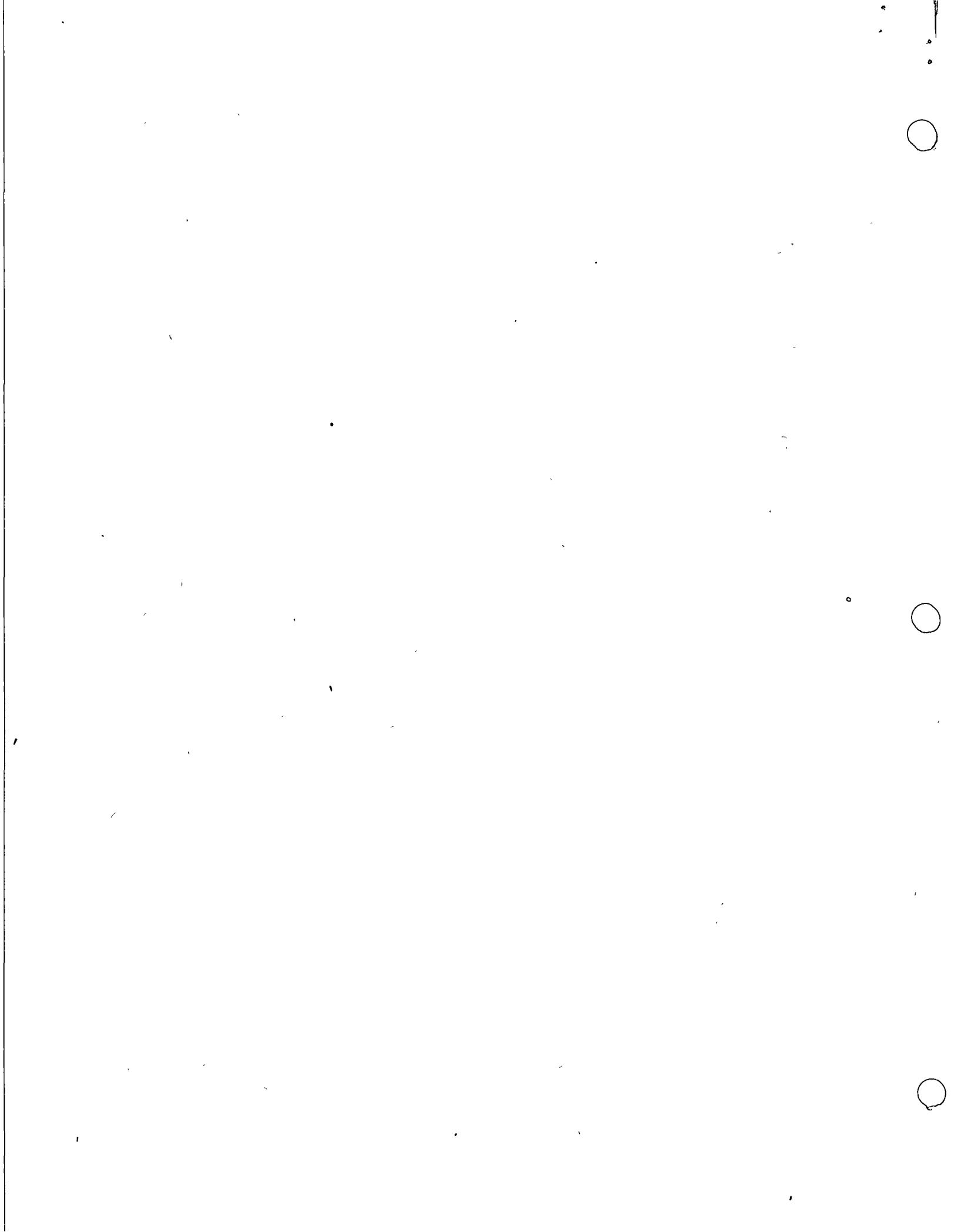
$\frac{\$ 110.02/\text{Hr.}}{9,000 \text{ lts.}}$  = \$ 0.0122

Por lo tanto.

Costo = 320 m<sup>3</sup>/Km. x \$ 0.0122 = \$ 3.90 m<sup>3</sup>/Km.

COSTO DIRECTO:- \$ 3.90 m<sup>3</sup>/Km.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%:- 1.56  
PRECIO UNITARIO:- \$ 5.46 m<sup>3</sup>/Km.



CONCEPTO:

57.00 - TRANSPORTE DE TUBERIA DE ACERO PARA ADEME,  
CEMENTO, BENTONITA Y SIMILARES .

COSTO HORARIO EQUIPO CONTRATADO POR FLETE  
ESPECIAL TRACTOCAMION Y PLATAFORMA = \$450.00/hr.

ASI:

Capacidad media = 20 Tons. carga.

Velocidad media conside  
rada = 30 km/hr.

ASI:

20 Ton. x 30 km/hr. = 600 Ton-km-hr.

LUEGO:

$$\frac{\$ 450.00/hr.}{600 \text{ Ton-Km-hr.}} =$$

\$ 0.75 Ton-Km.

COSTO DIRECTO

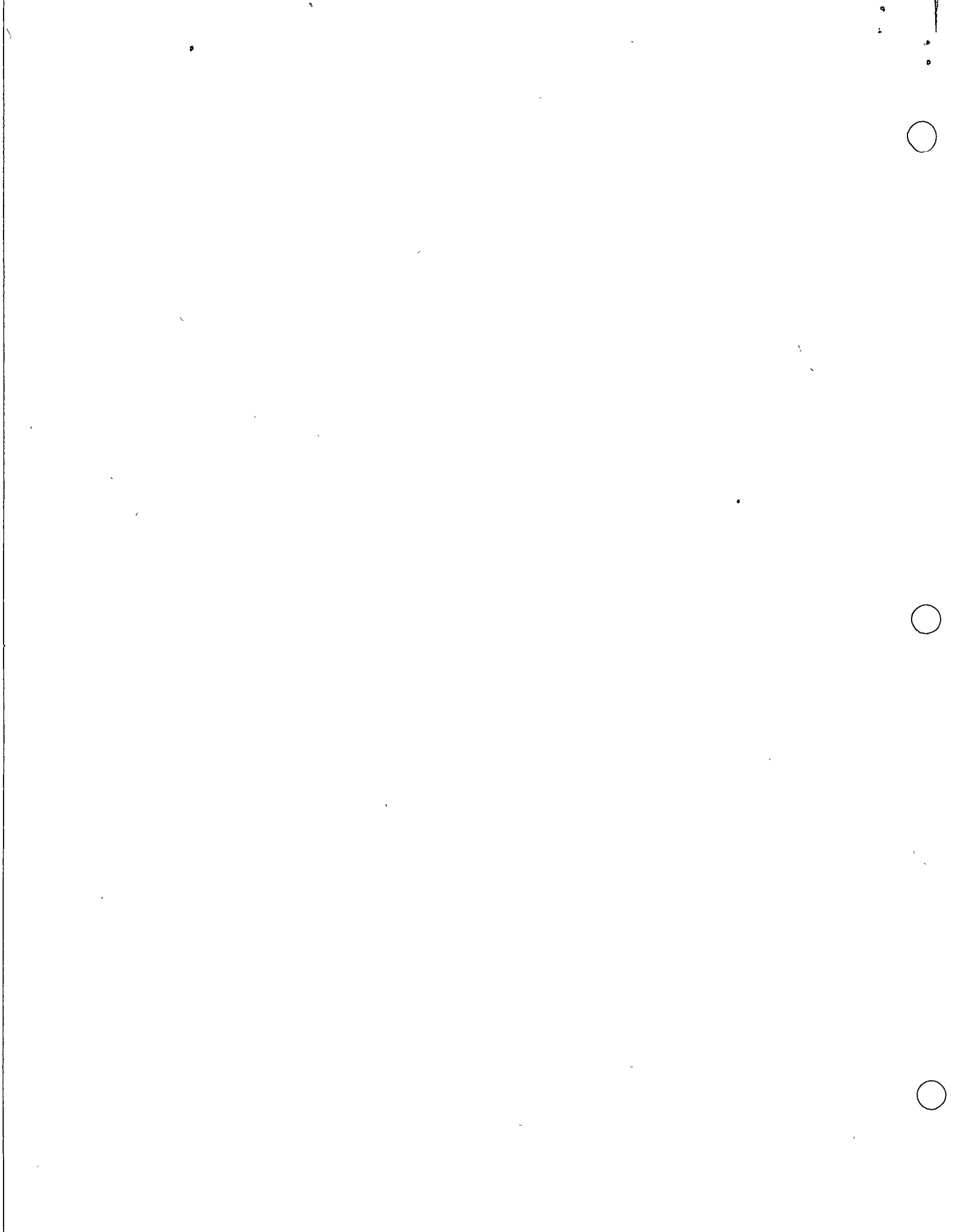
\$ 0.75 Ton-Km.

INDIRECTOS Y UTILIDAD 40%

0.30

PRECIO UNITARIO

\$ 1.05/Ton-Km<sup>3</sup>



HIDROLOGIA SUBTERRANEA

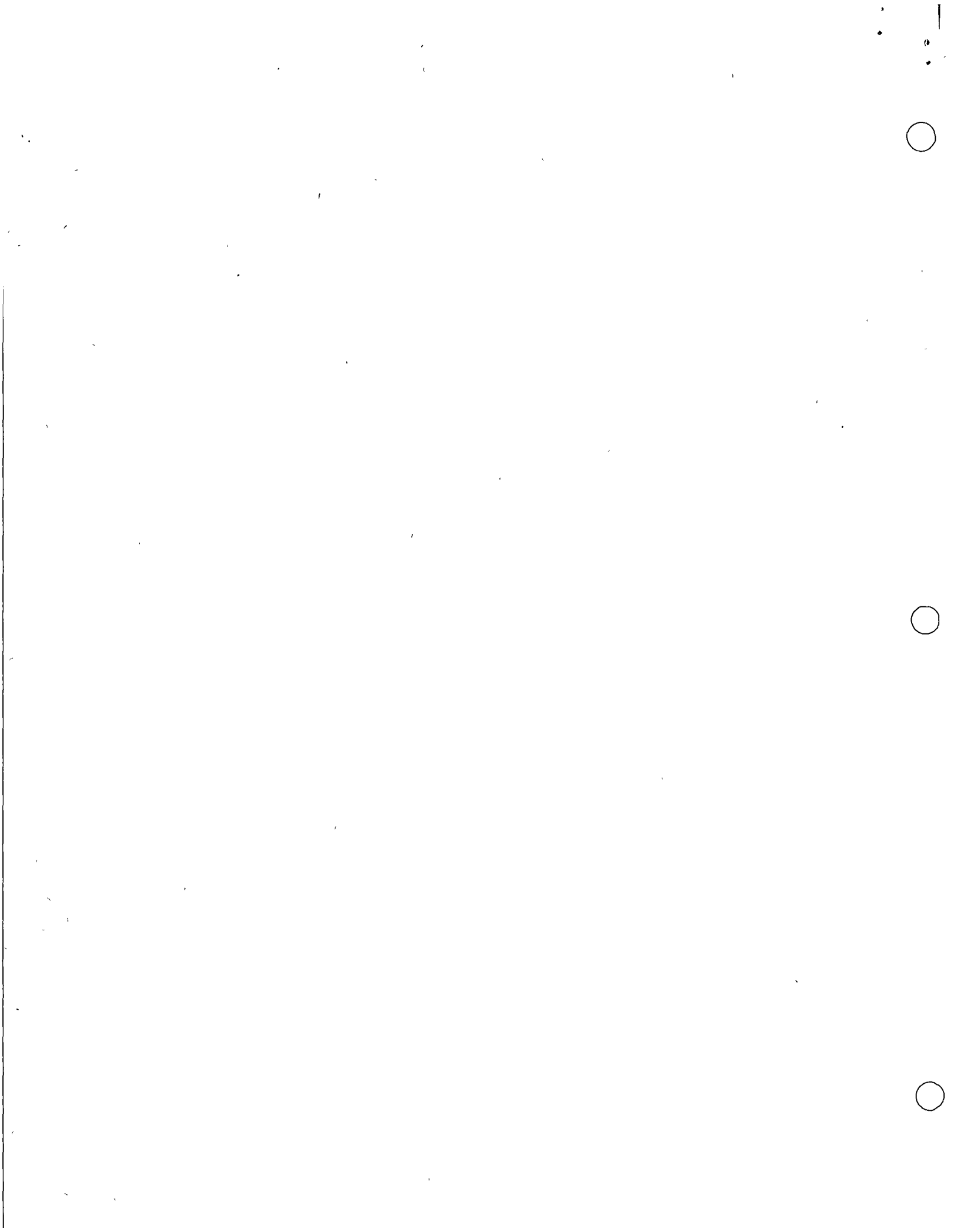
BREVE DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS  
DE PERFORACION

ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ

JULIO DE 1976.

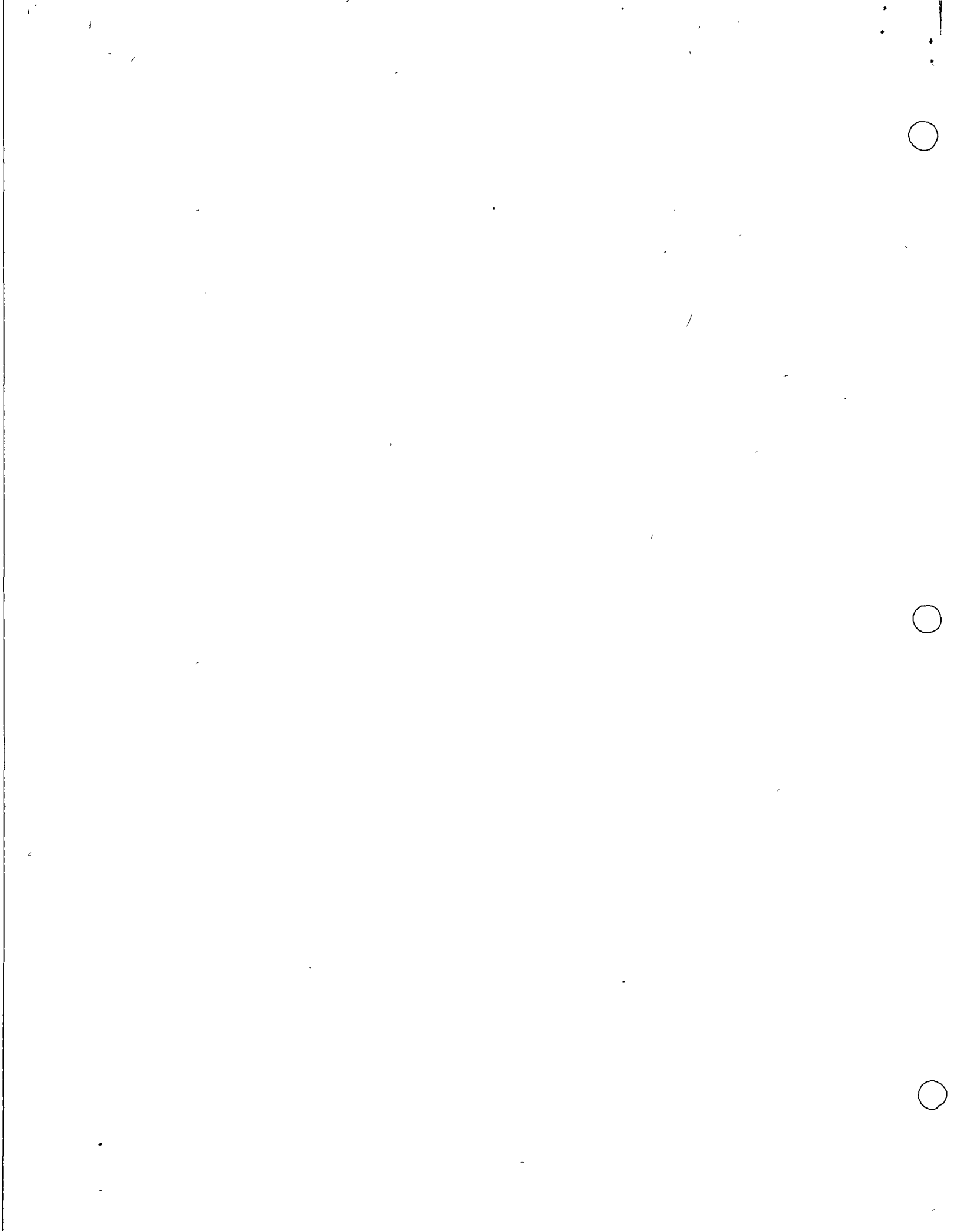








BREVE DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS DE PERFORACION.



## PERFORACION DE POZOS

Por el Ing. Aarón Palacios

### I.- INTRODUCCION:

En esta plática que se hará sobre el Tema: "METODOS DE PERFORACION Y RECOLECCION DE LA INFORMACION REQUERIDA PARA LA TERMINACION DE UN POZO", dado el poco tiempo con que se cuenta, de ninguna manera podrá considerarse como una cátedra, sino más bien, el fin que se persigue, es despertar en ustedes -- una inquietud, para que continuen los esfuerzos pasados de sus maestros superándolos con nuevas ideas y tecnologías en la búsqueda de los recursos del subsuelo que en la actualidad representan una importancia vital en el mundo y muy particularmente en nuestro País cuyas necesidades son cada día mayores y apremiantes.

La construcción de pozos para la explotación de recursos naturales yacientes en el subsuelo de nuestro país, se ha desarrollado con mayor auge durante los últimos 12 años y en forma destacada, la perforación de pozos para explotar acuíferos subterráneos, cuya tecnología se ha nutrido de las experiencias de la Industria Petrolera Nacional. Las técnicas aplicadas anteriormente, en forma exclusiva para la perforación, terminación y estimulación de los pozos petroleros, se han hecho extensivas y con éxito a los pozos para agua. De estos avances tratará el presente trabajo con la intención de que ambas industrias de explotación de recursos naturales del subsuelo del País continúen en estrecha colaboración para lograr mejores aprovechamientos en beneficio de la colectividad.

Dos tipos básicos de equipos de perforación ha desarrollado la industria de la construcción de pozos, el de sistema rotatorio y el de percusión; ambos tipos han sido modificados -- con ventajas en algunos casos y desventajas en otros, y se han combinado dando origen a otros tipos de equipos de perforación como son:

El rotatorio de circulación inversa, neumático y los sistemas modernos representados por la doble tubería y vibropercusión. De esta variedad que han desarrollado los fabricantes a continuación se describen brevemente cada uno de ellos.



•  
•  
•

## II.- EQUIPO DE PERCUSION O PULSETA

El más antiguo de los tipos de quipo es el que dispone de un balancín, barras compensadoras y una unidad motriz. Aún se encuentra en uso en ciertas regiones. Por otra parte - el equipo de percusión portátil puede efectuar perforaciones hasta una profundidad de 1 000 m.

### 2.1.- PARTES DEL EQUIPO.

Las partes principales del equipo son:

- a) Estructura principal
- b) Mástil
- c) Líneas de elevación
- d) Sistemas de percusión
- e) Unidad de Potencia.

#### Estructura principal.-

Consiste en una armazón de acero en la que se monta el equipo de perforación, el cual además puede instalarse sobre rieles, camiones o remolques.

#### Mástil.-

Es una estructura con tirantes de refuerzo, generalmente telescópicos, que le permiten evitar deformaciones del mismo y facilitar el transporte del equipo. En la sección superior lleva acoplados un juego de poleas para líneas de elevación y un amortiguador con cojinetes de goma para absorber los golpes y vibraciones durante el proceso de perforación.

#### Líneas de elevación.-

Son tres cables que se utilizan durante el proceso de los trabajos; una línea se destina para las operaciones de perforación, otra para las operaciones de cuchareo y la última para el manejo de tuberías. El cable de perforación es de torones torcidos en el sentido izquierdo, a fin de que las uniones de las herramientas que en el sentido derecho permanezcan fijas o tiendan a apretarse durante las operaciones de golpeo.



...

### Sistema de Percusión.-

Consiste esencialmente de un balancín y una biela pitman; la biela une al balancín con el engranaje de la máquina -- que al girar imprime movimientos ascendentes en la biela que se transmiten al balancín y que se aprovechan para -- los efectos de percusión. En el extremo del balancín lleva adaptada una polea para el cable que acciona la sarta de perforación y la biela tiene dos posiciones que permiten regular la carrera del balancín; de esta manera se -- consigue, a menor brazo, menor golpe y a mayor brazo ma-- yor golpe.

### Unidad de Potencia.-

Consiste de un motor de combustión interna en la mayoría -- de los casos de tipo diesel, por ser más económicos y más durables.

## 2.2.- HERRAMIENTAS DE PERFORACION.

Las herramientas de perforación son las siguientes:

- 1) Portacable giratorio
- 2) Tijeras de carrera corta.
- 3) Barra maestra o barretón.
- 4) Brocas o Trépanos
- 5) Cuchara
- 6) Rimas
- 7) Gato circular
- 8) Elevador de Herramientas
- 9) Llave de acero para las uniones
- 10) Protector de cables
- 11) Calibradores de Trépanos

Las cuatro primeras herramientas citadas constituyen la -- sarta de perforación y se unen entre sí por medio de ros-- cas hembras y machos.

### Portacable Giratorio.-

Sirve de enlace entre el cable de perforación y las demás herramientas de la sarta. El movimiento rotatorio libre -- que tiene, le permite proteger el cable cuando la sarta se expone a los movimientos giratorios en operaciones de gol-- peo.



2000



#### Tijeras de Carrera Corta.-

Es una herramienta que consta de dos partes, las cuales se encuentran eslabonadas entre sí, permitiendo una carrera conveniente entre ambas; tienen por objeto facilitar el destrave de la sarta, el desatascamiento del trépano en el fondo del pozo y evitar una fuerte reacción en la línea. Estas se conectan inmediatamente al porta cable.

#### Barra Maestra o Barretón.-

Es una herramienta que se utiliza para darle peso y rigidez a la sarta de perforación, la cual se conecta directamente a las tijeras.

#### Broca o Trépano.-

Es el elemento cortante, el cual se conecta al barretón. Esta herramienta desempeña cuatro funciones principales que son: Penetración, trituración, escariado y mezclado. Cada una de estas funciones se desarrolla en mayor ó menor grado, según las características de las formaciones que atraviesan.

#### Cuchara.-

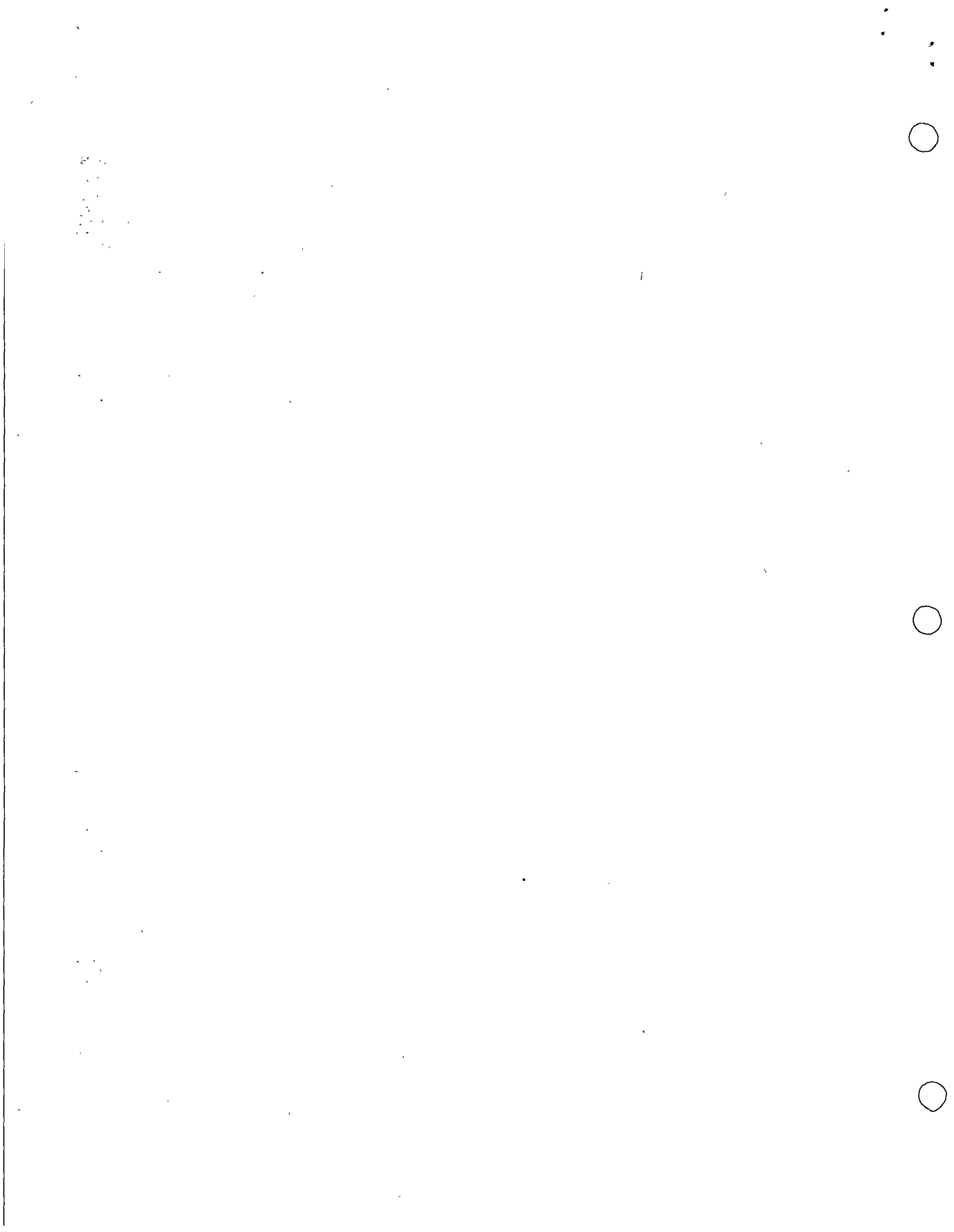
Es una herramienta que se usa para la extracción de los cortes del fondo del pozo, es de forma cilíndrica y hueca, con diámetro menor y longitud mayor en relación con el diámetro y longitud del trépano. En el extremo inferior se le adapta una válvula que puede ser plana o de dardo.

Rima.- Es un trépano diseñado especialmente para la ampliación de los agujeros.

### 2.3.- PROCEDIMIENTO DE PERFORACION.

Los trabajos se inician con una corta carrera de golpeo a fin de conseguir una verticalidad perfectamente definida desde los primeros metros. Cuando se han alcanzado profundidades de cierta consideración, se continúa la perforación también con una corta carrera de golpeo para evitar derrumbes.

En general las formaciones suaves se perforan con una carrera de golpeo más larga que las formaciones duras. Cuando se observan cambios de formación se disminuye



la carrera de golpeo, ya que proceden en la forma contraria, se corre el riesgo de desviar el agujero principalmente cuando los estratos presentan fuertes echados. Definida la penetración en la nueva formación encontrada, se impone el régimen de perforación correspondiente a la dureza de la misma. A continuación se indican las velocidades aproximadas de golpeo:

57	a	65	golpes por minuto			18"	de carrera	
50	a	57	golpes por minuto			22"	"	"
43	a	50	"	"	"	32"	"	"
35	a	43	"	"	"	40"	"	"

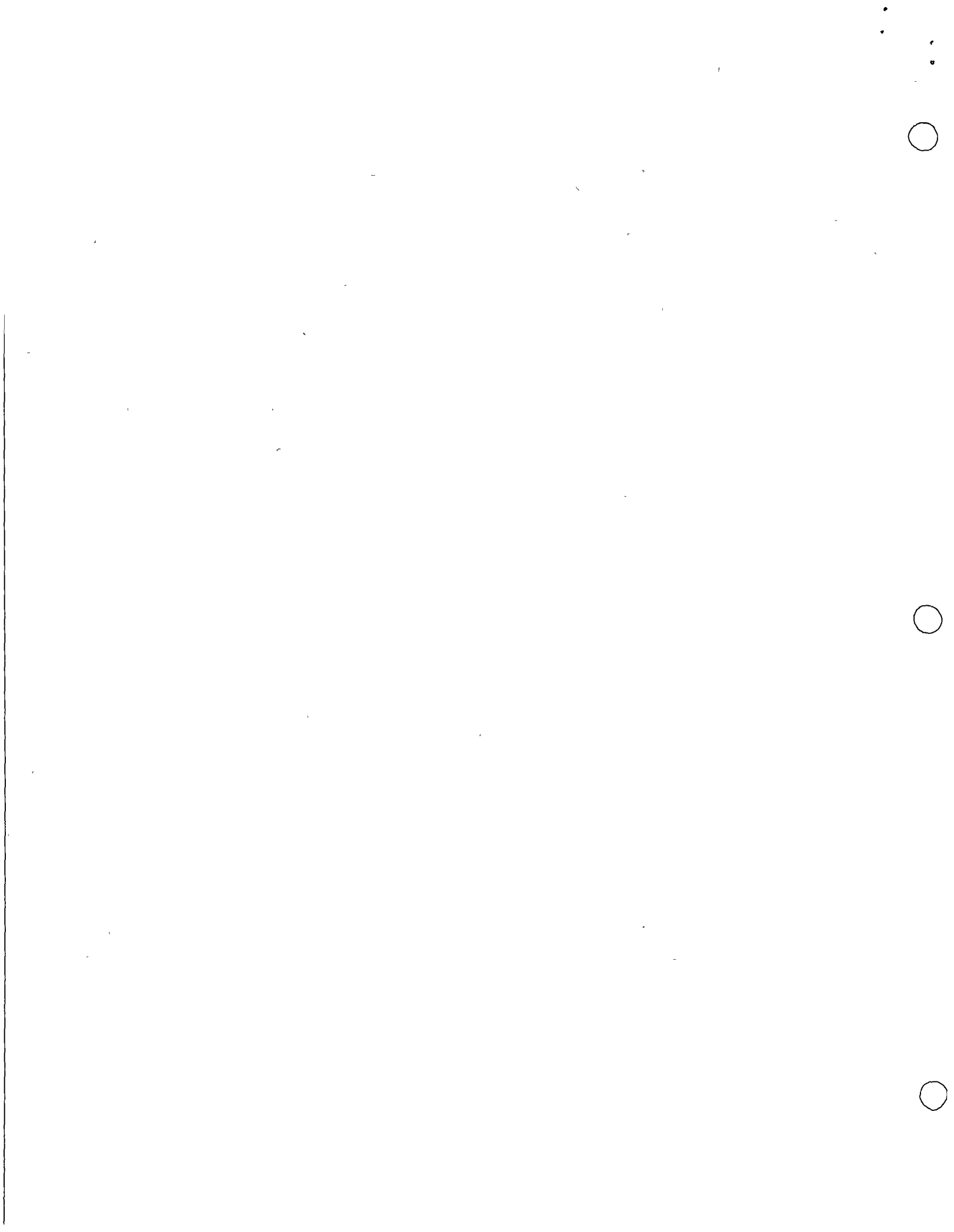
Cada vez que se ha penetrado una profundidad aproximadamente igual a la longitud del trépano o cuando se observan cambios de formación, se suspende la perforación y se procede a la extracción de los cortes por medio de la cuchara anotando las características litológicas y la profundidad respectiva. Se deberá tener cuidado en obtener la mayor parte de corte de material al llevar a cabo las operaciones anteriores ya que si se queda un volumen considerable en el fondo del pozo, aquéllos impiden el avance efectivo de perforación.

Se lleva un registro de los niveles que alcanza el agua dentro del pozo, el cual se efectúa cada vez que se atraviesa una formación diferente. Con esta información y con los datos de características y profundidades de los materiales, se pueden definir con cierta precisión los horizontes saturados.

#### 2.4.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS DE PERCUSION.

Ventajas.-

- a).- Son equipos fácilmente transportables.
- b).- El costo de operación es económico debido a que se requieren cuadrillas de personal reducidas, así como por su baja potencia consumida.
- c).- Por su bajo consumo de agua lo hace superior en emplazamientos donde se carece de fuentes de abastecimiento.
- d).- La porosidad y permeabilidad originales de los acuíferos se conservan mejor debido a la reducida cantidad de materiales coloidales y químicos necesarios para el acarreo de los detritos durante las maniobras de limpieza en los avances de perforación.

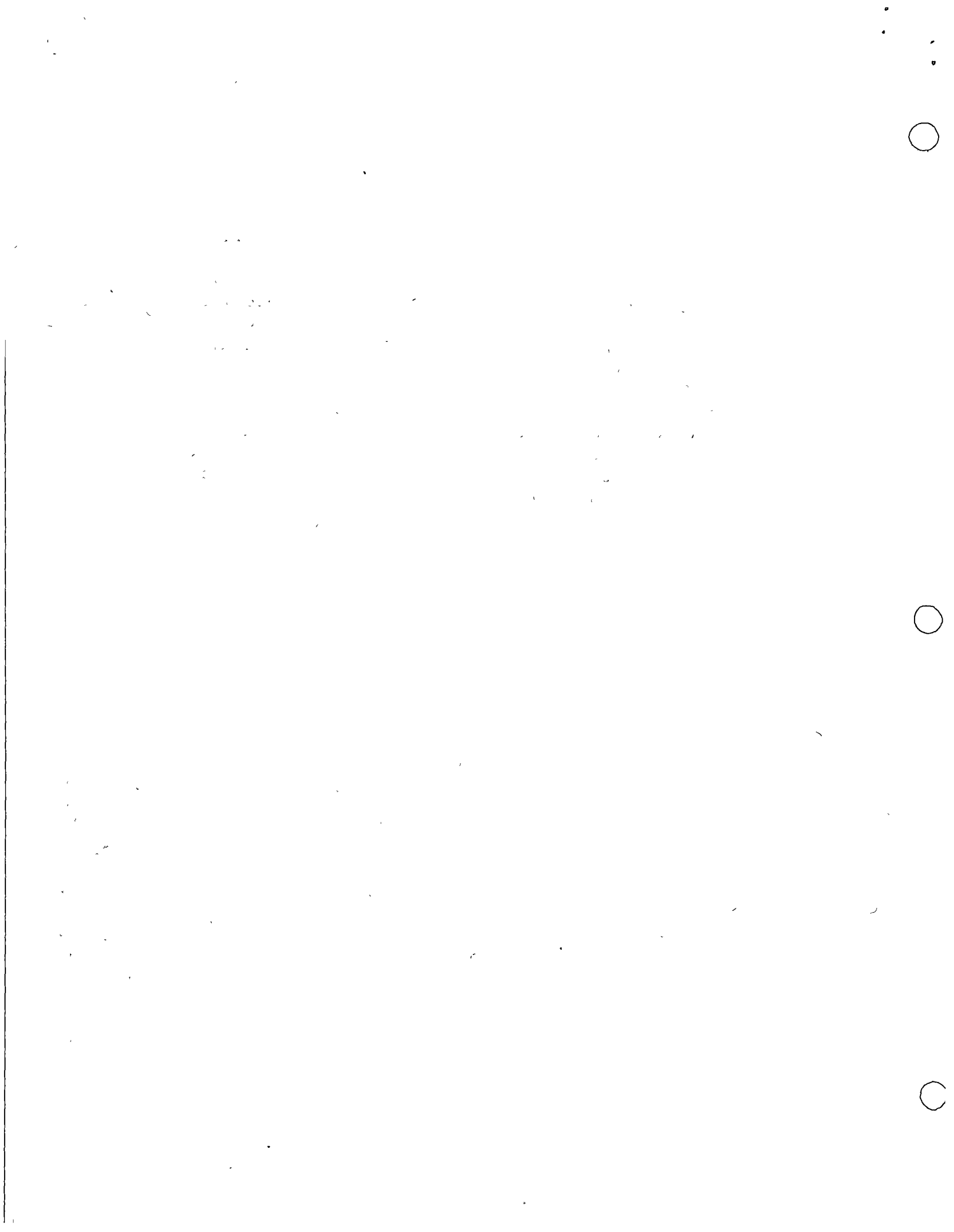


### Desventajas.-

- a).- Su falta de rigidez en la sarta de perforación hace incontrolable la verticalidad del pozo, - presentándose siempre una tendencia a la des--viación por influencia de los echados de las - formaciones o fracturamientos de las rocas.
- b).- El cable que opera las herramientas perforadas es relativamente muy elástico, lo que reduce - sus efectos de golpeteo y por ende, el efecto cortante de las barrenas a medida que avanza - la profundidad del pozo.
- c).- Cuando se rompe el equilibrio de las rocas perforadas el ángulo de reposo en las paredes del pozo se dificulta algunas veces provocando derrumbes que retrasan los avances de la obra y en ocasiones la hacen imposible por la falta - de el ademe preliminar que dan los enjarres de los lodos de perforación.
- d).- Comparativamente es un sistema de perforación económico, pero lento, teniendo grandes limitaciones en cuanto a profundidades y diámetros.

### III.- EQUIPO ROTATORIO DE CIRCULACION DIRECTA.

La potencia de estos equipos se aplica a un sistema de levante y a otro de circulación de los diferentes fluidos; - para el levante cuentan con un malacate que combinado con un polipasto facilitan la introducción de herramientas, tuberías y demás implementos al fondo de los pozos en construcción. La circulación de lodos, agua-aire o sus combinaciones lo hacen por medio de bombas horizontales recipro-cantes y el sentido del flujo es directo, es decir, del interior de las herramientas perforadoras hacia el espacio - anular que se forma con la pared del propio pozo. Con estos equipos se perforan los pozos de mayor profundidad para agua hasta de 2 000 metros y con programas de diámetros grandes, hasta de 30 pulgadas; se utilizan también barrenas de tres conos cuya acción cortante es efecto de la rotación que se le aplica y que aumenta con la intensidad del peso a que se someten dichas barrenas y que actualmente se fabrican en muy variados tipos, diámetros y calibres, de acuerdo con las características de las rocas.



### 3.1.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS DE CIRCULACION DIRECTA.

#### Ventajas.-

- a).- Actualmente, las técnicas más avanzadas en la perforación de pozos, se aplican a este sistema, permitiendo que se logren las mejores velocidades de perforación y por su popularidad, existen en el mercado una gran variedad de diseño de máquinas y herramientas que permiten hacer una buena selección del equipo para cada proyecto.
- b).- Las propiedades tixotrópicas de los fluidos químicos que se circulan durante la perforación forman un enjarre que ayuda a mantener en equilibrio las paredes del pozo y con una hidráulica de circulación apropiada, mantiene limpio el pozo previendo en muchos casos la invasión de agentes extraños a las zonas saturadas con agua, además de que dicha limpieza en el pozo ayuda a mantener el efecto cortante de las barrenas.
- c).- El sistema permite en la mayoría de los proyectos de pozos programar tentativamente el tiempo requerido para la obra, ya que los ejecutivos pueden variar convenientemente las condiciones que influyen en la velocidad de penetración como son:
- 1 El tipo de barrena tricónica en lo que se refiere a longitud de diente y área de balero.
  - 2 Potencia hidráulica aplicada a las toberas para lograr la máxima velocidad en la salida y en el espacio anular.
  - 3 La calidad de los lodos de perforación que pueden ser mejorados a base de aditivos químicos para mantener en buenas condiciones la gelatinidad y viscosidad.
  - 4 La cantidad y medida de tubería de perforación lastra-barrenas para aplicar rotación y peso sobre la barrena pueden ser variadas para obtener eficiencias razonables.

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or introductory paragraph.

Second block of faint, illegible text, appearing as several lines of a paragraph.

Third block of faint, illegible text, continuing the document's content.

Fourth block of faint, illegible text, possibly a concluding paragraph or a list.

Fifth and final block of faint, illegible text at the bottom of the page.



d).- Las sartas de perforación a base de tuberías, - lastra-barrenas y estabilizadores pueden proyectarse para obtener una rigidez que permita mantener el pozo dentro de su verticalidad, con lo cual se logra que los intervalos que se perforan para servir como cámaras de bombeo se construyan casi verticales evitando con esto, los - problemas mecánicos a los equipos de bombeo que presentan los pozos con quiebres que obligan a las tuberías y flechas a trabajar con flexiones que producen desgastes excesivos.

#### Desventajas.-

- a).- Requieren un suministro continuo de agua y por este motivo su operación es problemática donde existen fuentes de abastecimiento.
- b).- Cuando se perforan zonas muy permeables y de - baja presión, se producen grandes pérdidas de circulación de lodo, el cual puede afectar las condiciones hidrológicas de los acuíferos, volviéndose más problemática esta situación cuando no es posible continuarse la perforación a base de circulación con agua.
- c).- Su costo de operación es alto porque requieren mayor número de personal y más especializado; - su consumo de potencia es alto y las herramientas son de alto costo, de modo que puede resultar incosteable cuando no se aprovecha con alta eficiencia.
- d).- El costo inicial es alto cuando se adquiere el equipo completo con todas las herramientas y -- accesorios de ataque y control, así también su transportación requiere en algunos casos vehículos y grúas especiales que hacen difícil su -- traslado en lugares de difícil acceso.

#### IV.- EQUIPOS ROTATORIOS DE CIRCULACION INVERSA.-

Los equipos de circulación inversa operan en forma similar a los del sistema rotatorio antes mencionados, pero el sentido del flujo es opuesto, es decir, de la pared del pozo hacia el interior de las herramientas. La circulación se establece por medio de bombas centrífugas y a

Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or introductory paragraph.

Second block of faint, illegible text, appearing as several lines of a list or a short paragraph.

Third block of faint, illegible text, continuing the list or paragraph from the previous section.

Final block of faint, illegible text at the bottom of the page, possibly a conclusion or footer.

la superficie por un tubo Venturi. Por construcción, este tipo de equipo es limitado en cuanto a su capacidad de profundidad, diámetros y durezas de rocas, sin embargo, en la perforación de pozos de profundidades de 200 metros y en arenas más o menos homogéneas, perforan pozos de buena calidad y en bajo tiempo.

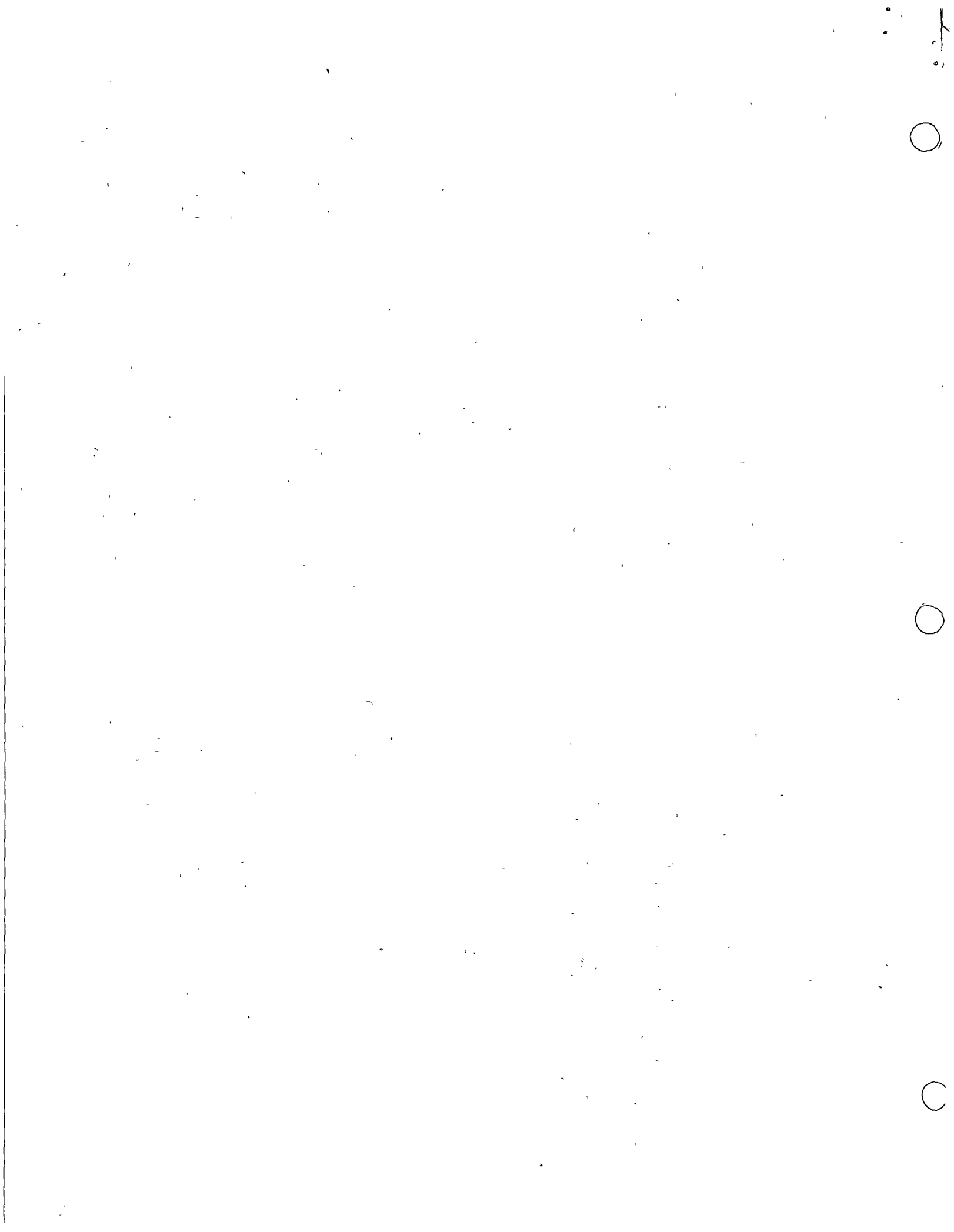
#### V.- EQUIPOS COMBINADOS.

Recientemente se han fabricado equipos que combinan el sistema rotatorio con herramientas neumáticas de acción percusora. Estos equipos combinan el fluido de perforación con el aire que opera martillos rotatorios que además por diseño, se les aplica peso adicional para aumentar la intensidad del golpeteo en la perforación de rocas de alta dureza. Pero por su construcción han tenido limitaciones en cuanto a los diámetros de perforación debido a que la barrena guía de 6 a 8" de diámetro inicial de perforación, es relativamente pequeña y hace necesario que para ampliar los pozos de explotación a grandes diámetros (por ejemplo: 20"), las ampliaciones son muy graduales y difíciles con el aumento de la torsión.

Los equipos combinados del sistema de percusión y que en forma expedita se transforman a rotatorios de circulación directa, han dado buenos resultados en la construcción de pozos de agua, son máquinas que trabajan en forma independiente cada uno de los sistemas de perforación de manera que se aplican convenientemente en cada caso que se hagan necesarios y aunque todos los equipos construídos inicialmente para el sistema de percusión son susceptibles de transformarse a rotatorios de circulación directa, actualmente se fabrican equipos cuyo diseño mecánico aprovecha su construcción para facilitar los cambios de sistema con cierta prontitud.

#### VI.- LODOS DE PERFORACION.

El empleo de lodos en los trabajos de perforación por el sistema rotatorio, es de gran importancia, por lo tanto, se han hecho estudios y registros cuidadosos sobre el comportamiento de diversas sustancias y se ha obtenido como resultado, el ahorro de tiempo y la simplificación de problemas en estos trabajos.



## 6.1.- COMPOSICION.-

La arcilla y el agua son los principales constituyentes del lodo de perforación; este material se encuentra en la naturaleza en forma de sedimentos no consolidados, - que se han reducido por la alteración de las rocas que contienen silicatos.

Dada la naturaleza de algunas arcillas, los lodos que forman no tienen las propiedades adecuadas para la perforación; por lo que es indispensable agregar los otros materiales que les imparten determinadas propiedades, - según lo requiera el caso. Químicamente se compone en su mayor parte de silicatos de aluminio hidratado, que varían en porcentajes de sílice, alumina y agua; también se presentan como impurezas algunos óxidos metálicos; por lo que no pueden considerarse como minerales - de composición fija: sino por el contrario, se clasifican en dos grupos; el de las caolinitas ( $Al_2 O_3 2SiO_2 2H_2O$ )

El caolín es la arcilla más común, a sus partículas se les denomina: suspensoides o coloides hidrófobos porque tiene poca afinidad con el agua y solamente forman suspensiones estables si las cargas individuales son lo suficientemente altas para evitar la coagulación; este tipo de coloide no se dilata con el agua.

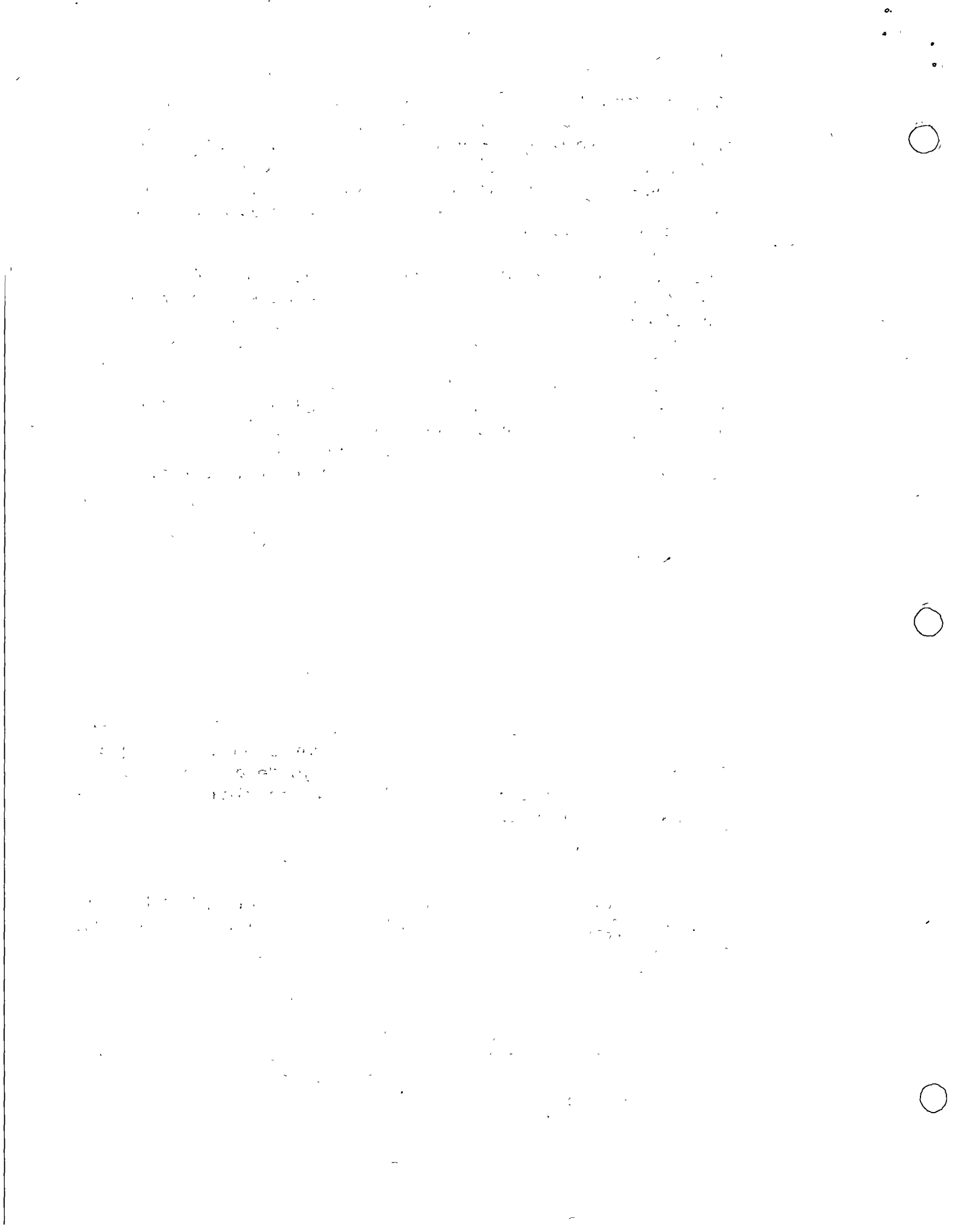
Los emulsoides o coloides hidrófilos por el contrario tienen gran afinidad con el agua; cada partícula emulsóide se hidrata protegiéndose por una pequeña película protectora de agua; este tipo de arcilla corresponde al grupo de montmorillonitas (silicato complejo de aluminio) y el miembro más conocido y empleado en la fabricación de lodos es la bentonita.

## 6.2.- FUNCIONES DE LOS LODOS DE PERFORACION.-

En la perforación rotatoria el fluido circulante tiene de terminadas funciones que cumplir, las cuales se mencionan en orden de importancia.

Extracción de Detritos.

La elevación de los detritos del fondo del pozo a la superficie depende principalmente del mantenimiento de la densidad, viscosidad y velocidad del lodo entre la tubería de perforación y las paredes del pozo, siendo facto-



res importantes el tamaño y la densidad de los detritos (a mayor densidad, viscosidad y velocidad del lodo, la extracción será más efectiva).

Las partículas sólidas suspendidas en el fluido circulante durante la perforación tenderán a hundirse, dicho hundimiento será mayor mientras más gruesas o más densas sean las partículas; el lodo arrastrará los detritos -- cuya velocidad del hundimiento es menor que la suya en el espacio anular. En condiciones de flujo turbulento la tendencia al hundimiento disminuyen y el fluido mantiene en su seno determinada cantidad de detritos gruesos y pesados logrando ascenderlos hasta la superficie, lo que no ocurre si el flujo es lineal; no por esto debe usarse un lodo muy viscoso y denso, pues acarrearía entre otros problemas, la difícil decantación de los de tritos en el canal y presa de lodo.

#### Refrigeración de la Barrena.-

Como consecuencia de las fricciones que experimenta al girar, la barrena sufre calentamientos y desgastes durante el proceso de perforación. La temperatura depende de la velocidad y del peso de la sarta soportado por la barrena. Por lo tanto, una de las funciones de los lodos es reducir el desgaste, absorbiendo el calor a -- través de la circulación y mientras menos porcentaje de arena contenga, más efectiva será su función de refrige ración.

#### Otras Funciones.-

Dentro de las múltiples funciones que cumple el lodo en los trabajos de perforación, se pueden mencionar:

- a).- Lubricación de la tubería de perforación. Durante la operación el lodo evita que la tubería de perforación, friccionen directamente contra las paredes del pozo ocasionando desgastes en la misma.
- b).- Suspensión de los detritos cuando se interrumpe la circulación, para lo cual el lodo debe tener propiedades tixotrópicas.
- c).- El lodo no debe tener acción corrosiva y su acción abrasiva deberá ser mínima para evitar que el equi po de perforación se deteriore.



Faint, illegible text scattered across the page, possibly bleed-through from the reverse side.



6.3.- PROPIEDADES FISICAS MAS IMPORTANTES DE LOS LODOS:

Densidad,  
Viscosidad,  
Gelatinación,  
Lubricación y  
cualidades de sellamiento.

EJEMPLO DE CALCULO DE UNA CEMENTACION

Diámetro del agujero ..... 24";  $d_1 = 0.6096 \text{ m.}; d_1^2 =$   
 $0.3716 \text{ m}^2$

Diámetro T. R. .... 18";  $d_2 = 0.4572 \text{ m}; d_2^2 =$   
 $0.2090 \text{ m}^2$

Profundidad ..... 123 metros.

Volumen espacio anular =  $\frac{\pi (d_1^2 - d_2^2)}{4} \times h = 0.7854$

$$\begin{aligned} (0.6096^2 - 0.4572^2) \times h &= 0.7854 (0.3716 - 0.2090) \times h \\ &= 0.7854 \times 0.1626 \times 123 \\ &= 0.1277 \times 123 = \underline{15.7071 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

Volumen Espacio anular = Volumen lechada cemento

Lechada densidad = 1.7

Volumen agua/saco de cemento 32.6 lt

Volumen de lechada/saco de cemento 32.6 + 16 = 48.6 lt.

$$\frac{15707.1}{48.6} = 323 \text{ Sacos de cemento.}$$

No. de Sacos de cemento 323 25% = .400 sacos

Volumen de agua = 400 Sacos-cemento 32.6 = 13,040 lt.

Volumen de agua en barriles =  $\frac{13040}{159} = 82 \text{ barriles}$

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

PHYSICS

DESPLAZAMIENTO.-

$$\text{Tubería de } \varnothing \text{ ext.} = 18" = .4572 \text{ m}$$

$$\text{Espesor } 13/32" = .0103 \text{ m}$$

$$0.4572 - 0.0103 = 0.4469$$

$$\therefore \text{ interior de la T.R.} = 0.4469 \text{ m}$$

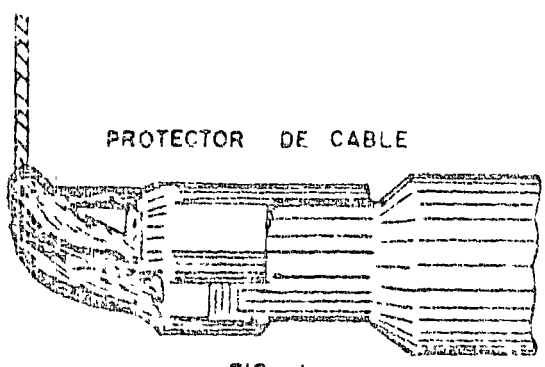
$$d^2 \text{ int.} = 0.1992$$

$$\text{Capacidad T.R.} = \frac{\pi d^2}{4} \times h = 0.7854 \times 0.1992 \times 123$$

$$= .1564 \times 123 = 19.237 \text{ m}^3$$

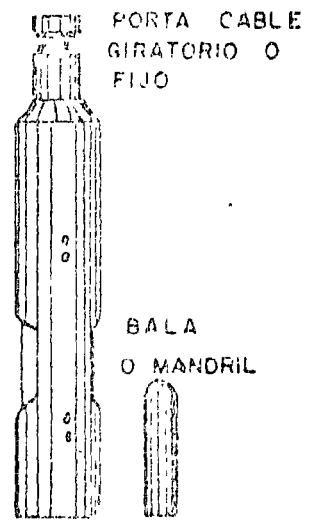
$$\text{Capacidad T. R. en barriles} = \frac{19,237}{159} \text{ lt} = 121 \text{ barriles.}$$





PROTECTOR DE CABLE

FIG 1



PORTA CABLE  
GIRATORIO O  
FIJO

BALA  
O MANDRIL

FIG 2



FIG 3  
TIJERAS DE PERFORACION  
O PESCA

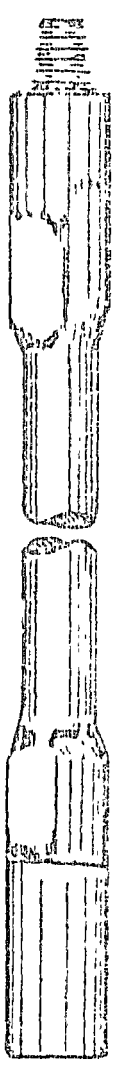


FIG 4  
BARRETON O  
BARRA MAESTRA

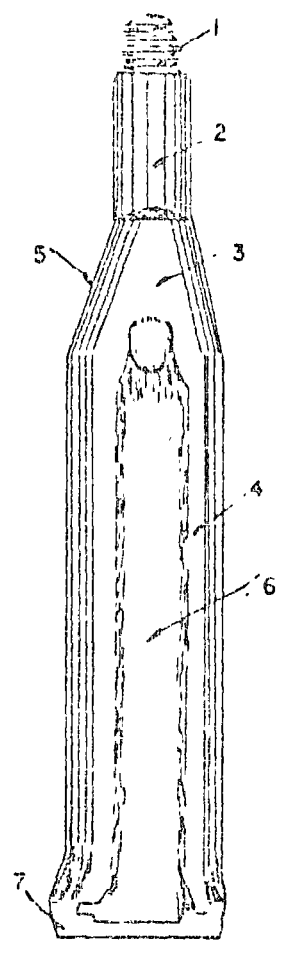
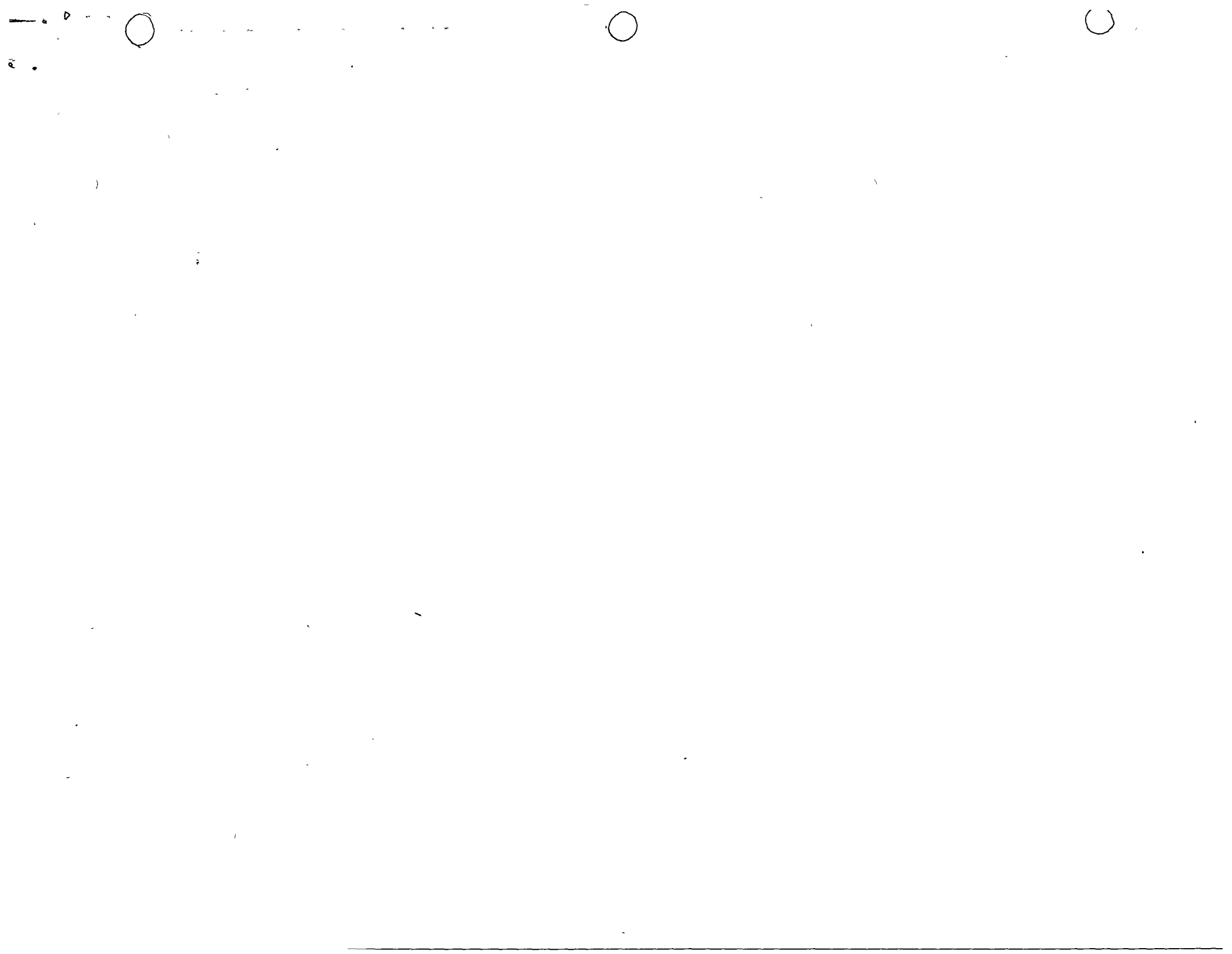
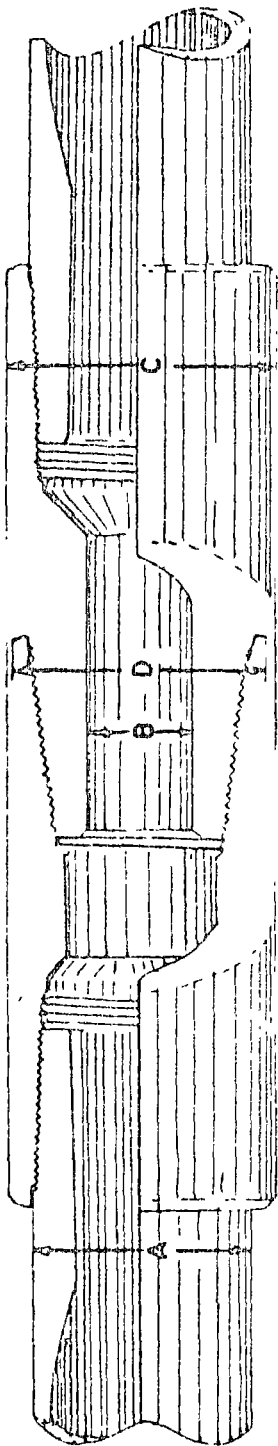


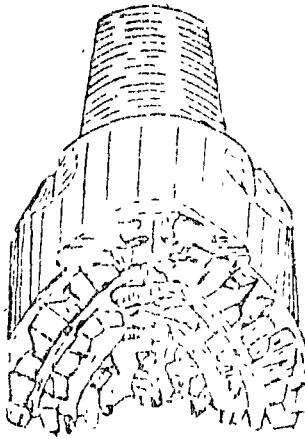
FIG 5  
TREPANO

- 1 - PIÑON
- 2 - CUELLO
- 3 - HOMBRO
- 4 - CUERPO
- 5 - CUADRO PARA LLAVES
- 6 - PASO DE AGUA O  
CANAL DE EVACUACION
- 7 - FILO DE CORTE

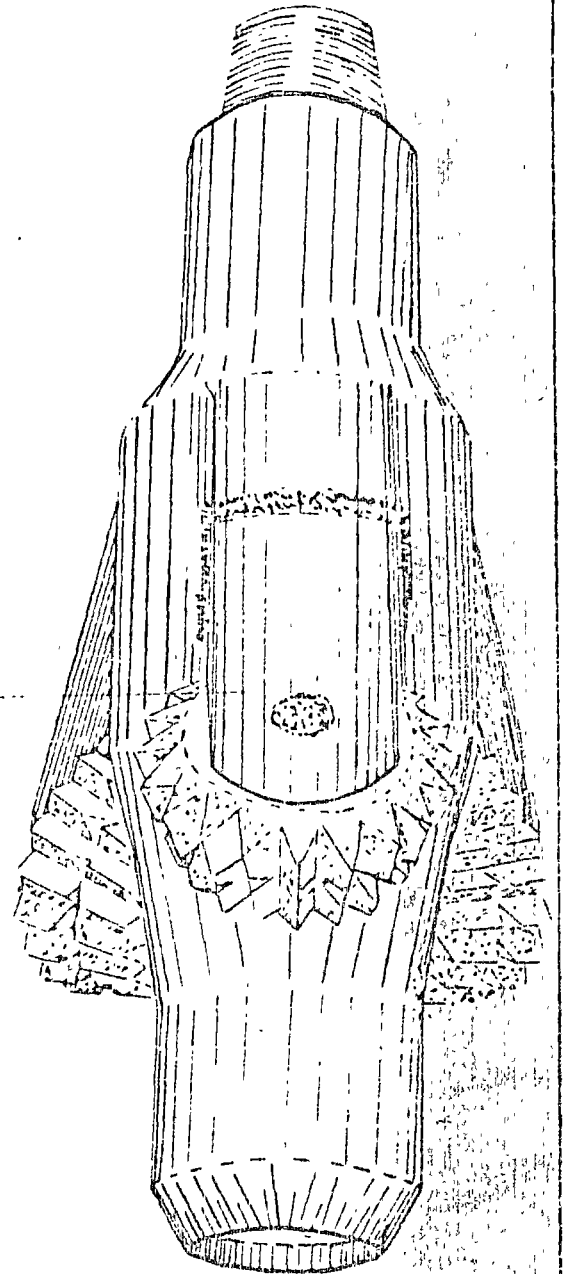




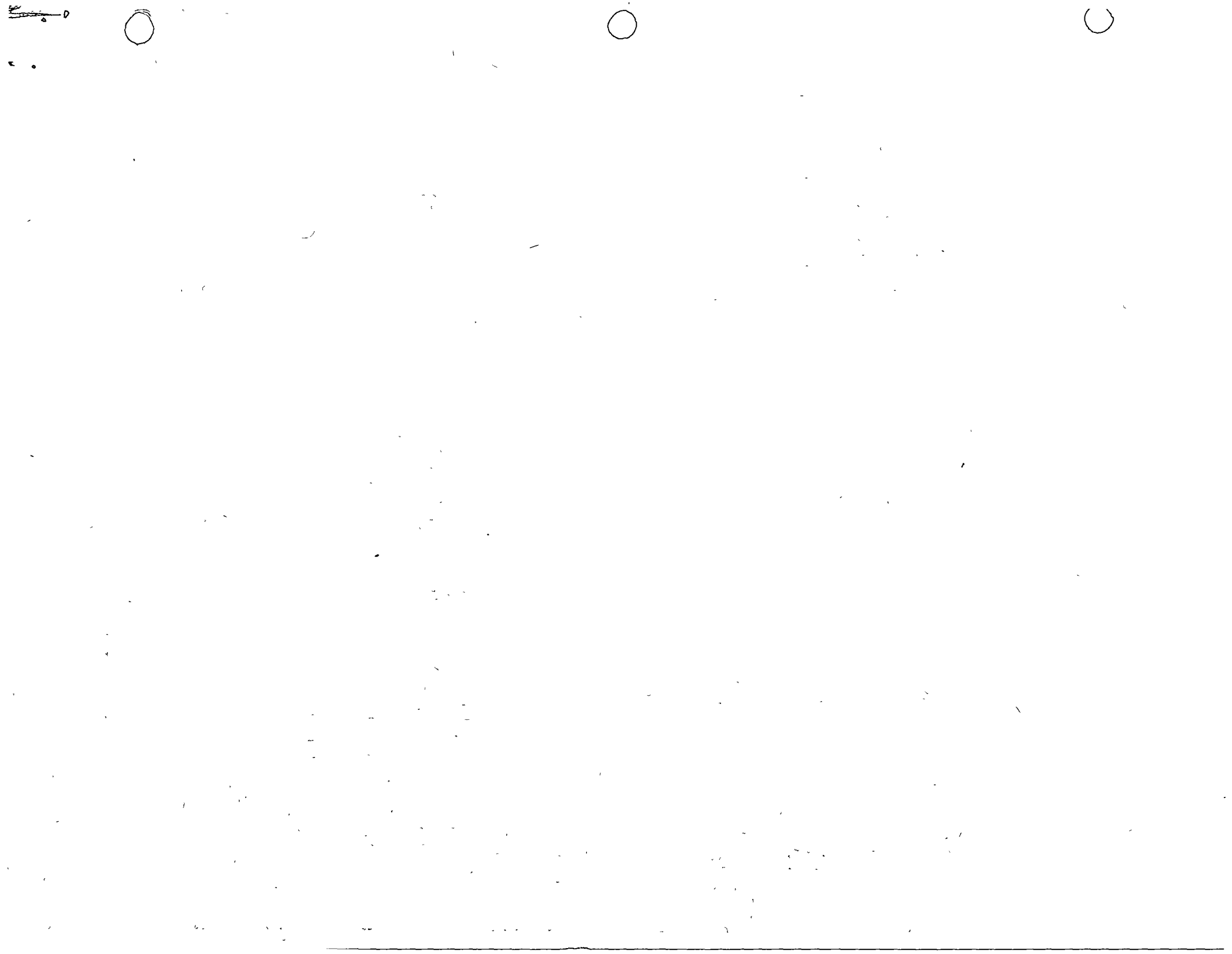
UNION DE TUBERIA  
DE PERFORACION



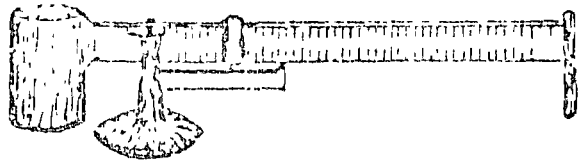
BARRENA



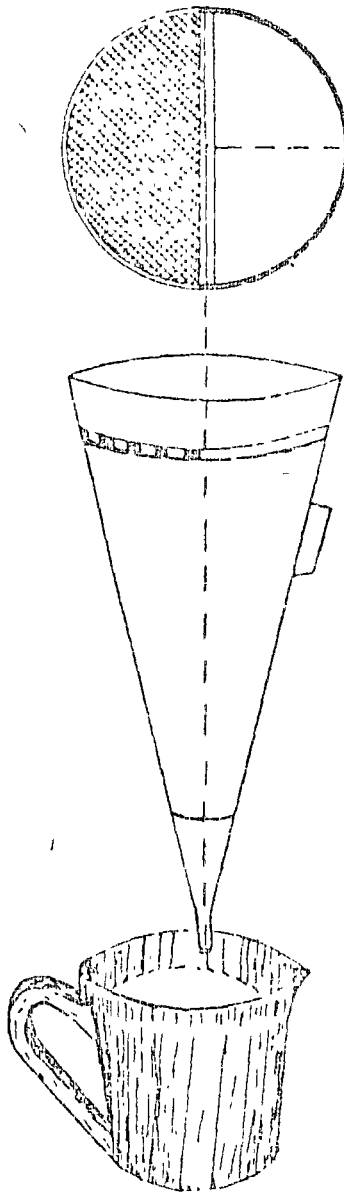
RIMA







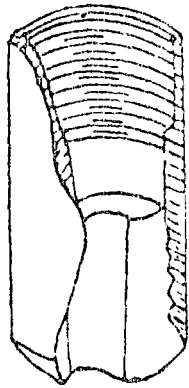
BALANZA DE DENSIDADES



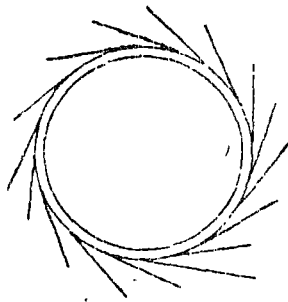
VISCOSIMETRO DE MARSH

Handwritten mark at the top right corner.

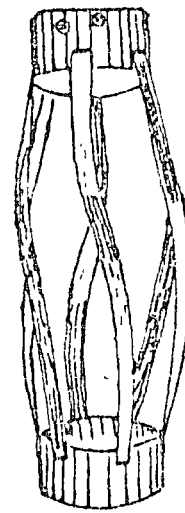




ZAPATA GUIA



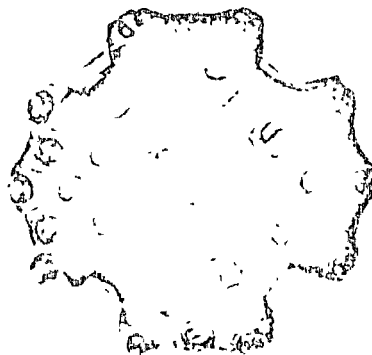
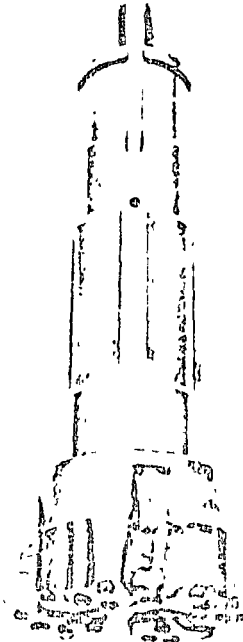
RASPADOR



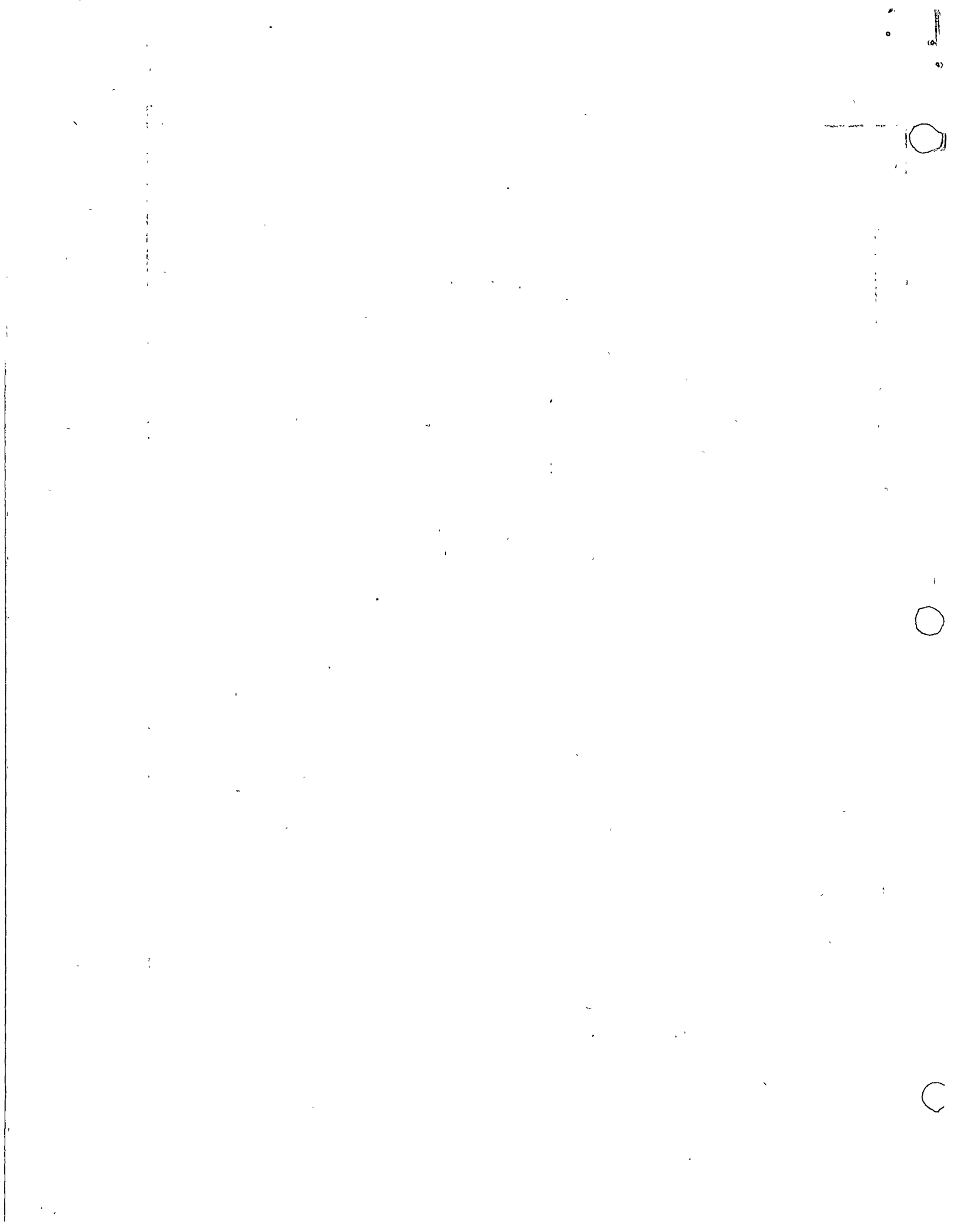
CENTRADOR

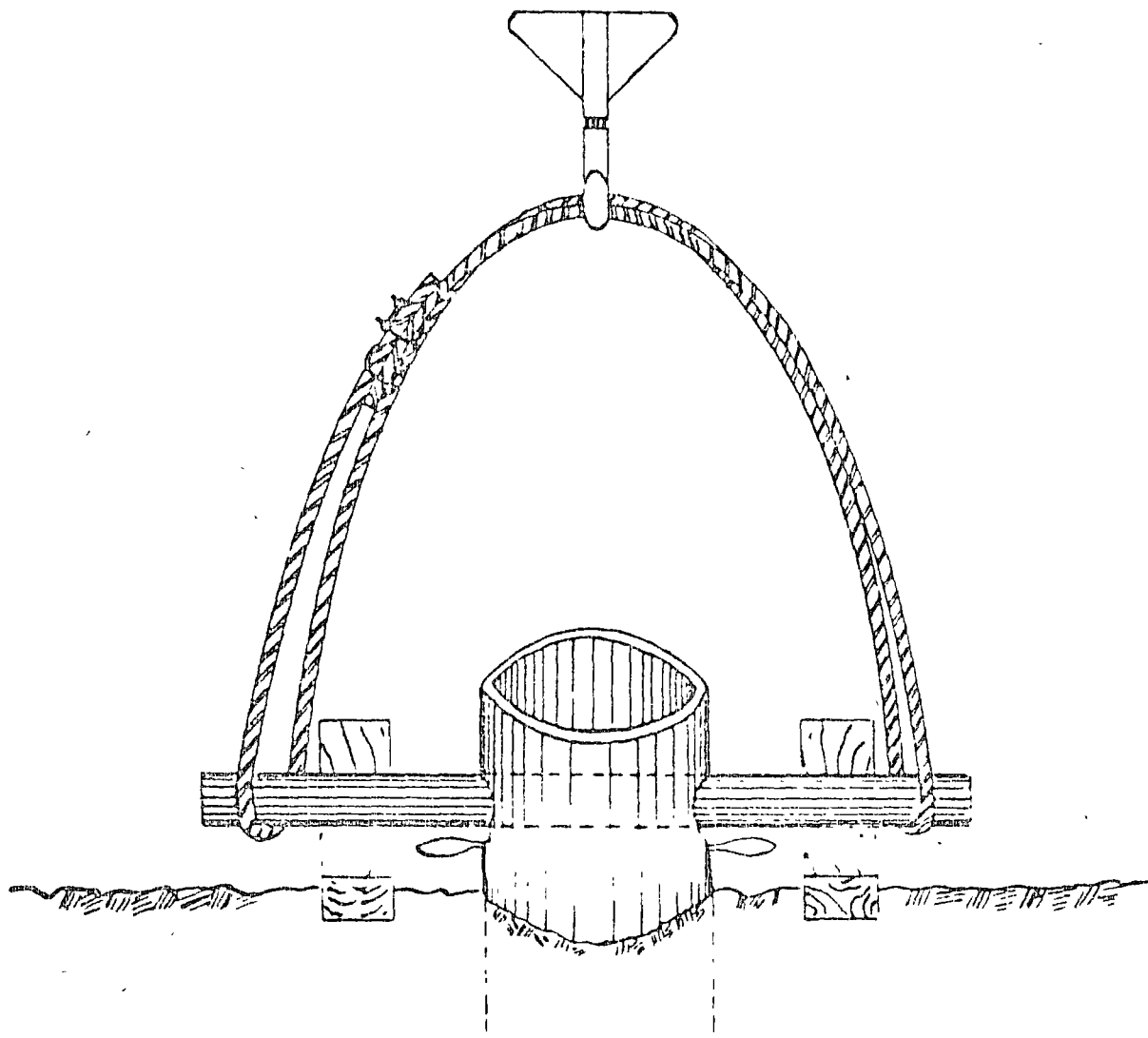
Handwritten marks and scribbles at the top right corner.



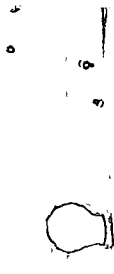


BARRENAS DE BOTONES CON INSERTOS  
DE CARBURO DE TUNGSTENO

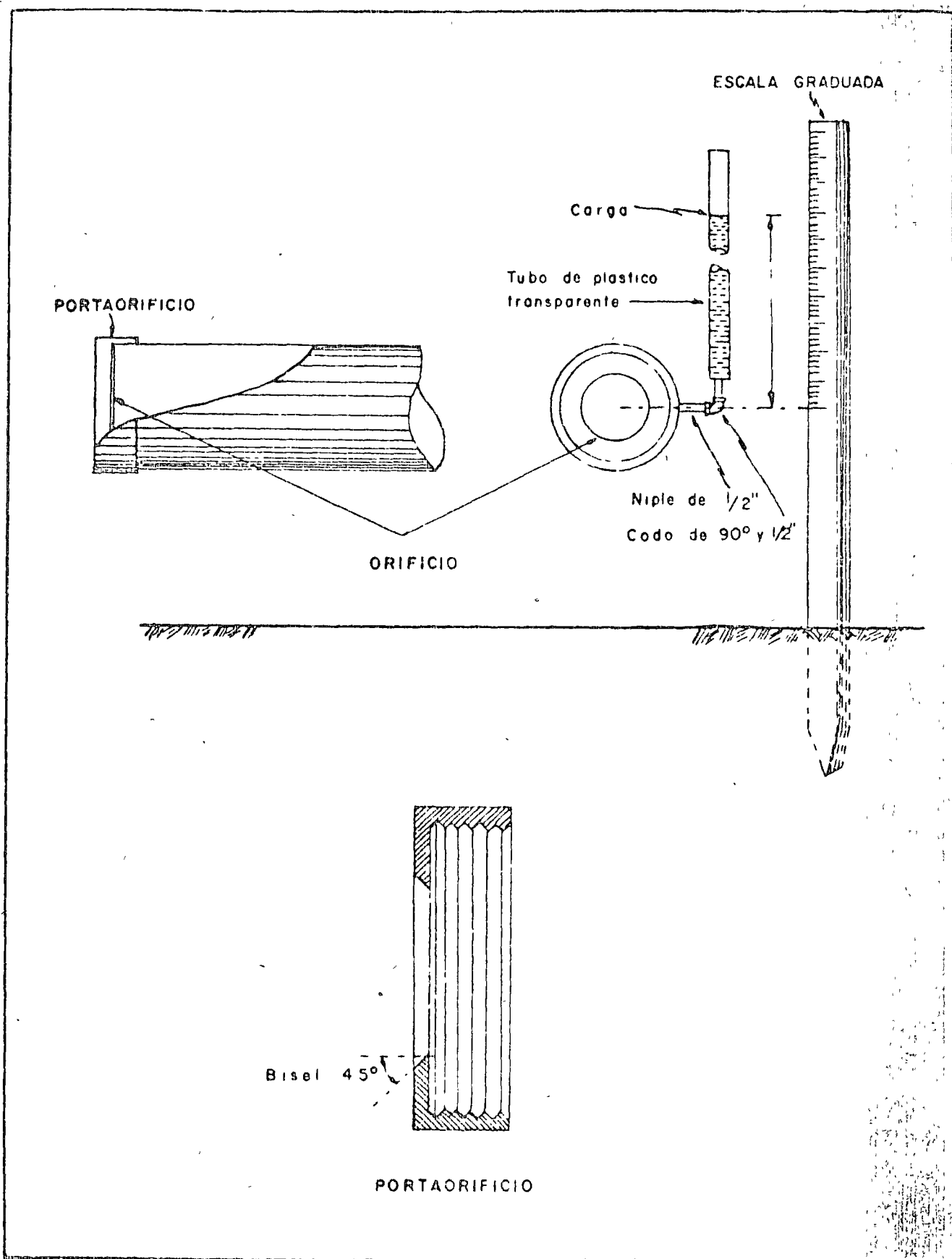


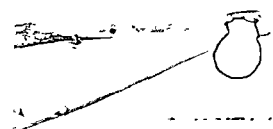


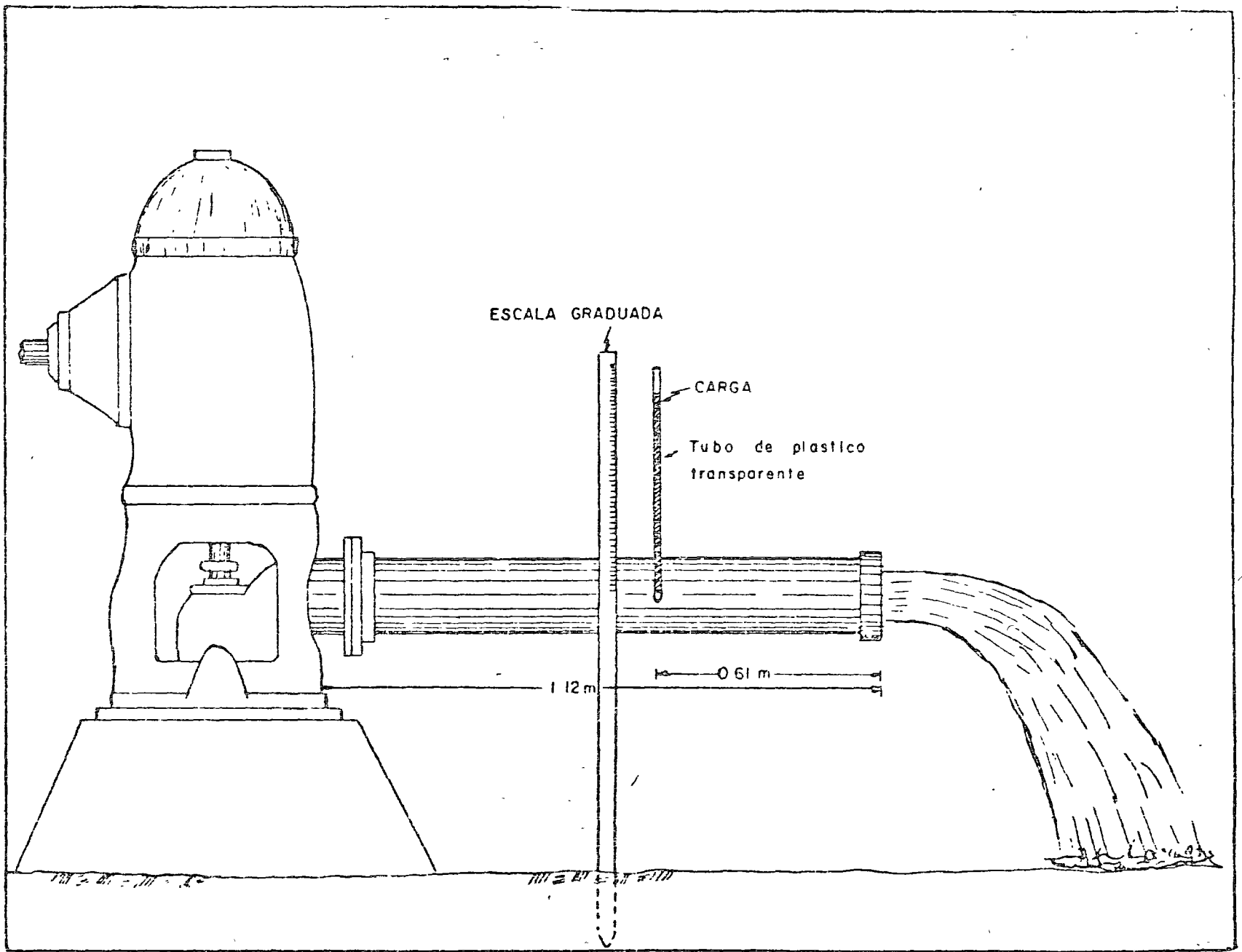
COLOCACION DE TUBERIA DE ADEME

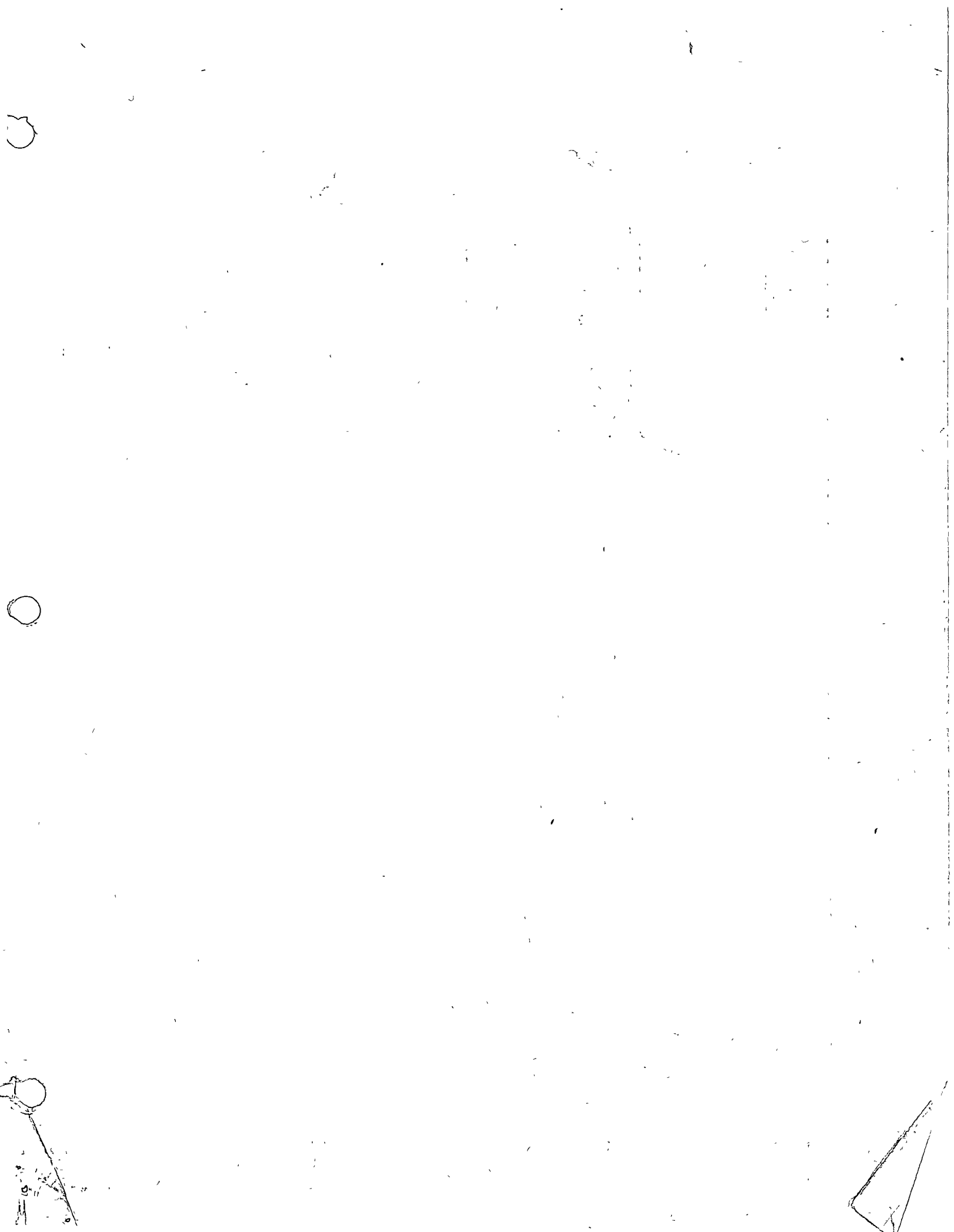






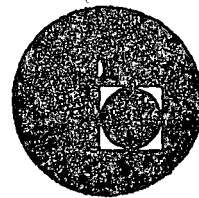






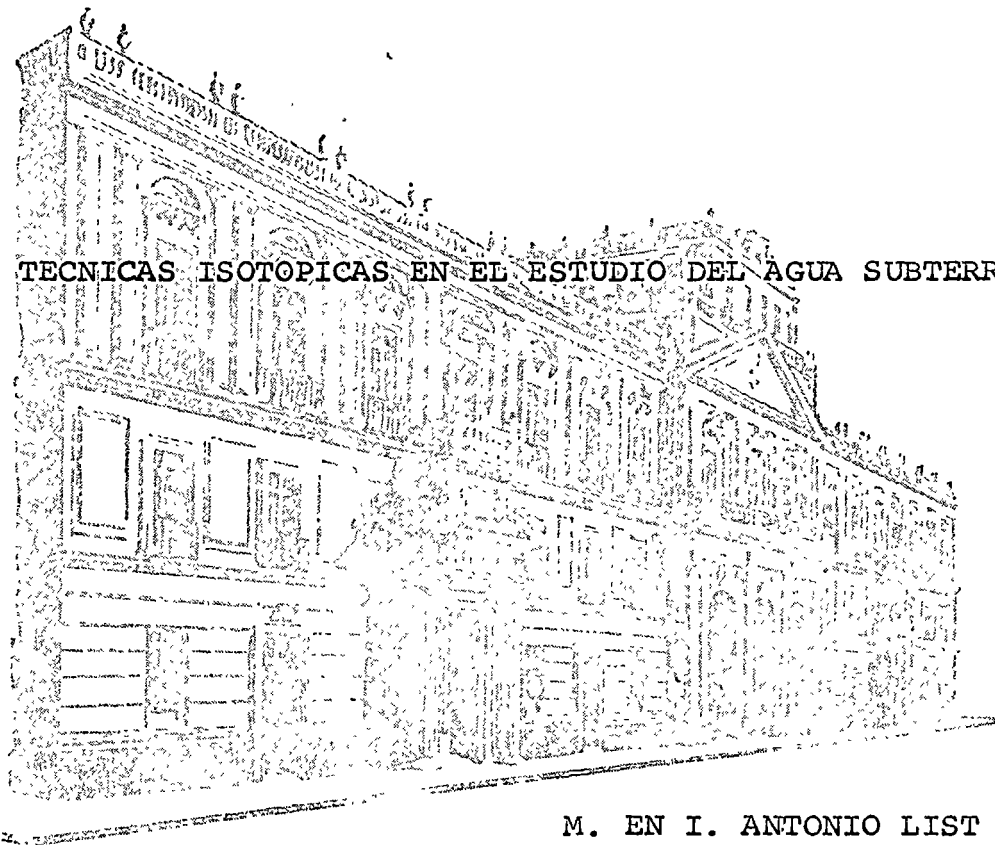


centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUBTERRANEA

LAS TECNICAS ISOTOPICAS EN EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRANEA



M. EN I. ANTONIO LIST MENDOZA

JULIO DE 1976.



CONFIDENTIAL  
U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE  
1967 O - 345-100



# LAS TECNICAS ISOTOPICAS EN EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRANEA

M. en I. Antonio List M.

-I-N-D-I-C-E-

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- TECNICAS ISOTOPICAS
- 3.- PRINCIPIOS BASICOS
- 4.- ISOTOPOS AMBIENTALES
  - 4.1.- Isótopos Estables
  - 4.2.- Isótopos Radioactivos en la Atmósfera
    - 4.2.1.- Tritio
    - 4.2.2.- Carbono-14
    - 4.2.3.- Silicio-32
- 5.- RECOLECCION DE MUESTRAS PARA ANALISIS ISOTOPICOS
  - 5.1.- Agua de Precipitación
  - 5.2.- Agua Superficial
  - 5.3.- Aguas Subterráneas
- 6.- DETECCION Y MEDIDAS DE LA RADIOACTIVIDAD
  - 6.1.- Detector Geiger-Muller
  - 6.2.- Contador de Centelleo
- 7.- APLICACION DE LAS TECNICAS ISOTOPICAS AL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRANEA
  - 7.1.- Aplicaciones de Isótopos Estables
  - 7.2.- Isótopos Ambientales Radioactivos
- 8.- RADIOISOTOPOS ARTIFICIALES
  - 8.1.- Riesgos y Precauciones
  - 8.2.- Consideraciones Básicas en la Escogencia de Ra  
dio-trazadores

BIBLIOGRAFIA

---

---

## 1.- INTRODUCCION

La presencia de isótopos en la -- composición del agua y el avance de la física atómica, han dado lugar al<sup>o</sup> desarrollo de técnicas útiles en el estudio del agua subterránea.

Entre los hallazgos más importantes que han facilitado la aplicación de una metodología, -- basada en la determinación de contenidos isotópicos, debe considerarse el descubrimiento del Tritio ( $^3\text{H}$ ), cuya nor-- mal existencia en la molécula de agua y fácil incorpora-- ción a la misma, lo han constituido como trazador ideal en estudios hidrológicos y como indicador que permite inferir y comprender diversos aspectos del comportamiento geohidro-- lógico de una zona o cuenca.

## 2.- TECNICAS ISOTOPICAS

Debe entenderse y tenerse presen-- te que las técnicas isotópicas, son una herramienta suple-- mentaria en las investigaciones hidrogeológicas, cuya apli-- cación depende en forma definitiva del conocimiento previo que se tenga del funcionamiento del área de estudio.

La forma ideal para planear la -- realización de un estudio isotópico es como sigue:

a) El geohidrólogo debe definir lo mejor posible el funcionamiento del área en investiga-- ción, definiendo los problemas hidrológicos principales y señalando posibles hipótesis de trabajo. En este punto in-- terviene el experto en técnicas isotópicas, quien discute y selecciona aquellos problemas que pueden estudiarse con tales técnicas y las hipótesis que se probarán.

b) El panorama que se tenga del área debe ser lo más completo posible e inclusive es reco-- mendable realizar una visita al campo. Con esos elementos podrá hacerse una selección correcta de los puntos de mues-- treo y ayudará a interpretar los resultados.



c) Es recomendable efectuar dos -  
muestreos, el primero permitirá identificar diferencias iso-  
tópicas, rangos de valores isotópicos y la posibilidad de ob-  
tener con estas técnicas resultados útiles al problema plan-  
teado.

Con apoyo en esa información se - -  
efectuará la segunda campaña, la que se enfocará hacia aque-  
llos aspectos donde podrán esperarse resultados satisfacto--  
rios.

### 3.- PRINCIPIOS BASICOS

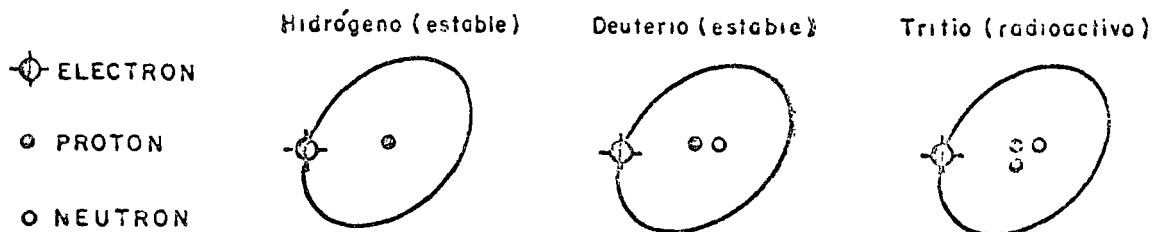
Los isótopos de un elemento son áto-  
mos que tienen el mismo número atómico, pero diferente núme-  
ro de neutrones y también distinta masa atómica.

En esos casos, en ocasiones, los nú-  
cleos de las especies isotópicas son inestables y ocurren --  
transformaciones simples o en serie, cambiando el átomo a --  
una forma estable y dando lugar a la formación de un diferen-  
te elemento o isótopo. Los cambios ocurren con emisiones de  
radiación conocidas como radioactividad. A tales átomos se  
les conoce como radioisótopos, en contraste con los isótopos  
estables que no manifiestan esos cambios y mantienen su esta-  
do isotópico.

La representación de los isótopos -  
es mediante la colocación de un número pequeño en el extremo  
superior izquierdo que indica el número de masa,  $^{18}\text{O}$  (Oxíge-  
no 18, isótopo del oxígeno que generalmente tiene como núme-  
ro de masa, 16) Si no se indica, se entiende que es la for-  
ma más común del elemento.

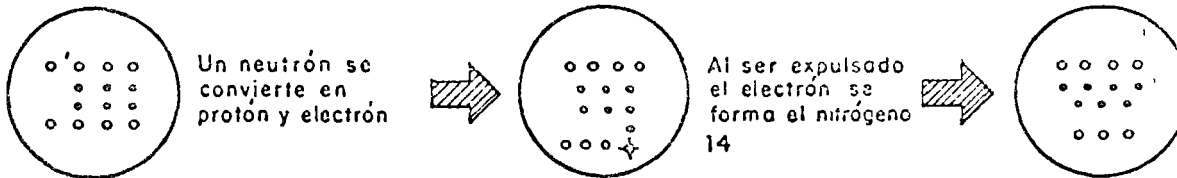
Como ejemplo de isótopos estables -  
y radioactivos se presentan las siguientes figuras:

El Hidrógeno se conoce generalmente  
con el símbolo H y su forma más común es con número y peso -  
atómico 1, pero tiene dos isótopos: uno estable, el deute--  
rio que tiene peso atómico 2 y el tritio que es radioactivo  
y tiene peso 3.



El carbono tiene como peso atómico normal 12, pero entre sus isótopos existe el carbono 14, -- que es radioactivo y sufre el siguiente proceso de transformación:

Carbono 14



### 3.1.- LEY DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO

Los isótopos con núcleos inestables se conocen como radioactivos y requieren antes de llegar a una situación estable de su núcleo, de una desintegración o decaimiento por emisión de partículas nucleares o fotones de energía. Este proceso es espontáneo y no puede modificarse por efectos externos. El decaimiento obedece una ley exponencial y el grado de decaimiento de cualquier radioisótopo es proporcional al número de átomos radioisotópicos que existen a un tiempo dado. La ley de decaimiento es exclusiva de cada radioisótopo y se describe por su vida media ( $T_{1/2}$ ), que es el tiempo requerido para que ocurra un decaimiento de la mitad de los átomos radioactivos existentes.

La ley de decaimiento se expresa por la siguiente relación.

$$N = N_0 e^{-\lambda T}$$

$N$  = Número de átomos radioactivos presentes al tiempo  $t$ .

$N_0$  = Número de átomos radioactivos presentes al inicio.

$\lambda$  = Constante de decaimiento (en recíproco del tiempo), es independiente del número de átomos presentes al inicio.

Cambiando la expresión anterior en términos de vida media.

$$1/2 N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 = 0.693$$

La ley de decaimiento es el principio básico que se utiliza para determinar la edad del agua muestreada.

La unidad de medida de la energía emitida en el proceso de decaimiento es el Curie Ci, que es igual a  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo (dps) y es aproximadamente igual a la que resulta de la desintegración de un gramo de radio.

Unidades más pequeñas son el milicurie que es la milésima parte, el microcurie es la millonésima parte y el picocurie que es  $10^{-12}$  parte.

### 3.2.- TIPOS DE RADIACION

Los átomos inestables, al desintegrarse y seguir su proceso de decaimiento, emiten tres clases principales de radiaciones:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ; cuyas características fundamentales son descritas a continuación:

Radiaciones de partículas alfa ( $\alpha$ ).- Consisten en la emisión de partículas idénticas a núcleos de Helio (dos protones y dos neutrones) con carga positiva. Es una radiación de baja energía, atenuada por unos centímetros de aire o por una hoja de papel que detiene su trayectoria.

Radiaciones de partículas beta ( $\beta$ ).- Equivalen a la emisión de un electrón y tienen carga negativa. Tienen un poder de penetración un poco mayor al de las partículas  $\alpha$ , pero una capa delgada de metal las detiene.

Radiaciones de partículas gamma ( $\gamma$ ).- Son radiaciones electromagnéticas de alta energía, que son altamente penetrantes y pueden atravesar espesores considerables de materia. Una capa de plomo las detiene. Las radiaciones gamma son similares a los rayos X.

### 4.- ISOTOPOS AMBIENTALES

La generación natural de isótopos que llegan a constituir parte de moléculas de agua, a los cuales se les ha denominado como "isótopos ambientales", ha permitido aplicar técnicas de física atómica a los estudios geohidrológicos.

Dentro del grupo denominado de isótopos ambientales se puede considerar la existencia de dos subgrupos, la de isótopos estables y la de los radioactivos. Entre los estables deben considerarse el deuterio que es un  $^2\text{H}$  y el oxígeno 18, mientras que los radioactivos más comúnmente utilizados en hidrología son el tritio  $^3\text{H}$  y el carbono 14, aun cuando existen también otros como el  $^{32}\text{Si}$  y algunos miembros de la familia del uranio y del torio.

En estos grupos se deben incluir también el tritio y  $^{14}\text{C}$  que se han producido como producto de las pruebas nucleares.

ISOTOPOS ESTABLES

Ya fue mencionado que los principales isótopos pesados estables que componen el agua son el deuterio ( $^2\text{H}$ ) y el oxígeno 18, cuya intervención en la composición de la molécula del agua da lugar a las siguientes formas de interés práctico:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . El deuterio se encuentra en cantidades próximas a los 320 ppm, mientras que el  $^{18}\text{O}$  alcanza concentraciones de 2 000 ppm.

La precisión que se tiene para determinar la cantidad presente de esos isótopos es de  $\pm 2\%$  para el deuterio (D) y de  $\pm 0.2\%$  para el  $^{18}\text{O}$ , consiguiéndose esta medición en laboratorios particulares a un costo que varía de 200 a 600 pesos por isótopo.

La composición isotópica de una muestra de agua no se expresa en términos absolutos, sino como la desviación por mil con referencia a un estándar llamado el SMOW (Standard Mean Ocean Water).

Los datos son expresados en unidades de desviación (delta).

$$\delta = \frac{R - R_{\text{smow}}}{R_{\text{smow}}} \cdot 10^3 \text{ o/oo}$$

En donde R se refiere a la relación de los isótopos D/H ó  $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$ .

Cuando hay un cambio en el estado del agua por condensación o evaporación, ocurre un fraccionamiento isotópico, principalmente porque los isótopos más pesados en  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  tienen menores presiones de vapor que el  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ .

Entonces, la mezcla evaporada de un recipiente abierto, lago o mar, contiene menor cantidad de isótopos que el agua que permanece en el recipiente, donde consecuentemente aumentan las cantidades de  $^{18}\text{O}$  y deuterio.

Este fraccionamiento es también particularmente sensible a la temperatura en el tiempo de condensación; a menor temperatura, menor concentración de isótopos pesados en la precipitación, fenómeno que origina una variación con la latitud. De la misma manera, la variación en la composición está relacionada con la altitud, de tal forma que la precipitación ocurrida en tierras bajas, muestra ma--

por concentración que la lluvia originada en las altas montañas.

De acuerdo con esa consideración, se entiende que los contenidos de isótopos pesados disminuyen con el incremento de altura. Un valor medio de disminución con la altura es de alrededor de 0.3% en  $^{18}\text{O}$  y 2.5% en contenido de deuterio, por cada 100 m de aumento en elevación.

El agua que no ha estado sujeta a -- evaporación, muestra por sus contenidos isotópicos una relación lineal del tipo general  $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + y$ , en la cual el valor más común de "y" es 10. (Fig. No. 2).

Si se manifiestan efectos de evaporación la pendiente de la curva varía entre 4 y 6.

#### 4.2.- ISOTOPOS RADIOACTIVOS EN LA ATMOSFERA

##### 4.2.1.- Tritio

Es un isótopo radioactivo de masa 3, su presencia en la lluvia se debe a dos causas: Es producido por la interacción de radiaciones cósmicas de alta energía con los componentes atmosféricos. La cantidad de tritio por este efecto varía, pero se ha estimado que sea del orden de 10 U.T. La segunda fuente es por acción del hombre como consecuencia de las explosiones nucleares iniciadas en 1952.

Debe mencionarse que las concentraciones máximas de tritio en cualquier lugar, varían con la estación, ocurriendo un máximo a fines de la primavera, también es notable que las concentraciones son menores en el hemisferio sur. Tiene una vida media de 12.26 años.

La mayoría del tritio que se encuentra en la atmósfera se oxida rápidamente para formar la molécula de agua HTO y es un indicador efectivo que manifiesta la presencia del agua que estuvo en la atmósfera en los últimos 20 años. Su contenido en el agua se expresa en términos de unidades de tritio, UT. Una unidad de tritio equivale a una concentración de un átomo de tritio por  $10^{18}$  átomos de hidrógeno, cantidad que es el límite inferior de determinación en el laboratorio.

El tritio originado en la atmósfera cae con la lluvia, "marcando" en forma natural el agua del ciclo hidrológico.

De esta manera el tritio se encuentra no sólo en el agua de precipitación, sino también en los ríos, aguas subterráneas, océanos, lagos, etc.

En los estudios de agua subterránea, las medidas de tritio dan información sobre el tiempo de recarga al sistema. Como ejemplo, si no hay mezclado por infiltraciones recientes se tiene:

Agua con contenidos de tritio menores a 3 UT se interpretan como que el agua tiene más de 20 años en el acuífero, caso común en acuíferos confinados.

Contenidos de tritio de 3-20 U.T. es obvio que es agua de reciente infiltración.

4.2.1.1.- Análisis:- Los niveles muy bajos de concentración y la energía baja de las radiaciones emitidas por el tritio, exigen el empleo de equipos de gran sensibilidad para su medición. En la actualidad estas mediciones se hacen en el laboratorio de un Contador Proporcional de Gas, o en un Contador de Centelleo Líquido.

El agua subterránea posee cantidades muy bajas de tritio, no detectables en ningún aparato; sin embargo, pueden medirse previa concentración por electrólisis y otros procedimientos.

#### 4.2.2.- CARBONO 14

Es un isótopo radioactivo del carbón con una vida media  $T_{1/2} = 5568$  años. Se origina por la radiación cósmica que produce neutrones, los que reaccionan con el nitrógeno. El carbón es oxidado a bioxido de carbono y se mezcla con el  $CO_2$  en la atmósfera. Las explosiones nucleares también han adicionado el contenido nominal.

La relación entre  $^{14}C$  y  $^{12}C$  se mantiene constante, en cualquier materia viviente que usa  $CO_2$  en su ciclo de vida y en sustancias como el agua, que reacciona con el  $CO_2$ .

El  $^{14}C$  permanece constante mientras el material está en equilibrio en la atmósfera, cuando se separa de la atmósfera, al dejar la zona de aeración en el suelo, principia su decaimiento. A partir de 1952 por las explosiones nucleares ha aumentado el contenido natural.

Para entender su uso para fechar el agua, es necesario conocer las formas en la que se encuentra, y las interacciones en las que participa.

En el agua se encuentra como  $\text{CO}_2$  disuelto, como bicarbonato o carbonato. En la atmósfera - al agua no puede disolver más de 1.2 m mole de  $\text{HCO}_3^-/1$ , pero durante su percolación aumentan los contenidos al pasar a través del suelo aireado, donde absorbe  $\text{CO}_2$  de origen -- biogénico, hidrolizándose a iones de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

El  $\text{CO}_2$  biogénico es asimilado de la atmósfera por las plantas; otro proceso es la oxidación bacteriológica de la materia orgánica y la descomposición de la planta que también produce  $\text{CO}_2$ .

En los carbonatos de calcio también hay carbón, los que dan origen a bicarbonatos.

4.2.2.1.- Análisis.- El análisis del C-14 presenta problemas similares a aquellos encontrados en el análisis de tritio, debidos a los bajos niveles de energía y concentración. Antes de ser analizado, el -- C-14 debe ser concentrado a partir de una muestra de agua de 100 a 200 litros para obtener de 6 a 8 gramos de Carbono.

#### 4.2.3.- SILICIO 32

Es un isótopo que se emplea menos frecuentemente, tiene una vida media  $T_{1/2}$  de aproximadamente 600 años. Se produce por radiación cósmica inducida por la descomposición del argón, siendo posteriormente removido de la atmósfera por la lluvia.

A la fecha hay dudas sobre su comportamiento en el suelo, lo que dificulta su empleo.

#### 5.- RECOLECCION DE MUESTRAS PARA ANALISIS ISOTOPICOS

El principal problema que se presenta en el estudio del contenido de isótopos ambientales en el agua, es el de obtener una muestra "sin contaminación", representativa del agua que se va a analizar. A -- continuación veremos las precauciones que deben observarse y los procedimientos a seguir en el muestreo del agua superficial y subterránea.

### 5.1.- AGUA DE PRECIPITACION

El muestreo periódico de Deuterio, O-18 y Tritio, debe hacerse preferencialmente en estaciones meteorológicas en donde puede disponerse de otros datos muy valiosos en la interpretación de las mediciones isotópicas. Para recoger la muestra puede utilizarse pluviómetros normales. Después de anotar el valor de la precipitación, al menos una vez al día, la muestra de lluvia, se transfiere a un tanque completamente cerrado y lo suficientemente grande, como para contener la precipitación de un mes. Al final de cada mes, o período de muestreo y luego de agitar bien el contenido del tanque, se llenan dos frascos para enviar al laboratorio. Un frasco de 20 ml de capacidad es suficiente para el análisis de Deuterio y O-18 y debe llenarse totalmente y taparse bien para evitar intercambios isotópicos -- con el aire. El tamaño del frasco para análisis de Tritio depende de la concentración total del Tritio y del método de análisis en el laboratorio, pero generalmente 1 litro es una cantidad suficiente para analizar las más pequeñas cantidades.

El mayor problema en el muestreo para Deuterio y O-18 es la prevención de la evaporación, la cual cambia la composición isotópica y puede conducir a serios errores de interpretación. Tal evaporación puede ocurrir en el pluviómetro, especialmente en zonas áridas o donde la temperatura es elevada. En este caso debe utilizarse un pluviómetro adicional especialmente diseñado. La precipitación se mide en el pluviómetro estándar y la muestra se toma en un recipiente (pluviómetro), de las siguientes características.

1o.) De superficies lisas y limpias. La parte externa puede pintarse de blanco brillante.

2o.) El recipiente puede ser un botellón de vidrio grueso y de cuello estrecho.

3o.) El embudo colector debe extenderse hasta el fondo del botellón.

4o.) El botellón ha de instalarse bajo la superficie del suelo.

5o.) Una pequeña cantidad de aceite lubricante de baja viscosidad puede hecharse en el botellón. (El aceite flota sobre la superficie del agua evitando así la evaporación).



6o) El espacio entre la boca del botellón y el tubo del embudo debe quedar estrechamente cerrado.

El D, O-18, y el T están sujetos a intercambios isotópicos con el contenido de humedad de la atmósfera, así que es muy importante evitar exposiciones prolongadas de las muestras.

## 5.2.- AGUA SUPERFICIAL

Muestras en lagos y ríos se toman también periódicamente. En el caso de ríos, para que una muestra sea representativa del respectivo mes o período de muestreo, es necesario tomar muestras diarias o diseñar un recipiente de volúmen conocido que reciba un flujo continuo de agua y la mezcla.

Un hecho muy importante que debe tenerse en cuenta en el muestreo de agua superficial, es que la muestra debe ser representativa del lago o río y no de agua estancada o contaminada. Debe entonces evitarse el tomar muestras de sitios cercanos a fuentes de contaminación (alcantarillas, aguas residuales, o corrientes afluentes de gran volúmen).

El caudal, la humedad relativa, la temperatura del aire y del agua, la salinidad y otros parámetros pueden ser de gran utilidad en el análisis e interpretación de los datos.

## 5.3.- AGUAS SUBTERRANEAS

El principal problema en el muestreo de agua subterránea, es la posible inseguridad de que la muestra sea representativa del acuífero o zona en estudio. Para esto, es necesario hacer una selección de los pozos que tengan la máxima información disponible. Pocas muestras cuidadosamente seleccionadas son más útiles que decenas de muestras con datos inseguros.

Aún cuando se tengan datos completos de un pozo (profundidad, geología, estratigrafía, etc.), es muy importante evitar contaminación de las muestras, a partir de las zonas altas penetradas por el pozo, factor decisivo en el análisis de T y C-14 como consecuencia de que, generalmente, las zonas superficiales de agua subterránea poseen mayor concentración de esos isótopos que las zo

nas profundas.

El agua que se halla en reposo dentro de pozos fuera de uso, no sirve para análisis isotópicos; cuando se desee tomar una muestra de un pozo es necesario -- bombear la suficiente cantidad de agua para asegurar que la muestra tomada al final del bombeo proviene del acuífero.

La mayor cantidad posible de información debe acompañar la muestra de agua; sitio de muestreo, fecha, profundidad del pozo, acuífero, temperatura del agua, profundidad del agua, acuífero confinado, semiconfinado o libre, etc.

## 6.- DETECCION Y MEDIDA DE LA RADIOACTIVIDAD

Teniendo en cuenta que las radiaciones emitidas Alfa, Beta y Gamma tienen características especiales, se hacen necesarios equipos convenientes para detectar dichas radiaciones.

Los detectores más usados para este fin son los contadores Geiger-Müller y los contadores de centelleo. Estos aparatos poseen una sensibilidad tal que pueden medir la radioactividad natural del medio ambiente.

### 6.1.- DETECTOR GEIGER - MULLER

Consta de un tubo al vacío con un alambre de metal a lo largo de su eje. El tubo se llena con una mezcla de gas a baja presión. El alambre se lleva a un potencial tal que cuando una partícula ionizada pasa a través del cilindro, se produce un impulso eléctrico que fluye a través del alambre; luego se amplifica por medio de un amplificador y finalmente se registra en un escalímetro.

### 6.2.- CONTADOR DE CENTELLEO

Cuando una partícula de alta energía choca con un fósforo se origina un pulso de luz. Esa -- emisión de luz puede convertirse en un impulso eléctrico por medio de un fotomultiplicador. Esta es la base del contador de centelleo que consta de un cristal de Ioduro de Sodio activado con Talio. El centelleo producido y transformado es también ampliado por medio de un fotomultiplicador, en tal forma que finalmente una corriente medible se registra en un escalímetro, que es un aparato que registra la cantidad de radiaciones en números absolutos (cuentas), en un tablero es

pecialmente diseñado.

## 7.- APLICACION DE LAS TECNICAS ISOTOPICAS AL ESTUDIO DEL -- AGUA SUBTERRANEA

La fuente de recarga importante a los acuíferos proviene de la lluvia, de donde se generan -- los elementos que constituyen la cantidad renovable de agua subterránea.

El principio básico que permite la aplicación de técnicas isotópicas, con el fin de ayudar a -- resolver el problema que implica conocer el complicado meca-- nismo, de funcionamiento geohidrológico de una cuenca o zona, es la variación temporal y espacial que ocurre en la canti-- dad o concentración isotópica. Con base en ella puede iden-- tificarse el tiempo y lugar de recarga y por el decaimiento radioactivo, estimar el tiempo de residencia del agua en un sistema acuífero.

En general, estas técnicas son úti-- les para aclarar ó resolver ambigüedades y son fuente única de información para fechar algunos eventos del ciclo hidro-- lógico.

Ya fué mencionado que la composi-- ción de deuterio y  $^{18}\text{O}$ , está determinada por los siguientes cuatro efectos que actúan en combinación: distancia de la -- costa, temperatura de condensación, intercambio y evapora-- ción. De estos el más importante es la temperatura.

El tritio y carbono  $^{14}\text{C}$  son afecta-- dos por los mismos procesos; sin embargo, estos isótopos ra-- dioactivos en años recientes han sufrido afectaciones arti-- ficiales por las explosiones nucleares.

Comprendidos los fenómenos funda-- mentales que afectan las cantidades de isótopos que se pue-- den encontrar en el agua subterránea, a continuación se men-- cionarán algunas aplicaciones posibles.

### 7.1.- APLICACIONES DE ISOTOPOS ESTABLES

a) En regiones donde la fuente de recarga tiene concentraciones isotópicas diferentes, debi-- das a la distribución irregular de la lluvia o a los efec-- tos de evapotranspiración, es posible que el agua subterrá-- nea por sus contenidos isotópicos, señale cuando ocurrió la

recarga y en ocasiones indique la ocurrencia de fuertes tormentas.

b) Debido al gran enfriamiento -- que se presentó durante el pleistoceno, los acuíferos que -- tuvieron su recarga en aquella época, se caracterizan por tener agua subterránea con bajos contenidos isotópicos, en relación con aquellos cuya recarga ocurrió más recientemente. Esta situación puede ocurrir en zonas áridas, donde con apoyo en los contenidos de  $^{14}\text{C}$  pueden confirmar la edad antigua del agua.

c) Los efectos de fraccionamiento isotópico también son aprovechados para conocer la historia del agua. Tal es el caso de un proceso de evaporación que produce un efecto no reversible en la relación deuterio - oxígeno 18, el que de hecho marca las aguas de lago, las -- que después pueden identificarse cuando se muestran en el -- acuífero. También ocurre que si el agua en el subsuelo ha -- estado sujeta a elevadas temperaturas, como es el caso de -- los manantiales termales, sufre un intercambio de  $^{18}\text{O}$  con -- el oxígeno que compone las rocas. Como el deuterio no es -- afectado en la misma forma, el proceso anterior caracteriza a las aguas que han sido sometidas a elevadas temperaturas.

d) Un efecto muy útil es la relación que puede existir entre contenidos isotópicos diferentes y el área donde ocurre la recarga. En este efecto se -- puede basar la diferenciación entre la recarga que recibe -- un acuífero, por la infiltración de un río que tiene un desarrollo largo y la que puede recibir localmente. También es posible diferenciar la recarga que proviene de zonas altas o bajas. En Europa por ejemplo la concentración isotópica disminuye en el caso de  $^{18}\text{O}$  en 0.2% por cada 100 m de altura.

## 7.2.- ISOTOPOS AMBIENTALES RADIOACTIVOS

a) Por la vida media del tritio -- relativamente corta: 12.26 años, es posible diferenciar -- fuentes modernas de recarga, pues si se recuerda que a partir de 1952, cuando se iniciaron las explosiones nucleares, se incrementó notablemente el contenido de tritio en la atmósfera, es de esperarse que valores más altos de los registrados como normales, antes de tales fenómenos (5-10 U.T.), correspondan a recargas ocurridas después de esos años, o -- bien que las muestras contengan al menos algo de recarga moderna. Así mismo, en los casos en que haya grandes manantiales de caudal variable, según la recarga que reciban y estén compuestos en parte de agua más vieja, es posible esti-

mar la relación entre los dos componentes, apoyados en muestreo y determinación de tritio.

b) El decaimiento que ocurre en los isótopos radioactivos, también se ha utilizado para determinar o estimar la velocidad del flujo subterráneo; no obstante, ésta no es una práctica simple pues implica el tener un sitio localizado de recarga, además de esperar que en el trayecto no haya mezcla con otras aguas, en resumen implica tener un conocimiento completo de las condiciones acuíferas regionales. Por otra parte si se utiliza tritio debe tenerse un flujo rápido, ya que la vida media de ese isótopo así lo exige.

En resumen, hasta ahora se han dado ideas que permiten observar que los isótopos ambientales utilizados en forma conjunta, representan elementos valiosos para conocer o completar el conocimiento sobre el origen y movimiento del agua subterránea. Los isótopos ambientales estables son indicadores excelentes del lugar de recarga, mientras que los radioactivos ayudan a conocer el tiempo de residencia del agua en el sistema.

## 8.- RADIOISOTOPOS ARTIFICIALES

Hasta ahora se ha hecho una breve descripción de la aplicación de técnicas isotópicas al estudio del agua subterránea, basadas fundamentalmente en la presencia de isótopos ambientales.

No obstante, se considera necesario comentar otras aplicaciones de esas técnicas, cuyo principio consiste en la producción de isótopos artificiales y la "siembra" de los mismos con determinado objeto.

Se conoce como isótopos artificiales, aquellos que se preparan bombardeando elementos estables con partículas nucleares, acción que se lleva a cabo en reactores nucleares o en generadores de neutrones. El núcleo del elemento bombardeado captura un neutrón y se origina un radioisótopo, el cual por su inestabilidad comienza a emitir radiaciones e inicia su decaimiento. En algunos casos el proceso de captura de un neutrón, es seguido por la emisión de una o varias partículas nucleares, originándose así un radioisótopo de un elemento distinto al bombardeado.

Como ejemplos comunes se puede mencionar los siguientes:

a) Bombardeando oro natural (Au-197) con neutrones, se produce una captura de estos que da origen al isótopo inestable Oro-198, muy útil como trazador en Hidrología.

b) Bombardeando Telurio (Te-130), se produce una transformación nuclear que resulta en la producción de un isótopo del yodo (I-131), que es de gran utilización en estudios hidrológicos.

### 8.1.- RIESGOS Y PRECAUCIONES

El uso de radioisótopos artificiales implica un incremento en la radioactividad natural lo que a su vez exige el que se tengan en cuenta consideraciones de salud y seguridad. El principio básico a seguir es que las cantidades presentes en el área de investigación, deben limitarse a las dosis máximas y permisibles.

### 8.2.- CONSIDERACIONES BASICAS EN LA ESCOGENCIA DE RADIO--TRAZADORES

El factor más importante en la escogencia de un trazador, es su apropiada característica química para el propósito. Trazadores para agua en movimiento, especialmente agua subterránea, no deben reaccionar con la matriz o minerales de las rocas. El trazador ideal debe seguir el comportamiento de la masa de agua en la cual está mezclado, con un alto grado de fidelidad. En este aspecto el agua tritiada es considerada como un trazador ideal. Algunas veces, sin embargo, se exige la selección de un trazador que sea fuertemente absorbido por la matriz sólida, como en los estudios de filtraciones en embalses y de transporte de sedimentos.

Preferencialmente, la vida media del trazador debe ser tal que al terminar el experimento el radioisótopo pierda "toda" su actividad.

El tipo y nivel de energía de las radiaciones emitidas, determinan la sensibilidad de la detección, las concentraciones requeridas y el tipo de instrumentos que deben usarse. El tritio, por ejemplo, aunque es considerado un trazador ideal por sus propiedades químicas, no puede ser analizado en el campo en bajas concentraciones y tiene que ser llevado al laboratorio.

Resumiendo, la escogencia del radiotrazador está dada por las condiciones del experimento. Si varios trazadores pueden utilizarse, se escogerá aquél que ofrezca la mayor sensibilidad de detección y los menores riesgos de su manejo. La cantidad de concentración usada debe limitarse a la mínima requerida en cada caso.

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

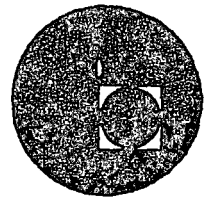
---

- 1.- Guide book on Nuclear Techniques in Hydrology.  
Technical Reports Series No. 91  
International Atomic Energy Agency, Vienna 1968
  
  - 2.- Isótopos en Hidrogeología. Apuntes utilizados en  
el curso de Geohidrología impartido en el I.P.N.
  
  - 3.- Groundwater Studies, Chapter 10, prepared by the -  
staff of the section of Isotope Hydrology of the -  
International Atomic Energy Agency.
- 
-

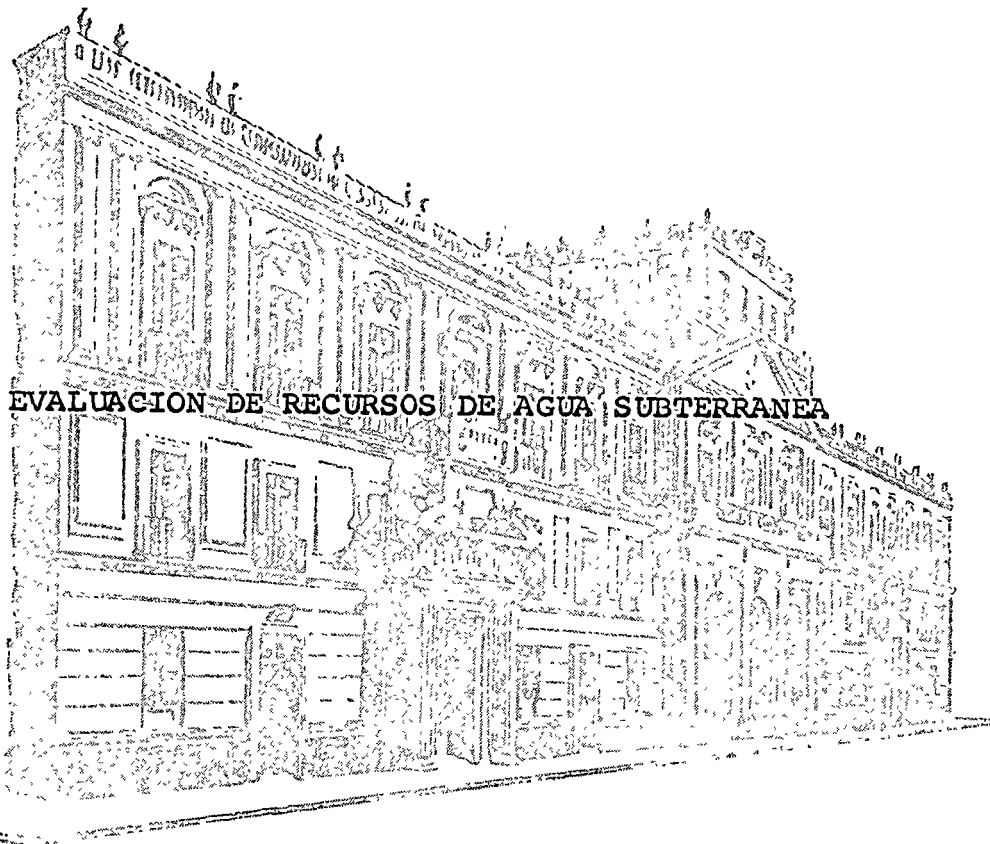




centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUBTERRANEA



M. EN I. ANTONIO LIST MENDOZA

JULIO DE 1976.



1. The first part of the book is a  
general introduction to the subject  
of the history of the world.

1. The first part of the book is a  
general introduction to the subject  
of the history of the world.



1. The first part of the book is a  
general introduction to the subject  
of the history of the world.



1. The first part of the book is a  
general introduction to the subject  
of the history of the world.



## EVALUACION DE RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA

En cada zona, según las condiciones geológicas existentes, un cierto volumen de agua de lluvia, que no es medible en forma directa, se infiltra para alimentar a los acuíferos. El volumen infiltrado constituye el recurso renovable del acuífero; su conocimiento es indispensable para planear el aprovechamiento racional de las aguas subterráneas, pues la extracción de un volumen sensiblemente mayor puede inducir efectos perjudiciales que, en algunas ocasiones, llegan a inutilizar parcialmente un acuífero.

### METODOS INDIRECTOS.

Se ha intentado cuantificar los volúmenes infiltrados por métodos indirectos, tales como el análisis del ciclo hidrológico y la aplicación de coeficientes de infiltración.

#### Análisis del Ciclo Hidrológico.-

El primer método consiste en estimar los volúmenes de escurrimiento, precipitación y evaporación, para calcular la infiltración por diferencia en la ecuación del ciclo hidrológico:

$$I = P - E - S$$

en la que I es la infiltración; P, la precipitación; E, la evaporación real, y S, el escurrimiento superficial.

El escurrimiento superficial puede conocerse en forma más o menos aproximada, mediante estaciones hidrométricas instaladas en las corrientes que drenan el área.

Una estimación de los volúmenes precipitados puede hacerse, si se tienen estaciones climatológicas distribuidas en el área estudiada.

La estimación de la evaporación real es el mayor problema y constituye la deficiencia principal del método. La evaporación medida mediante evaporímetros y la calculada mediante fórmulas, es la potencial; es decir, la que

ocurriría de una masa de agua o de un terreno permanentemente saturado. La evaporación real es una cierta fracción de la potencial, que depende de las condiciones de humedad del suelo. Como estas últimas varían constantemente en el área y en el tiempo, en forma prácticamente imposible de conocer, cualquier valor que se le suponga a dicha fracción puede estar -- completamente fuera de la realidad.

Tomando en cuenta que la evaporación real no puede ser mayor que la precipitación, una estimación gruesa de la primera sería considerarla como un alto porcentaje de la segunda (75 a 90%). Sin embargo, es claro que los errores cometidos en esta estimación, los cuales pueden ser poco significativos en cuanto al orden de magnitud de la evaporación, pueden ser tan grandes o mayores que la infiltración calculada a partir de la ecuación del ciclo hidrológico. Así, el volumen infiltrado puede ser el 2, el 5, el 8, el 10% . . . del volumen precipitado, dependiendo de la evaporación que se suponga o se calcule.

El método, pues, carece de validez, pues los errores cometidos en la estimación de los demás términos de la ecuación (P, E y S) llegan a ser tales, que el volumen de infiltración calculado puede ser fácilmente lo mismo 3 o 5 veces el volumen real infiltrado que la tercera o la quinta parte del volumen real infiltrado.

#### Coefficientes de Infiltración.-

Este método consiste en aplicar coeficientes de infiltración a las formaciones geológicas que afloran en el área estudiada. Estos coeficientes hipotéticos (prácticamente inventados) representan el volumen infiltrado en una cierta formación, expresando como un porcentaje del volumen medio de lluvia precipitado sobre la misma.

Para aplicar el método se definen en un plano geológico las formaciones que afloran en el área; seguidamente, se cuantifican los volúmenes medios de precipitación sobre cada una de ellas, mediante un mapa de isohietas. El volumen infiltrado en una cierta formación, se calcula como el producto del coeficiente de infiltración asignado a la formación y el volumen precipitado respectivo. El volumen total infiltrado en el área es la suma de los volúmenes infiltrados en cada una de las formaciones.

La principal deficiencia del método, estriba en que el fenómeno de la infiltración no guarda relación alguna con el volumen de lluvia, sino más bien con la intensidad de lluvia: no es lo mismo que un cierto volumen de lluvia anual se precipite distribuido más o menos uniformemente a lo largo de varios meses, a que el mismo volumen ocurra concentrado en unos cuantos días o semanas.

Además, los coeficientes no toman en cuenta factores tales como pendiente del terreno y vegetación. Por último, en la mayoría de los casos se utilizan, para la aplicación del método, planos geológicos convencionales en los que en una misma formación, clasificada atendiendo a su edad y origen, se engloban materiales con capacidades de infiltración tan diferentes como la arcilla y la grava.

Por todo lo anterior, este método carece también de validez por la inconsistencia de las hipótesis en que se basa.

Por otra parte, cabe indicar que aun cuando pudiera ser estimado con cierta precisión, el volumen de infiltración no corresponde necesariamente a la recarga de un acuífero, pues una parte de él es retenida por las formaciones que se encuentran arriba del nivel freático. En algunos casos, incluso, puede ocurrir que todo el volumen infiltrado sea retenido y que el acuífero no reciba recarga alguna.

Es evidente, entonces, que los métodos indirectos son totalmente inadecuados para determinar la potencialidad de un acuífero.

#### BALANCE DEL AGUA SUBTERRANEA

La evaluación de la potencialidad de un acuífero debe realizarse mediante un método que trabaje directamente con el acuífero, con el agua ya infiltrada y relativamente al margen de los fenómenos que ocurren en la superficie. Este método recibe el nombre de "balance de agua subterránea".

Un acuífero es un recipiente subterráneo que tiene recargas, descargas y un cierto almacenamiento. Como respuesta a la acción combinada de las recargas y las descargas, el nivel del agua del recipiente varía, descendiendo si la recarga es menor que la descarga, y ascendiendo, en caso ..

contrario. La recarga, la descarga y las variaciones en el almacenamiento, en un intervalo de tiempo dado, están relacionadas por un principio universal: el principio de la conservación de la materia. El balance de agua subterránea se basa en este principio, y tiene por objetivo principal la determinación del volumen de recarga de un acuífero.

#### Ecuación de Balance.-

A la ecuación que expresa el principio de conservación de la materia aplicado a un acuífero, o porción del mismo, se le llama "ecuación de balance de agua subterránea". En su forma más simple, esta ecuación es:

$$\text{Recarga} - \text{Descarga} = \text{Cambio de Almacenamiento.}$$

Ahora bien: tanto la recarga como la descarga ocurren en diferentes formas. La recarga puede ocurrir por flujo subterráneo ( $E_h$ ) y/o por recarga vertical en el área de balance ( $R$ ). La descarga puede tener lugar por flujo subterráneo ( $S_h$ ); aflorando en forma de manantiales, o a una corriente superficial ( $D$ ); mediante pozos de bombeo ( $B$ ), y por evaporación en zonas con nivel freático somero ( $E_v$ ). Si llamamos y al cambio de almacenamiento, la ecuación puede expresarse también como:

$$E_h + R - S_h - D - B - E_v = V \pm V \quad (6)$$

La expresión (6) es la ecuación general del balance de agua subterránea. En cada caso, según el mecanismo de recarga y descarga del acuífero en estudio y del intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, cada uno de los términos de (6) podrá o no, aparecer. Por ejemplo, si se trata de un acuífero limitado totalmente por fronteras impermeables, los términos  $E_h$  y  $S_h$  no aparecerán, ya que no existe entrada ni salida por flujo subterráneo. Si el acuífero no tiene descarga por evaporación ni por afloramientos, los términos  $D$  y  $E$  serán suprimidos de la ecuación. Por otra parte, la ecuación de balance para un mismo acuífero podrá variar de un intervalo de tiempo a otro: la ecuación correspondiente a un período de estiaje no incluirá el término  $R$ , mientras que la correspondiente a un período lluvioso, si lo incluirá.

En todos los casos, es necesario tener una idea

más o menos clara del comportamiento del acuífero, para plantear su ecuación de balance.

#### Area de Balance.-

El área utilizada para efectuar el balance de agua subterránea depende de varios factores. Por una parte, lo ideal sería efectuar el balance para todo el acuífero -- (valle, planicie) a fin de conocer su potencialidad total; -- sin embargo, esto no siempre es posible, debido a que la aplicación del balance requiere del conocimiento del comportamiento del acuífero, observado en pozos, los cuales no siempre se encuentran distribuidos en toda el área, sino solo en una porción de la misma. Por consiguiente, en muchas ocasiones el área de balance tiene que limitarse al área con datos disponibles.

Otras veces, aun cuando se dispone de información acerca del comportamiento y características de todo el acuífero, puede interesar, por alguna razón, conocer especialmente el funcionamiento y potencialidad de una porción del mismo. En este caso el área de balance se limitará a esa porción.

El área de balance puede estar limitada por -- fronteras reales, geológicas e hidrológicas, tales como afloramientos o masas de agua (mar, lagos, etc.), y por fronteras virtuales, imaginarias.

#### Cuantificación de los Términos de la Ecuación de Balance.-

Una vez seleccionada el área de balance se procede a valuar los términos de la ecuación.

Los volúmenes de entrada y salida por flujo -- subterráneo,  $E_h$  y  $S_h$ , se obtienen multiplicando los caudales de flujo que pasan por el perímetro del área de balance, calculados como se indicó en el capítulo "Flujo en Medios Porosos", por el intervalo de tiempo utilizado para plantear el balance. Es decir:

$$E_h = \sum_j Q_j t = \sum_j T_j B_j i_j t$$

en que  $T_j$ ,  $B_j$  e  $i_j$  son la transmisibilidad, el ancho de flujo y el gradiente, del canal de flujo  $j$ , respectivamente;  $t$  es -- el intervalo de tiempo considerado para plantear el balance,

y ne es el número de canales de flujo de entrada, definidos en la periferia del área de balance. En la misma forma se calcula  $S_h$ .

El volumen descargado por el acuífero a un río y en forma de manantiales,  $D$ , se cuantifica mediante estaciones de aforo para medir la descarga de los manantiales y el caudal base de las corrientes.

El volumen de bombeo,  $B$ , podría conocerse fácilmente y con precisión, si los pozos contaran con medidores instalados en la descarga de los equipos de bombeo. Como esto no se tiene en la mayoría de los casos, es necesario recurrir a estimaciones indirectas, basadas en superficies y láminas de riego o en caudales y tiempos de bombeo.

Una estimación bastante aproximada de la descarga del acuífero por evapotranspiración,  $E_v$ , se tiene aplicando la evaporación potencial medida, al área en que está ocurriendo este tipo de descarga.

El cambio de almacenamiento se calcula a partir de la evolución piezométrica y del coeficiente de almacenamiento del acuífero. Mediante las curvas de igual evolución del nivel estático correspondientes al intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, se calcula, en el caso de un acuífero libre, el volumen de acuífero drenado o saturado en dicho intervalo, y en el caso de un acuífero confinado, la variación total de la presión en el mismo intervalo. Este volumen o esta variación de presión, multiplicado por el coeficiente de almacenamiento respectivo, proporciona el cambio de almacenamiento. En algunos casos, el coeficiente de almacenamiento es conocido mediante pruebas de bombeo, o inferido a partir del conocimiento de la geología subterránea; pero en otros, su valor regional es muy dudoso. Cuando ocurre esto último, el coeficiente de almacenamiento se considera como una incógnita a despejar en la ecuación de balance.

La recarga vertical en el área estudiada, es un término que no puede obtenerse en forma directa, y sólo puede cuantificarse despejándolo de la ecuación. Para incluirla en la ecuación, o ecuaciones de balance, es necesario tener un conocimiento aproximado de la forma en que ocurre y de su distribución en el tiempo. Es necesario saber, por ejemplo, si la recarga al acuífero se concentra en unos cuantos meses del año, o si ocurre a lo largo de todo el año como en el caso de



zonas agrícolas regadas con agua superficial, en las que los retornos de agua de riego y las pérdidas por infiltración - en los canales, propician la alimentación prácticamente continua del acuífero.

Número de Ecuaciones de Balance.

Dado que la recarga es un fenómeno cíclico, - se calcula su valor por ciclo; es decir, por año.

El número de ecuaciones de balance que deben plantearse, dependerá, en cada caso, del número de incógnitas a despejar. Si la única incógnita es la recarga, bastará con plantear una ecuación, que puede ser la correspondiente a un año o a la fracción del mismo en la que se considere que ocurre la recarga. La solución de la ecuación proporcionará la recarga anual buscada.

Si además de la recarga se tiene otra incógnita (un coeficiente de almacenamiento regional, por ejemplo), será necesario plantear dos ecuaciones, correspondientes a dos intervalos de tiempo independientes, que pueden ser dos fracciones complementarias de un año; por ejemplo, enero-junio y julio-diciembre.

En general, será necesario plantear tantas - ecuaciones como incógnitas se tengan; aunque en la gran mayoría de los casos el número de incógnitas es de 1 a 2.

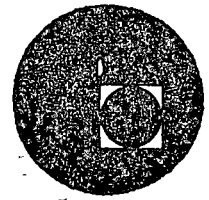
En cualquier caso, naturalmente, deberá contarse con la información necesaria para obtener los valores de los términos restantes de la ecuación, correspondientes a los intervalos de tiempo seleccionados; es decir, deberá contarse con las configuraciones piezométricas correspondientes al inicio y final de cada intervalo, y deberá conocerse la evolución piezométrica y el volumen descargado por el - acuífero, en cada uno de dichos intervalos.

En general, una evaluación basada en la información correspondiente a un año, proporciona una idea preliminar de la recarga al acuífero y de las condiciones de explotación en que se encuentra el mismo. Sin embargo, como - la recarga no es constante en el tiempo, sino que varía de un año a otro con la cuantía y distribución de la precipitación entre otros factores, es necesario obtener la recarga correspondiente a varios años con diferentes condiciones de precipitación, a fin de obtener una recarga media anual.

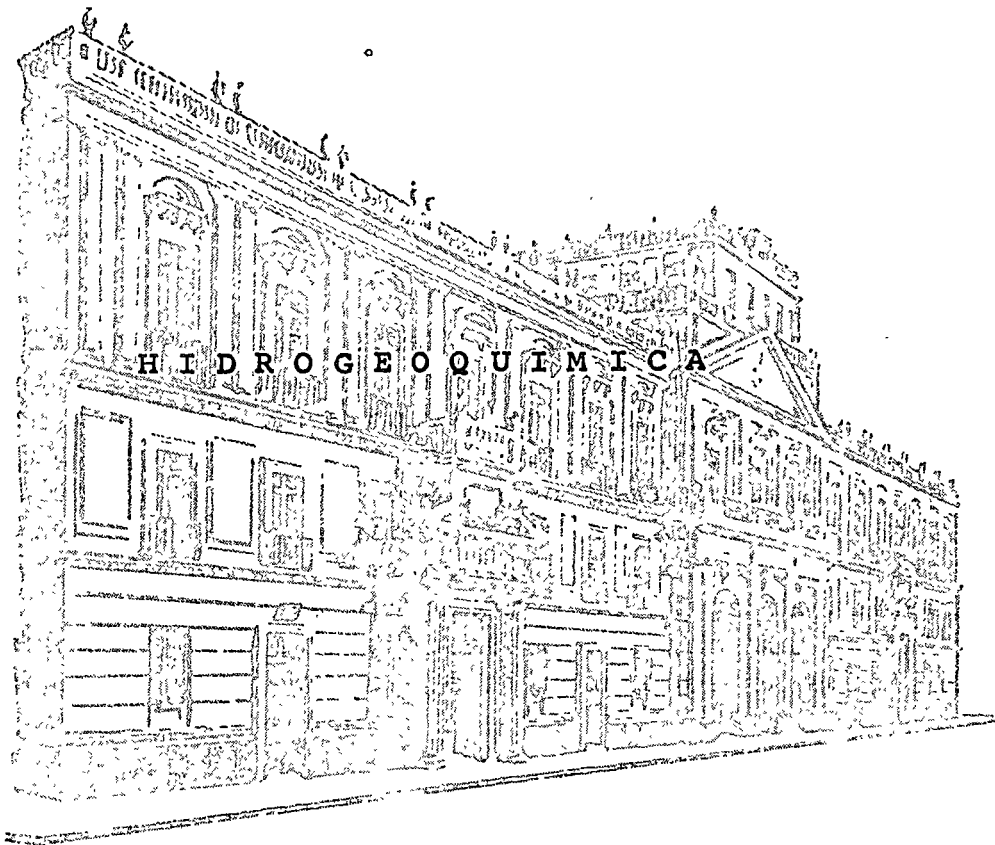




centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



## HIDROLOGIA SUBTERRANEA



M. EN I. ANTONIO LIST MENDOZA

JULIO DE 1976.

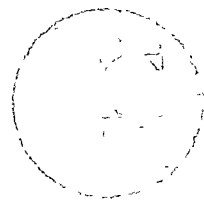
PROPOSTA Nº 100/74

CONTRATO Nº 100/74 - 100 000 000 000 000

EMPRESA: S.A. SIDERURGICA

VALOR: R\$ 100.000.000,00

CONTRATO DE LICITAÇÃO Nº 100/74  
EMPRESA: S.A. SIDERURGICA  
VALOR: R\$ 100.000.000,00



10

# H I D R O G E O Q U Í M I C A

Por M. en I. Antonio List M.

## I.- INTRODUCCION.

De acuerdo con algunos autores, es posible mencionar que: "La hidrogeoquímica se encarga del estudio de la parte del ciclo hidrológico, que relaciona el carácter químico del agua, con su medio ambiente natural".

La forma de realizar el mencionado estudio consiste en tomar muestras de agua de diferentes fuentes, las cuales son analizadas químicamente, con el fin de observar los cambios de calidad química que ocurren en el espacio y en el tiempo, los cuales a su vez proporcionan información que en muchos casos es posible relacionar con: las condiciones climatológicas, la geología regional, el funcionamiento geodrológico, etc.

Una de las formas, en la cual se puede resumir los principales procesos de hidrogeoquímica, que se deben estudiar, fué propuesto por Hanshaw y Back (Advances in Hydroscience, Tomo II pág. 60) y es la siguiente:

- a) El viento sobre los océanos lleva tierra adentro: sodio, cloruros y otras sustancias;
- b) El agua al condensarse disuelve nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono de la atmósfera, elementos que llegan al suelo cuando llueve o nieva;
- c) Cuando el agua se infiltra a través de suelos ricos en materia orgánica, disuelve cantidades adicionales de  $CO_2$ ;
- d) Disuelve minerales y libera aniones y cationes;
- e) Oxida minerales sulfurosos para proveer sulfatos, y algunos otros constituyentes;
- f) Los cationes en solución son intercambiados con los existentes en suelos y rocas;

- g) Los sulfatos en solución son reducidos bacteriológicamente y se forma  $CO_2$ .
- h) Cuando determinadas sales alcanzan la sobresaturación, se precipitan minerales;
- i) Por evaporación y transpiración el agua retorna a la atmósfera, dejando productos químicos, - - otra parte regresa al océano como escurrimiento superficial o por descarga subterránea, arrastrando en ambos casos, solidos disueltos y posiblemente materia en suspensión.

Con base en lo anterior, fácilmente se puede apreciar que los estudios de hidrogeoquímica, implican la necesidad de considerar gran número de factores y disciplinas, los cuales tienen influencia en los cambios de calidad química del agua, y deben tomarse en cuenta, al tratar de obtener información de tipo cualitativo, a partir de esas variaciones.

Es evidente entonces que además de ciertos factores "naturales" que tienen influencia en la calidad del agua, durante la realización de un estudio deberán tenerse precauciones para no agregar efectos no cuantificables, los cuales se presentarán si el muestreo o los análisis de laboratorio - no se realizan en la forma debida.

## II.- MUESTREO.

En estudios de hidrogeoquímica, como en cualquier otro, en el cual se requiera recolectar muestras, a partir de las cuales se obtendrá la información a procesar, es necesario cumplir ciertas recomendaciones, las cuales tienen como - finalidades principales tener información de toda el área en estudio y evitar diferencias debidas al proceso de muestreo.

En el problema en estudio, la elección de los sitios de muestreo, así como la forma de realizarlos, deben de cidirse de acuerdo con los lineamientos siguientes, los cuales se consideran determinantes en la calidad de las muestras, así como en los resultados que se obtengan.

1.- El muestreo debe ser representativo de toda el área de estudio.- El número de muestras y la distribución de las mismas deberán escogerse de tal forma que la información

que se obtenga de las muestras, sea suficiente y de buena calidad como para llegar a conclusiones confiables.

En estudios de hidrogeoquímica el programa de muestreo dependerá de la geología regional, de las diferentes ca--racterísticas de las perforaciones de explotación (profundidad alcanzada, posición de la tubería ranurada, régimen de opera--ción, de las predicciones superficiales de escurrimiento de la densidad de la perforación, en fin de cualquier condición que en alguna forma pueda afectar la calidad química del agua.

2.- Con el fin de obtener muestras realmente repre--sentativas y cuidando de no perder información necesaria para una correcta interpretación, cada muestra obtenida para análi--sis químico deberá tomarse con los siguientes cuidados y reali--zando las mediciones que a continuación se indican:

- a) El frasco o recipiente donde se colectará la mues--tra, deberá enjuagarse con agua de la fuente a -muestrear, dos o tres veces antes de proceder al muestreo.
- b) El volumen de la muestra deberá ser suficiente para realizar un análisis químico completo.
- c) En el caso de que la fuente de muestreo sea un -pozo, es necesario que el tiempo transcurrido -entre el inicio del bombeo y el momento de tomar la muestra sea de dos horas evitando así posibles influencias de agua de retorno de riego o del con--tacto tenido con el ademe y tratando de garanti--zar que la muestra colectada realmente represen--te al agua encontrada en el acuífero, en el punto de muestreo.

3.- Las determinaciones de pH y temperatura deberán realizarse en el campo, inmediatamente después de tomar la mues--tra evitando con esto no registrar las variaciones que sobre -esos parámetros ocurren casi en forma inmediata.

4.- Se debe llevar un registro de cada muestra toma--da y cada frasco se debe identificar fijando una etiqueta debida--mente rotulada. El registro debe incluir todos aquellos datos que permitan una identificación positiva de la muestra en cual--quier instante, así como el nombre del muestreador, fecha, hora,

localización exacta de la estación de muestreo, pH, temperatura del agua y cualquier otro dato que se pueda necesitar al efectuar la interpretación, como caudal de operación, nivel del agua, condiciones meteorológicas, etc.

5.- Las estaciones de muestreo deberán ser fácilmente localizables, tanto en el campo como en el gabinete, identificándolas en el campo, con número o claves fijados al pie de la fuente, los cuales a su vez se utilizan para diferenciarlas, en un plano de localización que se debe elaborar.

6.- Una vez obtenidas las muestras, deberán enviarse al laboratorio para su análisis químico, procurando que el tiempo que transcurra entre el muestreo y el análisis sea mínimo, con lo cual se evitarán cambios en la calidad propiciados por tener la muestra fuera de su medio ambiente original.

### III.- ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS DE AGUA Y FORMA DE EXPRESAR LOS RESULTADOS.

La realización de estudios de hidrogeoquímica requiere del conocimiento de las concentraciones iónicas que se encuentran en el agua muestreada, dicho conocimiento se obtiene mediante la realización de análisis químicos al agua. Estos análisis para el tipo de estudios mencionados deberán ser completos e incluir las siguientes determinaciones: temperatura, pH, sólidos totales disueltos, dureza, alcalinidad, calcio, magnesio, potasio, amonio ( $\text{NH}_4$ ), sulfatos, cloruros, carbonatos, bicarbonatos, nitratos, fosfatos, sílice.

Es recomendable también incluir la determinación de boro, zinc, litio y en algunos casos plomo.

El primer grupo de los iones señalados, cuya concentración es necesario conocer, dan al agua la mayor parte de su salinidad; no obstante, los incluidos en el párrafo anterior dan información especial que permite inferir o confirmar algunas relaciones existentes, entre la geología regional, el funcionamiento geohidrológico y la calidad del agua.

Todas las determinaciones señaladas, además de ser de utilidad e indispensables en estudios de hidrogeoquímica, permiten conocer la calidad del agua y a saber que problemas puede implicar su utilización.



Una recomendación que se debe mencionar al hablar de análisis químicas, es la necesidad de uniformizar la metodología utilizada en el laboratorio, obteniendo en esta forma una misma base de comparación.

Las unidades utilizadas para expresar los resultados de los análisis químicos son:

mg/lt	Miligramos por litro
ppm	partes por millón
meg/l	miliequivalentes por litro.

Las dos primeras formas de expresión son semejantes, si se considera que 1 litro de agua pesa un kilogramo, en ese caso  $1 \text{ mg/l} = 1 \text{ ppm}$ , igualdad que para usos prácticos es cierta. Estas expresiones relacionan peso con peso y peso con volumen.

Si a una concentración iónica expresada en ppm la dividimos por el peso equivalente del ión, el cual se obtiene dividiendo su peso atómico entre su valencia, se obtienen equivalentes por millón, cuya milésima parte son megm. En un análisis químico bajo este sistema de expresión, la suma de aniones debe ser igual a la de cationes.

#### IV.- COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA Y SU RELACION CON LOS ESTUDIOS DE HIDROGEOQUIMICA.

Ya fué mencionado que la calidad del agua, tanto superficial como subterránea, depende de su medio ambiente y de su comportamiento en el mismo, por lo cual es necesario conocer algunas características de los iones que se pueden encontrar en solución, antes de intentar inferir a partir de su concentración, ciertos efectos que hayan contribuído a dar al agua su calidad química.

Como ejemplo de lo anterior a continuación se mencionarán algunas características importantes de iones encontrados comunmente en solución:

Calcio.- Químicamente se le conoce a este elemento, como un componente más del grupo de metales alcalinotérreos, cuya combinación en la naturaleza para formar sales, es posible únicamente con elementos de carga negativa (aniones) ya que el calcio funciona como catión (+).

El calcio es un elemento muy difundido, tanto solución como en las rocas, de las cuales las calizas están formadas en gran parte por sales de este elemento; en rocas sedimentarias también es un ión comunmente encontrado.

En el agua la presencia de este catión se puede deber al contacto con una gran variedad de minerales, no obstante la fuente más importante de calcio son los minerales no silicatos especialmente los carbonatos.

La presencia de este elemento en un gran número de rocas, origina que su concentración en el agua aumente al crecer el tiempo de contacto de esta con terrenos sedimentarios.

Magnesio.- Pertenece también al grupo de los alcalinotérreos, es también un elemento comunmente encontrado en la naturaleza. En rocas ígneas es un componente de los silicatos oscuros de las rocas oscuras ferromagnesianas. En calizas y rocas metamórficas también es común encontrar sales de magnesio.

Entre las características más importantes de este elemento es su fuerte tendencia a permanecer en solución y que en el agua de mar es más abundante que el calcio.

Sodio.- El sodio es un elemento del grupo de los metales alcalinos, cuya difusión en la naturaleza es amplia pues constituye el 2% de la corteza terrestre. Forma parte de buen número de silicatos, por lo que es común en rocas ígneas, en rocas sedimentarias también se encuentra fácilmente y en concentraciones elevadas en zonas afectadas por evaporación. Su compuesto más importante es el NaCl (cloruro de sodio) el cual se encuentra en grandes cantidades en el agua de mar.

Este elemento en solución tiene cierta tendencia a permanecer en esta forma, no obstante, puede intercambiarse con el calcio y el magnesio.

Sulfatos.- Las sales de este anión generalmente son muy solubles y abundantes en rocas sedimentarias, fundamentalmente en aquellas que han sufrido efectos de evaporación.

En rocas ígneas no es un componente importante, pues en estos casos los compuestos del azufre son sulfuros de

metales pesados. En estos casos se puede encontrar a los sulfatos si las rocas ígneas contienen minerales del grupo de los feldespatos.

Una característica importante de este ión, es su estabilidad química, que soporta diferentes condiciones a las cuales se sujeta el agua.

Cloruros.- El cloro como elemento pertenece al grupo de los halógenos y da lugar a la formación de cloruros, -- cuya importancia está en que comunmente se encuentra en solución, aún cuando no sea un componente importante de las rocas.

Las rocas ígneas son una fuente poco importante de cloruros, mucho más importantes son las sedimentarias en las cuales puede haber concentraciones elevadas si han sido afectadas por agua de mar o por evaporación. Una vez en solución, su precipitación es difícil.

Bicarbonatos.- La mayor parte de estos iones provienen de  $CO_2$  en la atmósfera, en los suelos y en las rocas carbonatadas las cuales están formadas principalmente de carbonatos, los que al entrar en solución dan origen a los bicarbonatos, los cuales en presencia de calcio pueden precipitarse fácilmente como carbonatos.

Una cualidad de las rocas carbonatadas es su susceptibilidad al metamorfismo debida a la solubilidad de sus materiales, a la facilidad de recristalización y a la reactividad química de sus elementos.

En zonas de evaporación abunda el bicarbonato de sodio en solución.

Los comentarios y características importantes de algunos iones, presentados en los últimos párrafos, tienen como finalidad principal, ilustrar con algunos ejemplos, aspectos importantes que pueden influir en la calidad química del agua, los cuales por lo tanto deberán considerarse al interpretar la información que se obtenga al analizar químicamente el agua.

## V.- CRITERIOS BASICOS PARA LA INTERPRETACION.

El procesamiento e interpretación de la informa--

ción disponible es posible llevarlo a cabo, valiéndose de diferentes técnicas propuestas por algunos autores. No obstante, antes de proceder a dar una breve descripción, de los métodos más comúnmente utilizados en el campo de interpretación hidrogeoquímica, a continuación se indicarán algunos de los fenómenos que ocurren y modifican la calidad del agua. Parte de estos ya han sido mencionados en la introducción, al hacer referencia a los procesos señalados por Hanshaw y Back.

El agua de lluvia al precipitarse sobre la corteza terrestre lleva consigo sales disueltas, las cuales se encuentran en concentraciones bajas, al tener contacto con el suelo inicia de inmediato su acción disolvente y de intercambio iónico, procesos en los cuales aumenta el contenido de sales en el agua; conforme se infiltra a las capas inferiores y circula por los mantos acuíferos los efectos señalados continúan dependiendo por consiguiente de longitudes y tiempos de contacto.

Con base en lo anterior se ha mencionado que el incremento de sales disueltas en el agua, es proporcional a la longitud de recorrido, lo cual en pocos casos se cumple pues la heterogeneidad de los materiales del subsuelo, origina que cambios locales de permeabilidad, a su vez modifiquen el área y tiempo de contacto.

Si se quiere señalar en principio un poco más próximo a la realidad, se podría establecer que el incremento de sales disueltas en el agua subterránea, es proporcional a la superficie y tiempo de contacto con las rocas del subsuelo, aseveración que tampoco es completamente cierta, pues dependerá de la composición mineralógica de las diferentes rocas con las que tenga contacto el agua.

El resumen anterior se ha presentado, con el fin de enfatizar el hecho de que para la realización de estudios de hidrogeoquímica, deberán tenerse en cuenta innumerables factores, que intervienen en los cambios químicos de la calidad del agua subterránea, los cuales originan que las técnicas empleadas den lugar a conclusiones de tipo cualitativo.

## VI.- METODOS DE INTERPRETACION.

Hasta ahora han sido señalados aspectos importantes a considerar en la realización de estudios de hidrogeoquímica

mica, como el hecho de que en este tipo de estudios, es indispensable tomar en cuenta la geología y la hidrología, subterránea, en la interpretación de la información disponible.

En lo que sigue se describirán algunas técnicas desarrolladas, con el fin, de ordenar e interpretar los resultados de los análisis químicos realizados, y se acompañarán de ejemplos, aquellas que se consideren especialmente útiles en los estudios.

El agrupamiento, la comparación e interpretación de los análisis químicos es posible realizarla en tres diferentes formas:

- 1.- Mediante clasificaciones propuestas por diferentes autores, las cuales se basan en sumas y cálculos de relaciones iónicas cuyos resultados según los autores permiten agrupar, diferenciar y atribuir ciertos efectos a las muestras de agua analizadas.
- 2.- La elaboración de gráficas o diagramas es utilizada en la realización de trabajos de hidrogeoquímica con el fin de comparar la calidad de agua de diferentes aprovechamientos, de agrupar fuentes con calidad química semejante, de observar los cambios de calidad del agua con el tiempo y de caracterizar y representar en forma objetiva las características químicas más importantes de una fuente o fuentes de agua.
- 3.- Elaboración de Planos con Curvas de Igual Concentración o Relación Iónica.- En un plano donde se muestra la localización de las fuentes muestreadas, se vacía parte de la información obtenida al analizar químicamente las muestras de agua. Con el apoyo de estos valores, es posible configurar curvas de igual valor, las cuales permiten identificar áreas con calidad de agua semejante, así como observar la dirección en la cual se incrementan las sales disueltas y tener una idea de las zonas donde el uso del agua en relación con su calidad química, no representa problema.

Otra aplicación de estas configuraciones es la faci

lidad que ofrecen para representar la evolución de la concentración de sales, punto importante en áreas donde existe el peligro de contaminación por intrusión salina.

A continuación se describirán algunas formas de clasificación propuestas, los tipos de gráficas más comunmente -- utilizadas y la forma de elaboración así como la utilidad de los planos con configuraciones de curvas de igual concentración o relación iónica.

### VI.1.- Clasificación de las Aguas.

Davis y De Wiest.- En su libro Hidrogeología, proponen una clasificación sencilla basada en la concentración de sólidos disueltos, según la cual es posible diferenciar tipos de agua según la tabla siguiente:

Clasificación	Sólidos Totales (ppm)
Agua dulce	0-1000
Agua salobre	1000-10000
Agua salada	10000-100000
, Salmuera	más de 100000

Souline.- En 1948 propueso clasificar el agua de acuerdo con los valores obtenidos al relacionar ciertos iones, tal como se indica a continuación:

#### 1.- Aguas sulfatadas sódicas:

$$r \frac{\text{Na} - \text{Cl}}{\text{SO}_4} \quad 1$$

#### 2.- Aguas hidrocarbonatadas sódicas:

$$r \frac{\text{Na} - \text{Cl}}{\text{SO}_4} \quad 1$$

#### 3.- Aguas cloruradas magnesianas:

$$r \frac{\text{Cl} - \text{Na}}{\text{Mg}} \quad 1$$

#### 4.- Aguas cloruradas cálcicas:

$$r \frac{\text{Cl} - \text{Na}}{\text{Mg}} \quad 1$$

La letra r antepuesta a las relaciones indica que éstas deben calcularse expresando las concentraciones iónicas en epm.

Chase Palmer (1911) propone una clasificación basada en la salinidad y la alcalinidad ocasionada por las sales.

Según Palmer las sales de cloruros, sulfatos y nitratos ocasionan la salinidad, mientras que la alcalinidad se debe a la hidrólisis de las sustancias solubles. Por medio de cálculos sencillos se distinguen tres tipos de salinidad designadas como primaria, secundaria y terciaria ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ) y solo dos tipos de alcalinidad  $A_1$  y  $A_2$ .

Para calcular los valores correspondientes a las salinidades y alcalinidades, Palmer dividió a los cationes en alcalinos (Na y K) y térreos (Ca y Mg), y con esto realiza la clasificación, apoyado en el conocimiento de los cationes presentes en el agua, cuyas concentraciones expresadas en porcentajes del total de equivalentes, se utilizan en la forma siguiente:

$S_1$ .- Salinidad Primaria

(Na + K) + Cantidad equivalente de  $Cl+SO_4+NO_3$ .

$S_2$ .- Salinidad Secundaria (asociada con cationes térreos)

$Cl+SO_4+NO_3$  en exceso de Na+K + cantidad equivalente de Ca + Mg.

$S_3$ .- Salinidad Terciaria

Exceso de  $Cl+SO_4+NO_3$  sobre (Na+K+Ca+Mg) + cantidad equivalente de Hidrógeno.

$A_1$ .- Alcalinidad Primaria (asociada con álcalis)

Exceso de Na+K sobre  $Cl+SO_4+NO_3$  + cantidad equivalente de  $HCO_3$  o  $CO_3$ .

$A_2$ .- Alcalinidad Secundaria (asociada con térreos)

$(HCO_3 + CO_3) - (Na+K) - (Cl+SO_4+NO_3)$  + cantidad equivalente de  $(Ca^{++} + Mg^{++})$ .

Con base en las determinaciones de salinidades y alcalinidades, Chase Palmer define cinco clases de agua, que se expresan a continuación, las cuales se pudieron diferenciar gracias a que las propiedades de salinidad y alcalinidad son mutuamente exclusivas, por lo que un mismo tipo de agua no puede tener más de tres de las propiedades pues las restantes se excluyen.

De acuerdo con lo anterior las clases que se definen son:

- Clase I.-  $S_1, A_1$  Y  $A_2$
- Clase II.-  $S_1 = A_2$
- Clase III.-  $S_2, S_1$  Y  $A_2$
- Clase IV.-  $S_1 = S_2$
- Clase V.-  $S_1, S_2$  Y  $S_3$ .

De acuerdo con estas clases hidrogeoquímicas se distingue el agua de la siguiente manera.

El agua meteórica es de Clase III, porque lleva en solución ácidos fuertes tomados de la atmósfera; al infiltrarse el agua los ácidos se equilibran con las sales del subsuelo, dando origen a la Clase II; al aumentar el tiempo de contacto del agua con las rocas las sales del subsuelo predominan sobre los ácidos y se origina la Clase I, las Clases IV y V pertenecen a aguas de origen marino y magmático, respectivamente.

## VI.2.- Utilización de Gráficas o Diagramas.

La utilización de gráficas para representar características químicas de muestras de agua, permite encontrar objetivamente diferenciadas que por simple observación de los resultados, pueden no apreciarse. El problema principal en estos casos es el elegir el método gráfico apropiado que haga resaltar esas diferencias.

En algunos casos también se utilizan los métodos gráficos, para representar en forma objetiva, concentraciones o relaciones iónicas encontradas en una muestra o grupo de muestras de agua.

La elaboración de gráficas, en las cuales se representan características químicas contra variables de otro tipo (caudal, tiempo), también ha sido recomendada para la realización de estudios.

Muchos autores han propuesto diferentes tipos de gráficas o diagramas, de los cuales a continuación se describirán algunos de los más comúnmente utilizados:

Diagrama de concentración iónica. - Es un método -



de representación por medio de barras, en el cual la altura total es proporcional a la suma de epm de aniones o cationes. - Está compuesto por dos barras verticales colindantes de la misma altura, en una de ellas se representan las concentraciones catiónicas y en la otra las aniónicas. La forma de división es horizontal, indicando con altura la concentración de cada ion representado.

Diagrama Triangular de Palmer-Piper.- Este diagrama utiliza un triángulo equilátero, el cual se divide en dos triángulos equiláteros inferiores y un rombo central superior, los lados de los triángulos y rombo son iguales y se dividen en 100 partes.

El triángulo inferior izquierdo se utiliza para representar concentraciones catiónicas expresadas en porcentajes, mientras que en el triángulo inferior derecho se representan los porcentajes de aniones encontrados en una muestra.

En ambos casos la representación es por medio de un punto, los cuales se proyectan sobre el rombo para obtener en el punto de intersección la representación característica de la muestra.

Una de las ventajas de este diagrama es que permite representar, en un mismo triángulo, varias muestras y por consiguiente facilita la comparación de sus calidades químicas.

Diagrama Semilogarítmico de H. Schoeller.- H. Schoeller, autor francés propone la utilización de un diagrama semi-logarítmico para comparar las calidades químicas de muestras de agua. El diagrama tal como se observa en la figura anexa - consiste de una serie de escalas logarítmicas verticales, cada una de las cuales se utiliza para representar con un punto, alguna concentración iónica o característica física o química -- de una muestra de agua.

La unión de estos puntos dá como resultado un polígono cuya forma está determinada por la calidad química de la muestra analizada (Ver fig. anexa).

El diagrama de Schoeller, al igual que el de Piper, permite agrupar diferentes análisis y en forma sencilla compararlos, siendo fácil, apreciar diferencias en concentración -

o relación iónica, lo cual resultó de gran utilidad en estudios de Hidrogeoquímica.

Además de la ventaja señalada, este diagrama es de fácil elaboración y resulta bastante objetivo por lo cual con frecuencia es utilizado cuando se intenta relacionar la geología regional, el comportamiento hidráulico del agua subterránea y su calidad química.

### VI.3.- Planos con Curvas de Igual Concentración o Relación Iónica.

La elaboración de planos con curvas de igual concentración o relación iónica, así como planos con curvas de igual concentración salina, permite observar en una zona o cuenca, los cambios regionales de calidad del agua. Estos cambios, relacionados con características geológicas, hidrológicas, geohidrológicas y tomando en cuenta los efectos químicos, permiten realizar inferencias, las cuales forman una parte importante del estudio de hidrogeoquímica.

Para conseguir lo señalado en el párrafo anterior, es necesario disponer de planos, en los cuales estén localizadas las fuentes de agua muestreadas, así como corrientes superficiales, obras de aprovechamiento superficial, accidentes o cambios geológicos, etc.

En resumen un plano en el cual se señale cualquier accidente que pueda tener influencia en la calidad del agua.

Una vez elaborado el plano con localización de fuentes de muestreo, se dispone de los análisis químicos del agua, y se tiene conocimiento de las características geológicas regionales, se está en posibilidad de elegir los iones o sales cuya concentración se debe configurar.

La configuración se consigue vaciando sobre el plano, próxima a la fuente correspondiente, el valor de concentración o relación iónica, determinado en el laboratorio y en el gabinete. Posteriormente, se une con una curva continua los puntos de igual valor, obteniéndose en esta forma una serie de curvas que forman la configuración a analizar.

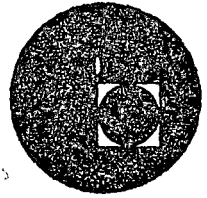
El método de interpretación propuesto en este último inciso, ha constituido el auxiliar más valioso en la realización de estudios de hidrogeoquímica, pues además de

la facilidad que presenta para realizar inferencias, las cuales podrán ser más o menos ciertas, dependiendo de conocimientos adicionales que se tengan (geología, hidrología subterránea, etc.), permite conocer dentro de una cuenca, las áreas - cuyas calidades de agua pueden ocasionar problema.





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

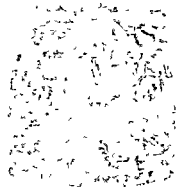


HIDROLOGIA SUBTERRANEA



ING. PEDRO MARTINEZ LEYVA

JULIO DE 1976.



REPUBLIC OF THE PHILIPPINES  
DIVISION OF...  
GROUP OF...  
...  
...  
...



MODELOS MATEMATICOS EN EL ESTUDIO DEL

AGUA SUBTERRANEA

Por: ING. PEDRO MARTINEZ L.

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

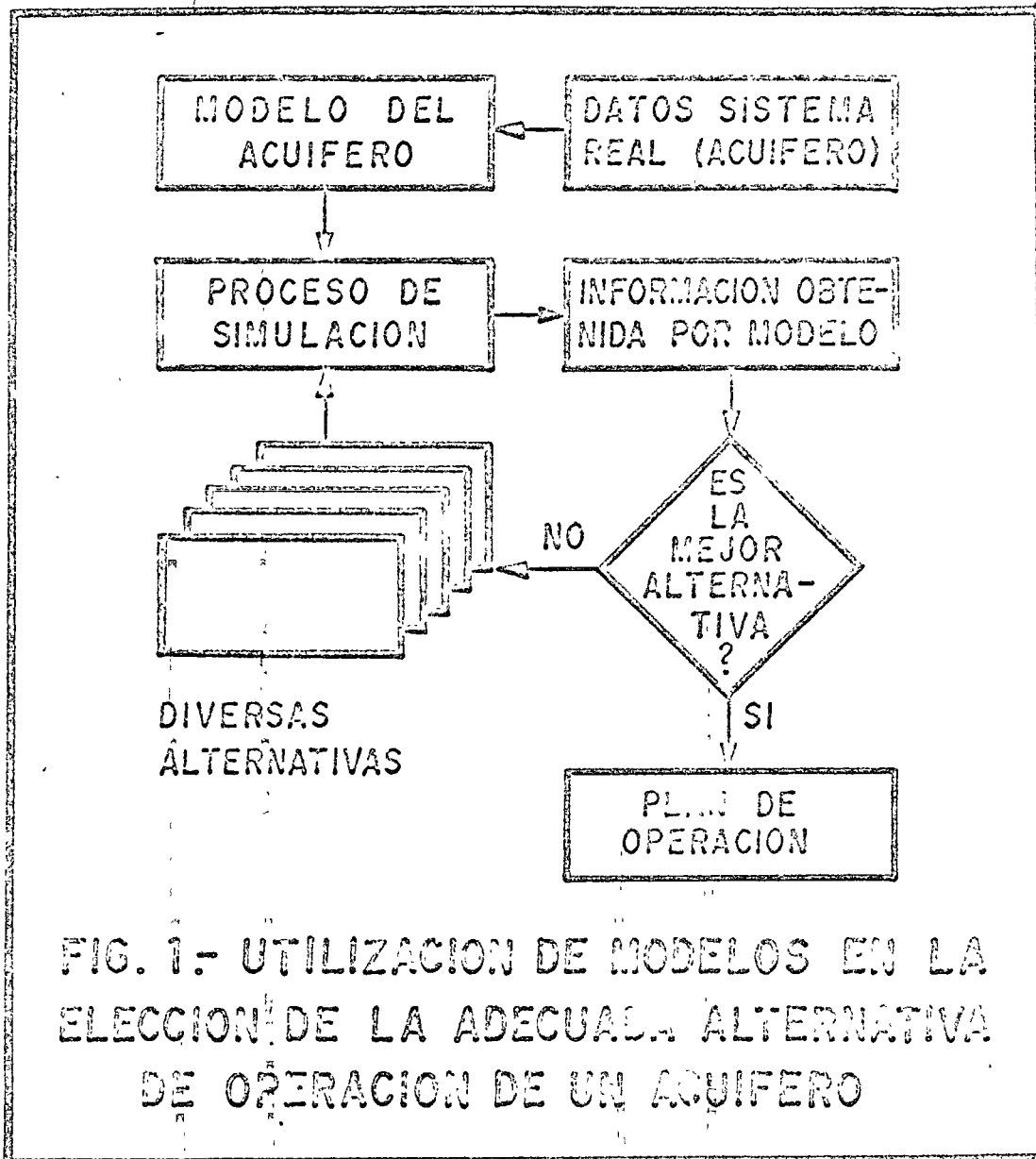
Cuando se realiza la planeación de las operaciones de extracción de agua de un acuífero, es necesario el conocimiento del comportamiento del mismo en lo referente a la variación del nivel, volumen y calidad de agua para determinados regímenes de extracción y recarga.

Es imposible debido a su costo, llevar a cabo experimentos y pruebas en el acuífero mismo para conocer su -- respuesta o determinadas alternativas de operación y hacer -- comparaciones entre ellas, a fin de elegir la más conveniente (Fig.1)

Como en todas las ramas de la Ciencia de Ingeniería el tratamiento del sistema real o fenómeno es imposible, por lo que se hace necesario la utilización de modelos del fenómeno o sistema real, que en nuestro caso es el acuífero. -- Podemos también definir al modelo como la abstracción de algo real que puede ser usado para propósitos de predicción y control.

La mayoría de los sistemas reales y el acuífero no constituye una excepción, son realmente complicados, más allá de nuestra capacidad para tratarlos como tales, por lo que es necesario la introducción de diversas suposiciones, como por ejemplo, considerar al acuífero como un medio continuo e isotrópico.

Así con base en diversas suposiciones, el modelo matemático del almacenamiento de agua subterránea, es presentado en la forma de un conjunto de expresiones matemáticas -- cuya solución nos proporciona su comportamiento.





En la elección de un modelo para determinado acuífero, aparte de sus características físicas (Geología del acuífero), debe tenerse en consideración que el modelo sea lo suficientemente simple para ser objeto de un tratamiento matemático, pero no al grado que lleguen a excluirse aspectos interesantes de la investigación; así mismo aspectos económicos deben también ser tomados en cuenta.

En la elección del modelo es importante también contar con datos respecto al comportamiento pasado del acuífero en lo relativo a evolución del nivel estático, extracciones, recarga, etc.; durante un periodo de al menos 5 años con la finalidad de efectuar el proceso de calibración del modelo (Fig.2), que consiste en ajustar dentro de un rango de tolerancia los datos del comportamiento del acuífero obtenidos a través del modelo con los del comportamiento observado. Sería innecesario elaborar un modelo muy detallado que nos proporcionaría resultados muy exactos si el modelo no fuera adecuadamente calibrado.

#### CLASIFICACION DE MODELOS

Los modelos pueden ser clasificados en físicos y matemáticos, dentro de los primeros podemos mencionar, el de la caja de arena, el de la analogía de la membrana, el de la analogía del tanque electrolítico, el de la analogía eléctrica, el de placas paralelas, etc. En los modelos matemáticos el acuífero es modelado como un conjunto de expresiones matemáticas (ecuaciones diferenciales parciales o lineales algebraicas).

#### MODELO MATEMATICO CONTINUO

La ecuación diferencial parcial que gobierna el flujo bidimensional, de agua subterránea en un acuífero confinado, no homogéneo y anisotrópico es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R - B = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Donde:

- T Transmisibilidad del acuífero.
- h Potencial o altura piezométrica.
- t Tiempo
- R Recarga al acuífero (natural o artificial) por área unitaria.

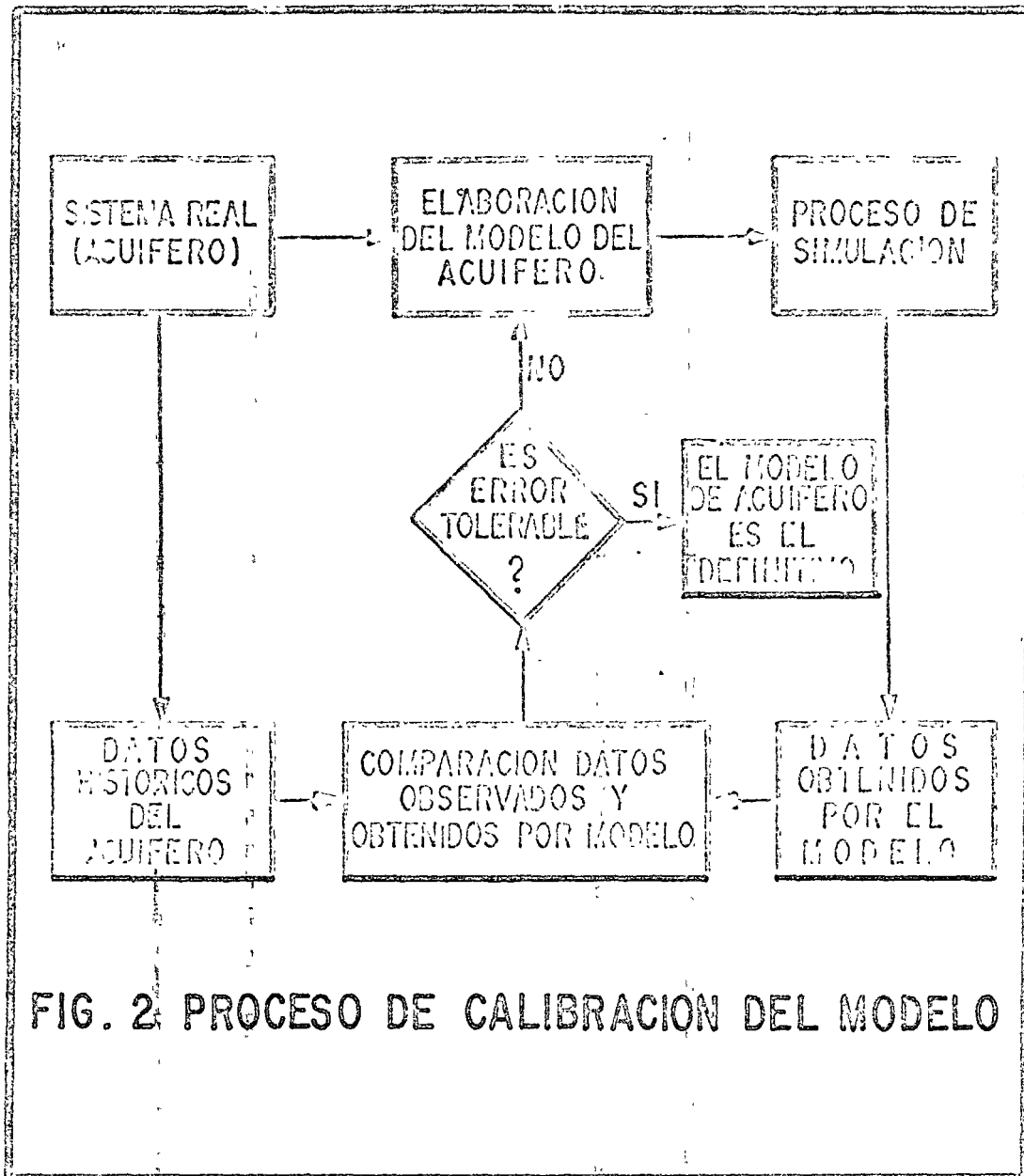


FIG. 2. PROCESO DE CALIBRACION DEL MODELO

B Extracciones por bombeo por área unitaria.

S Coeficiente de almacenamiento.

x e y Coordenadas rectangulares.

La ecuación (1) es también aplicable en acuíferos libres cuyos abatimientos sean pequeños comparados con el espesor sacudado del mismo.

Para la aplicación de la ecuación (1), es necesario definir la geometría del acuífero, establecer las condiciones iniciales de piezometría o sea:  $h = h(x, y, 0)$  y las condiciones de frontera, por ejemplo:  $h = f(x, y, t)$ ;  $\frac{\partial h}{\partial t} = f_2(x, y, t)$

Una vez que el problema ha sido definido y las expresiones de bombeo,  $B = B(x, y, t)$ ; recarga,  $R = R(x, y, t)$  transmisibilidad;  $T(x, y)$  y coeficiente de almacenamiento  $S = S(x, y)$  especificadas y sustituidas en la ecuación (1) se determinan  $h = h(x, y, t)$  o sea los valores del nivel freático o piezométrico en el punto  $(x, y)$  al tiempo  $t$ . Tal como ha sido planteada, la solución analítica de la ecuación (1) es posible cuando se trata de sistemas muy sencillos. Sin embargo, como en la práctica las distribuciones del coeficiente de almacenamiento, transmisibilidad, bombeo y recarga y fronteras no son dadas en forma analítica; una solución de este tipo es imposible, por lo que se hace necesario discretizar el espacio y tiempo dando lugar a un modelo de diferencias finitas.

#### MODELO DE DIFERENCIAS FINITAS.

La deducción de la ecuación de diferencias finitas a partir de la ecuación diferencial parcial y, consecuentemente el modelo de diferencias finitas a partir del matemático continuo, -- puede ser lograda de dos maneras; la primera consiste en establecer el equilibrio hidrodinámico del elemento, mediante la ley de Darcy y el principio de conservación de la Masa; la segunda, por medio de un tratamiento matemático convencional sustituyendo las derivadas parciales por diferencias finitas aproximadas, así el modelo continuo es reemplazado por un sistema de ecuaciones algebraicas.

Aquí desarrollaremos el modelo de diferencias finitas por medio de procedimientos físicos; el primer paso consistirá en dividir el acuífero en celdas, que podrán ser rectangulares (Fig.3) o bien poligonales de acuerdo al método del polígono de . . . . .

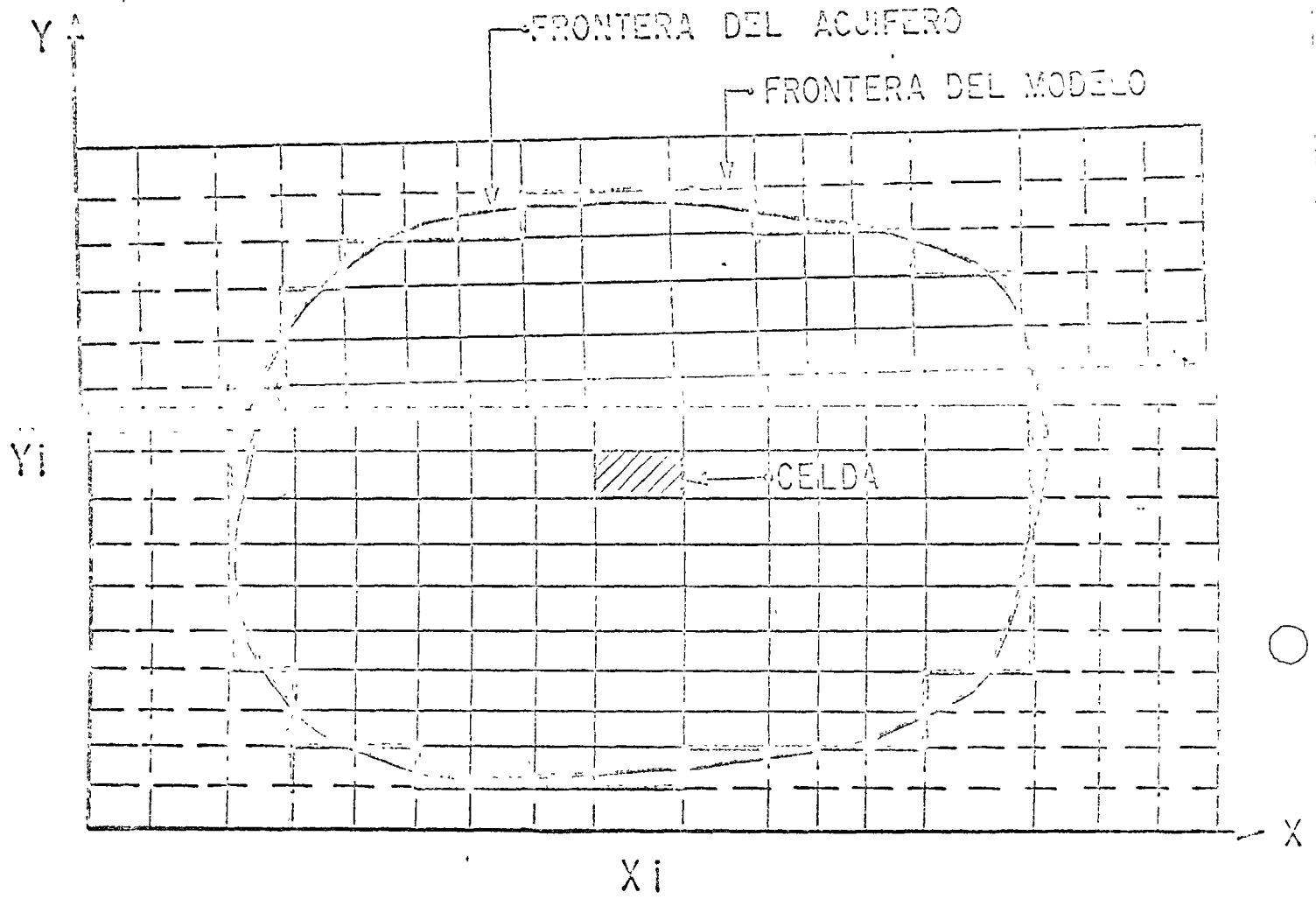


Fig.-3 ACUIFERO DIVIDIDO EN CELDAS RECTANGULARES NO UNIFORMES

Thiessen con pozos o sitios donde se disponga información sobre niveles del agua y donde se requiera efectuar medidas de operación (Fig.4). La malla constituída por el conjunto de celdas tendrá una densidad que podrá ser variable, dependiendo de la información con que se disponga y se requiera en una cierta área.

Todas las variables y parámetros del acuífero serán referidos a los centros de las celdas, que denominaremos nodos y se supone que, el valor asignado a cada nodo es representativo de la totalidad de la celda a la cual pertenece; el flujo se considera, toma lugar entre los nodos; así este modelo, denominado también multicelda, es similar al de la analogía eléctrica compuesta de resistencias y capacitores.

La expresión básica del modelo de diferencias se obtiene establecido el balance de agua en cada una de las celdas en los cuáles se ha dividido el acuífero, el balance en forma más simple se establece como:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de Almacenamiento.}$$

Para el caso de una celda el balance será: flujo neto + contribución exterior = cambio de Almacenamiento.

$$Q' \text{ neto} = \sum_{i=1}^N Q_{pi}$$

siendo N; el total de celdas vecinas a la celda p (Fig.5) -- El flujo entre la celda p e i de acuerdo a la ley de Darcy se expresará como sigue:

$$Q_{pi} = K_{pi} \cdot A_{pi} \frac{h_{pi} - h_p}{L_{pi}}$$
$$K_{pi} \cdot D_{pi} \cdot W_{pi} \cdot \frac{h_{pi} - h_p}{L_{pi}}$$

$$\text{SÍ: } T_{pi} = K_{pi} \cdot D_{pi} \cdot W_{pi} \cdot \frac{h_{pi} - h_p}{L_{pi}} \quad ; \quad Q_{pi} = T_{pi} \cdot \frac{h_{pi} - h_p}{L_{pi}}$$

Siendo:

$Q_{pi}$  = Flujo entre las celdas p e i.

$K_{pi}$  = Permeabilidad entre p e i

$T_{pi}$  = Transmisibilidad entre p e i

$L_{pi}$  = Distancia entre nodos de las celdas p e i

$W_{pi}$  = Ancho de contacto entre las celdas p e i

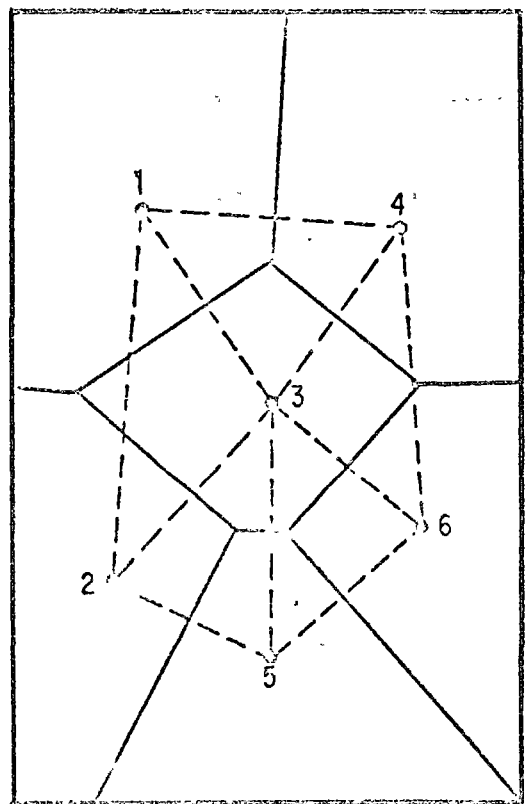


Fig.-6 ACUIFERO IDEALIZADO DE 6 CELDAS POLIGONALES

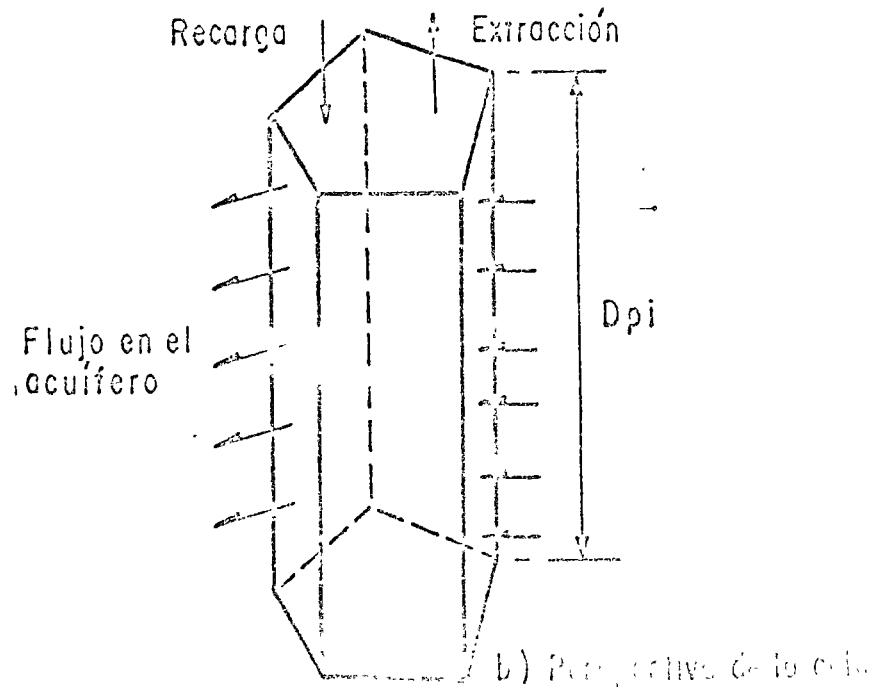
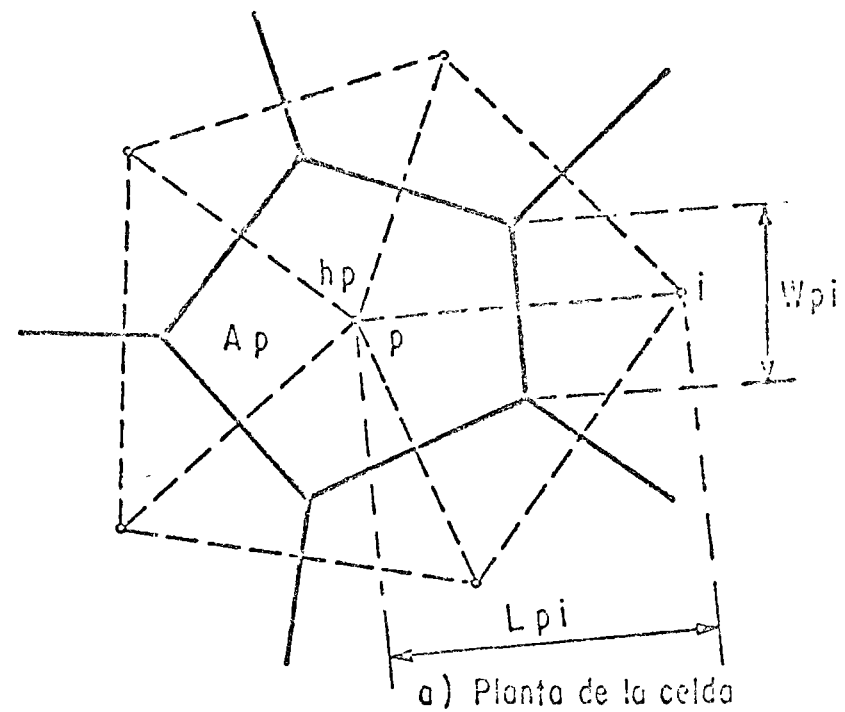
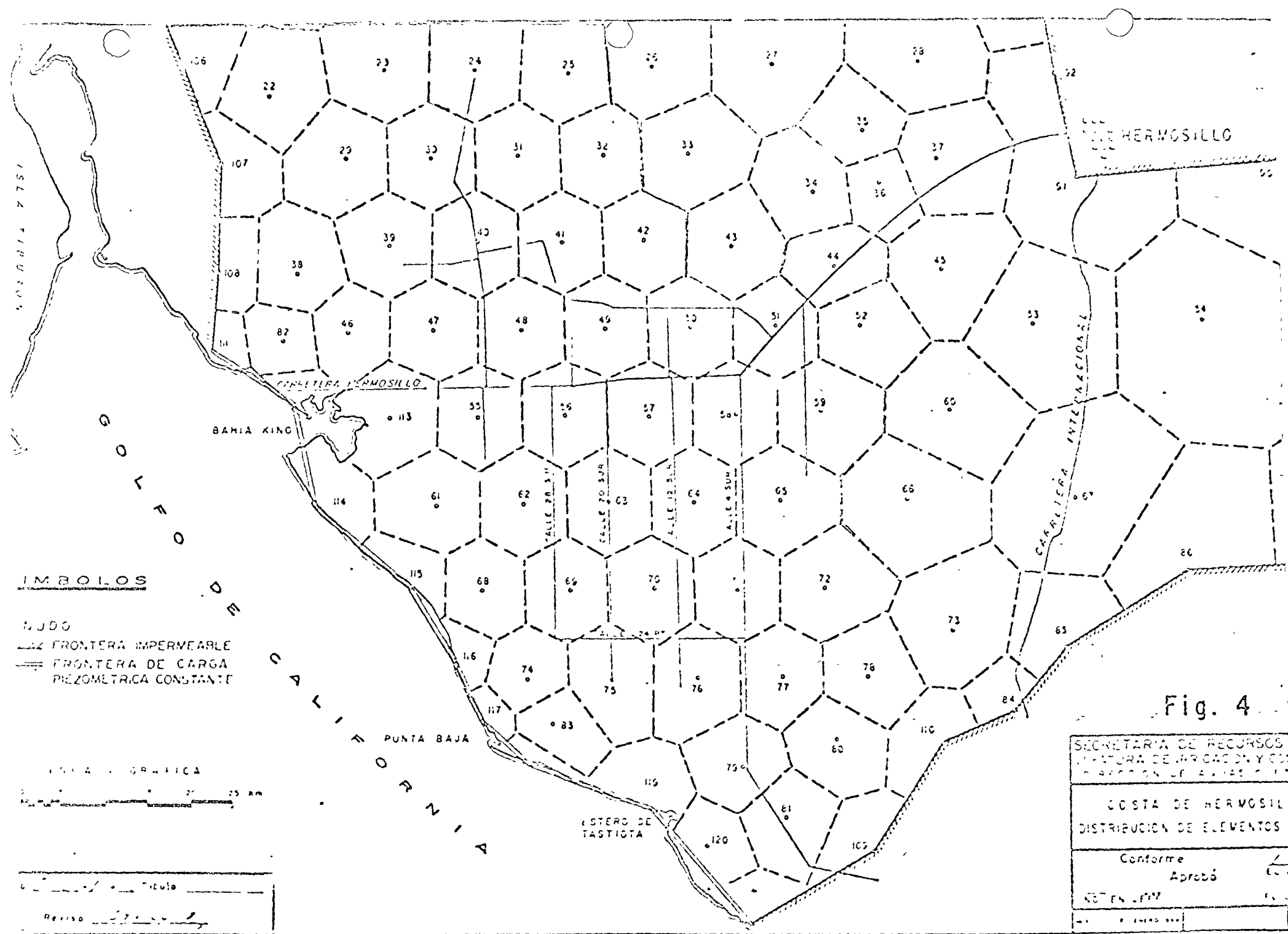


Fig. 5.- ESQUEMA DEL ELEMENTO VOLUMINICO O CELDA



- $D_{pi}$  = Altura donde toma lugar el flujo entre p e i  
 $h_{pi}$  = Altura piezométrica de la celda i vecina de p.  
 $A_{pi}$  = Area de flujo entre la celda p e i  
 $h_p$  = Altura piezométrica de la celda p.  
 $N$  = Número total de celdas vecinas a p.

Por lo tanto el flujo neto de la celda p será igual a:

$$\sum_{i=1}^N (h_{pi} - h_p) \frac{W_{pi}}{L_{pi}} \cdot T_{pi}$$

La contribución exterior de la celda p será igual a :

$$RA_p + RN_p - B_p$$

Siendo:

$RA_p$  = Recarga artificial de la celda p.

$RN_p$  = Recarga natural de la celda p.

$B_p$  = Bombeo de la celda p.

Podrá ser considerado el concepto de evapotranspiración cuando éste exista.

El cambio de almacenamiento en el intervalo  $t$  será:

$$\Delta V = S_p A_p \frac{h_p^{t+\Delta t} - h_p^t}{\Delta t}$$

donde:

$S_p$  = Coeficiente de almacenamiento de la celda p.

$A_p$  = Area horizontal de la celda p.

$t$  = Intervalo de tiempo.

$h_p^{t+\Delta t}$  = Altura piezométrica en el instante  $t + \Delta t$ .

$h_p^t$  = Altura piezométrica de la celda p en el instante  $t$ .



Habiendo definido los elementos que integran el balance de agua de la celda p; éste estará expresado como:

$$\sum_{i=1}^N (h_{pi} - h_p) \cdot \frac{W_{pi}}{L_{pi}} T_{pi} + RA_p + RN_p - B_p = S_p A_p \frac{h_p^{t+\Delta t} - h_p^t}{\Delta t} \quad (2)$$

El conjunto de ecuaciones que resultan de obtener el balance de agua para la totalidad de las celdas (M) en que ha sido dividido el acuífero, constituye el modelo de diferencias finitas.

La solución del conjunto de ecuaciones nos proporcionará los valores de  $h_p$ ; desde  $p = 1$  hasta M, para un intervalo  $\Delta t$ . Esto es, el comportamiento futuro del acuífero para un determinado régimen de recarga y bombeo.

No se ha especificado el instante de tiempo en el cual los valores de  $h_{pi}$  y  $h_p$  que aparecen en el miembro de la izquierda de la ecuación (2) son considerados, debido a que ello dará lugar a diversos métodos que se explicarán a continuación en el proceso de predicción.

PREDICCIÓN DE NIVELES DE AGUA POR EL MODELO DE DIFERENCIAS FINITAS.

La ecuación (2); o sea el modelo numérico, proporciona información sobre los niveles del agua únicamente en los centros de las celdas (nodos) y a determinados instantes de tiempo, previamente establecidos. El proceso de predicción puede ser llevado por medio de los métodos siguientes:

a).- Método Explícito.

b).- Método Implícito.

a).- Método Explícito.-

En este método el balance de agua es hecho para el intervalo de tiempo  $t$  y  $t + \Delta t$ ; los valores de  $h_{pi}$  y  $h_p$ , para determinar el gradiente y posteriormente el flujo neto, se toman en el instante de tiempo  $t$  de tal manera que la única incógnita de la ecuación (2) serán los valores de  $h_p$  para el instante  $t + \Delta t$ .

Sí previamente hacemos:

$$\frac{W_{pi}}{L_{pi}} T_{pi} = C_{pi} \quad \text{y} \quad RN_p + RA_p - B_p = F_p$$

la ecuación fundamental del modelo numérico en la forma explícita es:

$$\sum_{i=1}^N (h_{pi}^t - h_p^t) \cdot C_{pi} + F_p = S_p A_p \frac{h_p^{t+\Delta t} - h_p^t}{\Delta t}$$

para  $p = 1$ , hasta  $M$ .

así como se estableció anteriormente, la única incógnita será  $h_p$  para el instante  $t + \Delta t$ , y éstos valores serán los iniciales de  $h_p$  para el siguiente intervalo y así sucesivamente.

Para el primer intervalo:

$$h_p^{t+\Delta t} = h_p^t + \frac{t}{S_p A_p} \sum_{i=1}^N (h_{pi}^t - h_p^t) \cdot C_{pi} + F_p$$

para  $p = 1, 2, 3 \dots M$

en el siguiente intervalo será:

$$h_p^{t+2\Delta t} = h_p^{t+\Delta t} + \frac{t}{S_p A_p} \sum_{i=1}^N (h_{pi}^{t+\Delta t} - h_p^{t+\Delta t}) \cdot C_{pi} + F_p$$

para  $p = 1, 2, 3 \dots M$

por ejemplo si  $t = 30$  días la ecuación del primer intervalo se planteará entre 0 y 30 días! En el segundo intervalo será entre  $t = 30$  y  $t = 30 + 30 = 60$  días, y así sucesivamente.

El sistema tendrá tantas ecuaciones como celdas existan y habrá tantos sistemas de ecuaciones como intervalos de tiempo se requieran.

Así, la solución estriba en resolver por métodos numéricos y con auxilio de máquinas computadoras, el sistema de ecuaciones planteado.

El método explícito es el más simple, ya que únicamente existe una incógnita en cada ecuación, sin embargo su utilización tiene una gran restricción que lo hace impráctico, y ésta consiste en que:

$$\Delta t \leq \min \left[ \frac{A_p \cdot S_p}{\sum_{i=1}^N C_{pi}} \right] \text{ para } p = 1, 2, 3, 4 \dots M.$$

La violación de la condición anterior, hace que la solución numérica se aleje cada vez más en cada interacción -

del verdadero valor: esta condición requiere que los incrementos de tiempo  $t$  sean pequeños, especialmente en acuíferos caracterizados por su bajo coeficiente de almacenamiento y una alta transmissibilidad.

b).- Método Implícito

En este método los valores de  $h_p$  y  $h_{pi}$  para la determinación del gradiente, son considerados en el instante de tiempo  $t + \Delta t$ , valores que se desconocen, por lo que resulta más de una incógnita en la ecuación planteada para cada celda, que se expresará como sigue:

$$\sum_{i=1}^N \left( h_{pi}^{t+\Delta t} - h_p^{t+\Delta t} \right) \cdot C_{pi} + F_p = S_p A_p \frac{h_p^{t+\Delta t} - h_p}{\Delta t}$$

las incógnitas serán:  $h_p$  para  $t + \Delta t$  y  $h_{pi}$  desde  $i=1$ , hasta  $M$ .

para  $t + \Delta t$

El sistema de ecuaciones o modelo matemático, será desarrollado a continuación hacia una forma más simple considerando  $t + \Delta t$  como  $j$  y  $t$  como:  $o$  así la expresión fundamental será:

$$\sum_{i=1}^N \left( h_{pi}^j - h_p^j \right) \cdot C_{pi} + F_p = S_p A_p \frac{h_p^j - h_p^o}{\Delta t}$$

si hacemos  $C_{pp} = \left( \frac{S_p \cdot A_p}{\Delta t} + \sum_{i=1}^N C_{pi} \right)$

y  $M_p = \left( F_p + \frac{S_p \cdot A_p}{\Delta t} h_p^o \right)$

ya que son constantes para cada celda, la expresión fundamental en el esquema implícito se reduce a :

$$\sum_{i=1}^N h_{pi}^j \cdot C_{pi} + C_{pp} \cdot h_p^j = M_p$$

Consideramos el caso ideal, para fines ilustrativos de un acuífero compuesto de 6 celdas (Fig.6). Para el instante  $j$ ; la ecuación de la celda (1) que tiene como celdas vecinas a la (2), (3) y (4) será:

$$C_{12} h_2 + C_{13} h_3 + C_{14} h_4 + C_{11} h_1 = M_1$$

para la celda (2):

$$C_{21} h_1 + C_{23} h_3 + C_{25} h_5 + C_{22} h_2 = M_2$$

para la celda (3)

$$C_{31} h_1 + C_{32} h_2 + C_{34} h_4 + C_{35} h_5 + C_{36} h_6 + C_{33} h_3 = M_3$$

para la celda (4)

$$C_{41} h_1 + C_{43} h_3 + C_{46} h_6 + C_{44} h_4 = M_4$$

para la celda (5)

$$C_{52} h_2 + C_{53} h_3 + C_{56} h_6 + C_{55} h_5 = M_5$$

para la celda (6)

$$C_{63} h_3 + C_{64} h_4 + C_{65} h_5 + C_{66} h_6 = M_6$$

resulta un sistema de 6 ecuaciones con 6 incógnitas, este sistema expresado en forma matricial es como sigue:

$$\begin{bmatrix}
 C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\
 C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & C_{25} & 0 \\
 C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\
 C_{41} & 0 & C_{43} & C_{44} & 0 & C_{46} \\
 0 & C_{52} & C_{53} & 0 & C_{55} & C_{56} \\
 0 & 0 & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 h_1 \\
 h_2 \\
 h_3 \\
 h_4 \\
 h_5 \\
 h_5
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 M_1 \\
 M_2 \\
 M_3 \\
 M_4 \\
 M_5 \\
 M_6
 \end{bmatrix}$$

La solución de este sistema de ecuaciones para encontrar los valores de  $h_1 h_2 h_3 h_4 h_5 h_6$  para el instante  $j$  puede ser llevado a cabo por el método de inversión de matrices ó métodos iterativos como el de eliminación de Gauss-Seidel.

Sí el número de celdas es de cientos y aún de miles, el método implícito llega a ser más ineficiente debido a que ocupa más espacio en la memoria de la computadora y consume más tiempo en su procesamiento, por lo que el método de Dirección Alternante variante del método implícito, puede ser utilizado.

## PROCESO DE CALIBRACION

Una vez que el modelo matemático (sistema de ecuaciones algebraicas) ha sido elaborado, se hace necesario efectuar el proceso de calibración del modelo que, como se mencionó en la introducción es un procedimiento de tanteo, con la intención de ajustar, dentro de cierto rango de tolerancia una evolución piezométrica calculada por medio del modelo a una observada.

Durante este proceso se hacen varias aquéllos parámetros en los que se tenga más incertidumbre respecto a su valor real, esos parámetros generalmente son: el coeficiente de transmisibilidad, el de almacenamiento, la recarga y en ocasiones el bombeo.

Existen varias combinaciones de los parámetros que permiten lograr el ajuste; pero no todas son representativas de las condiciones reales, por lo que, siempre deberá tenerse presente al hacer la calibración que los parámetros sean representativos del sistema real que se está analizando.

Es conveniente durante el proceso de ajuste, la elaboración de diferentes representaciones gráficas, para definir qué parámetro o parámetros son los que se requieren variar; ya que una variación al azar no conducirá a ningún resultado positivo. Las principales representaciones gráficas que se utilizan son las siguientes:

- \_\_\_ Evolución piezométrica puntual en un periodo de terminado de tiempo.
- \_\_\_ Evolución piezométrica para un cierto periodo de tiempo, (curvas isoevolución)
- \_\_\_ Perfiles piezométricos correspondientes a varias secciones para un cierto tiempo.

ERRORES EN LA UTILIZACION DE MODELOS

I.- ERRORES DE CALCULO EN LA UTILIZACION DE MODELOS

Sea:

S = Solución exacta de la ecuación diferencial.

D = Solución exacta de la ecuación de diferencias finitas.

N = Solución numérica del sistema de ecuaciones.

las diferencias:

S-D = Error de truncación

D-N = Error de redondeo

S-N = Error total

Error de truncación.- Depende del esquema empleado para las diferencias finitas.

Error de redondeo.- Depende de la tolerancia adaptada en la solución del sistema de ecuaciones.

II.- ERRORES DEBIDOS A LA SIMULACION DE UN SISTEMA HIDROLOGICO COMPLEJO POR MEDIO DE UN MODELO MATEMATICO SIMPLIFICADO.

- 1.- T y S Se supone constantes en el espacio y tiempo. En realidad pueden variar con la permeabilidad y el espesor saturado en el área y en el tiempo.
- 2.- Flujo Bidimensional.- Puede haber áreas con componentes verticales de flujo muy significativas; en las zonas de recarga y descarga.
- 3.- Posición y comportamiento de las fronteras.- Puede ser mal ubicadas o tener un comportamiento deficiente al supuesto.

III.- ERRORES DEBIDOS A LAS MEDICIONES DE EXTRACCIONES, RECARGA, TRANSMISIBILIDAD, ALMACENAMIENTO Y LLEVACIONES INICIALES.

REFERENCIAS

MECANICA DE SUELOS TOMO III

JUAREZ BADILLO Y RICO RODRIGUEZ. ED. LIMUSA

CONCEPTS AND MODELS IN GROUNDWATER HYDRO-  
LOGY PATRIC. A. DOMENICO. MC. GRAW HILL

CAPTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

ALBERTO BENITEZ ED. DOSSAT, S.A.

GROUNDWATER RESOURCE EVALUATION

WALTON MC. GRAW HILL

HIDROGEOLOGIA

SELECTED DIGITAL COMPUTER TECHNIQUES FOR  
GROUNDWATER RESOURCE EVALUATION

T.A. PRICKETT AND C.G. LONNQUIST

THE EFFECT OF PUMPING OVER AND AREA

ROBERT E. GLOVER

FORECASTING WATER LEVELS IN AQUIFERS BY  
NUMERICAL AND SEMI-HYBRID METHODS

E. HELEZ, U. SHAMIR AND J. BEAR





DIRECTORIO DE PROFESORES

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

ING. ALFONSO CAMARENA LARRIVA  
JEFE DE LA SECCION DE GEOFISICOS  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
ABRAHAM GONZALEZ No. 3 - 4<sup>a</sup> PISO  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 566.18.59

ING. ARSENIO CIENFUEGOS DOMINGUEZ  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE POZOS  
COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE MEXICO  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
BALDERAS No. 55 - 4<sup>a</sup> PISO  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 585.50.66 ext. 418

ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
ABRAHAM GONZALEZ No. 3 - 4<sup>a</sup> PISO  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 546.66.36 y 566.24.90

ING. LUIS ENRIQUE LARA TRUJILLO  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA  
PETROLEOS MEXICANOS  
MARINA NACIONAL 329 EDIF. A - 6<sup>a</sup> PISO  
MEXICO 17, D.F.  
TEL: 531.63.08

ING. HEINZ LESSER JONES  
DIRECTOR  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
PASEO DE LA REFORMA No. 69  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 591.08.37

DIRECTORIO DE PROFESORES

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

M. EN I. ANTONIO LIST MENDOZA  
JEFE DE LA OFICINA DE HIDROGEOQUIMICA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
ABRAHAM GONZALEZ No. 3  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 535.09.57

ING. PEDRO MARTINEZ LEYVA  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INFORMACION  
Y CONTROL DE DATOS  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
PASEO DE LA REFORMA No. 69  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 546.59.85 y 546.59.86

ING. JOAQUIN MARIO MENDEZ SALDAÑA  
SUBJEFE DEL DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
ABRAHAM GONZALEZ No. 3 - 4<sup>a</sup> PISO  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 535.09.57

'pmc

DIRECTORIO DE PROFESORES

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

ING. ANSELMO ORDAZ AYALA  
AUXILIAR EN EL DEPARTAMENTO DE GEOHIDROLOGIA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
ABRAHAM GONZALEZ No. 3 MEZANINE  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 535.08.18 y 535.09.76

ING. HECTOR RAMIREZ LOPEZ  
JEFE DE PROYECTO  
LA COMISION DEL PLAN NACIONAL HIDRAULICO  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
RIO MIXCOAC No.25 - 3ª PISO  
COL. CREDITO CONSTRUCTOR  
MEXICO 17, D.F.  
TEL: 524.39.95

ING. JORGE ANTONIO TRUJILLO CANDELARIA  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOHIDROLOGIA  
DIRECCION DE GEOHIDROLOGIA Y DE ZONAS ARIDAS  
SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
ABRAHAM GONZALEZ No. 3 MEZANINE  
MEXICO 1, D.F.  
TEL: 535.08.17 y 535.09.76

' pnc



2.5



DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

1. ING. JULIAN A. ADAME MIRANDA  
Juan de Dios Bojorquez No. 32  
Constitución de 1917  
Iztapalapa  
México 13, D. F.  
Tel: 5-81-30-73
  2. ING. JUAN MANUEL ACEVES H.  
Georgia 172-B  
Col. Nápoles  
México 18, D. F.  
Tel: 5-43-09-74
  3. LIC. VICTOR M. AGUILERA R.  
Actopan 2830  
Col. Mitras Centro  
Monterrey, N. L.  
Tel: 48-56-14
  4. FIS. SERGIO R. ALVA LOZANO  
Av. Arcos Ote. 345  
Jardines del Sur  
México 13, D. F.  
Tel: 5-74-03-35
  5. J. EDUARDO ALVARADO ORTUÑO  
Terrazas No. 240  
San Luis Potosí, S.L.P.  
Tel: 3-26-18
  6. LUCIANO ARELLANO PEREZ  
Ciprés 115-202  
Col. Sta. Ma. la Ribera  
México 4, D. F.  
Tel: 5-47-44-94
  7. ING. JOSE C. BETANCOURT LINARES  
Piramides No. 111-9  
Col. Clavería  
México 16, D. F.  
Tel: 3-99-56-37
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
Atoyac No. 97  
México 5, D. F.  
Tel: 5-53-71-33 Ext. 2719
- INSTITUTO DE FISICA, UNAM  
Ciudad Universitaria  
México 20, D. F.
- FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, U.N.L.  
Ciudad Universitaria  
Monterrey, N. L.  
Tel: 52-49-69
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Teotihuacan No. 19  
Col. Condesa  
México 11, D. F.  
Tel: 5-74-20-02
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Amado Nervo No. 625  
San Luis Potosí, S. L. P.  
Tel: 3-08-75
- COMISION DEL LAGO DE TEXCOCO, S.R.H.  
Fco. I. Madero y Río Guadalupe  
San Juan de Aragón  
México, D. F.  
Tel: 5-77-96-11 Ext. 32
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Paseo de la Reforma No. 107-80. Piso  
México 4, D. F.  
Tel: 5-66-06-88 Ext. 116

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
2 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

<u>NOMBRE Y DIRECCION</u>	<u>EMPRESA Y DIRECCION</u>
8. ING. MARCO A. BETANCOURT P. Calle del Pino No. 5 Lomas del Valle Guamuchil, Sinaloa	BANCO NACIONAL DE CREDITO RURAL, S. A. Domicilio Conocido Guamuchil, Sinaloa
9. FRANCISCO BOADA FAVELA Durango Ote. 302 Col. Republica Saltillo, Coah.	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Boulevard Constitución 2145 Republica Norte Saltillo, Coah. Tel: 3-86-14
10. ING. FERNANDO CABRERA LUEVANOS Playa Marfa No. 498 Col. Moderna Ensenada, B. C.	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Gastelum No. 1198 Ensenada, B. C.
11. FORTINO MARIO CAMACHO LOPEZ 7a. Poniente Norte No. 223 Tuxtla, Gtz. Chiapas	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS 1a. Avenida Norte y 12a. Poniente Tuxtla, Gtz., Chiapas Tel: 2-09-81
12. ING. MANUEL CARRASCO LOPEZ 150 Poniente No. 7 "C" Departamento 402 Col. Vallejo México, D. F.	COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE MEXICO ( S.R.H. ) Aldama No. 16 Tlalnepantla, Edo. de México Tel: 5-65-06-01
13. ING. FERNANDO CORTES ESTRADA Leyva y Morzagaray Guasave, Sinaloa	BANCO DE CREDITO RURAL PASIFICO NORTE, S. A. Madero 773 Guasave, Sinaloa Tel: 2-07-71
14. FRANCISCO CORRAL QUINTERO Calle Costa Rica M-F Lote No. 6 Francisco Zarco Durango, Dgo.	BANCO DE CREDITO RURAL DEL CENTRO NORTE, S. A. Av. Avila Camacho No. 3900 Ote. Torreón Coah. Tel: 2-99-12

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

- |   |  |
|---|--|
| 15. RAUL CHAPA NIETO<br>Benjamín No. 101<br>Col. Alameda<br>Celaya, Gto.<br>Tel: 2-53-80                                  | BANCO DE CREDITO RURAL DEL CENTRO,<br>S. A.<br>Colón y Zaragoza<br>Querétaro, Qro.<br>Tel: 2-74-62                         |
| 16. SERGIO CHAVEZ REQUÉRA<br>Tipografía No. 293<br>Col. 20 de Noviembre<br>México, D. F.                                  | SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS<br>Abraham González No. 3<br>México, D. F.  |
| 17. ING. ARMANDO DE LA PEÑA LEGORRETA<br>Central 2 No. 16-B<br>Popotla<br>México 17, D. F.<br>Tel: 5-47-09-63             | COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD<br>Melchor Ocampo No. 455<br>México 5, D. F.<br>Tel: 5-14-56-14                           |
| 18. ING. LUCIANO DE LA ROSA ARELLANO<br>Plaza de la Perdiz No. 28<br>Lomas Verdes<br>Naucalpan, México<br>Tel: 5-72-14-68 | CIA. DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO,<br>S. A.<br>Melchor Ocampo No. 171<br>Col. Anáhuac<br>México 17, D. F.<br>Tel: 5-92-06-34 |
| 19. JOSE DEL CASTILLO ARAIZA<br>Av. Unión No. 272<br>Tepeyac Insurgentes<br>México 14, D. F.<br>Tel: 5-77-34-35           | BANCO NACIONAL DE CREDITO RURAL,<br>S. A.<br>Motolinia No. 11-4o. Piso<br>México 1, D. F.<br>Tel: 5-21-83-61               |
| 20. RAMON F. DAVILA CASTRUITA<br>González Ortega No. 263 Nte.<br>Unidad<br>Torreón, Coah                                  | BANCO DE CREDITO RURAL DEL CENTRO<br>NORTE, S. A.<br>Ave. Avila Camacho 3900 Ote.<br>Torreón, Coah.                        |
| 21. ING. OSCAR DIAZ MARTINEZ DE ESCOBAR<br>Ave. Central 228-A<br>Col. Educación<br>México 21, D. F.                       | COMISION DE AGUAS DEL VALLE DE<br>MEXICO, S. R. H.<br>Balderas No. 55<br>México 1, D. F.<br>Tel: 5-10-02-94                |

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
1 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

<u>NOMBRE Y DIRECCION</u>	<u>EMPRESA Y DIRECCION</u>
22. LIC. JOSE ARMANDO DIEZ PEREZ Luz Savinón 604-601 Col. del Valle México 12, D. F. Tel: 5-43-97-20	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Paseo de la Reforma No. 46 México 1, D. F. Tel: 5-46-33-05
23. ANSELMO DELGADO BARRIOS 10a. Av. Norte No. 47 Tapachula, Chis.	BANCO DE CREDITO RURAL DEL ITSMO, S. A. 6a. Av. Norte y 1a. Poniente Tapachula, Chis. Tel: 14-20
24. ING. CARLOS ERHARD BENAVIDES General Anaya No. 102 Ote. Linares, N. L. Tel: 2-24-15	BANCO DE CREDITO RURAL DEL NOROESTE S. A. Morelos y Corregidora Linares, N. L. Tel: 2-23-50
25. ING. RAMIRO GALLEGOS GONZALEZ Calderon de la Barca No. 250 Fracc. del Real San Luis Potosi, S. L. P.	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Av. Venustiano Carranza No. 1563 San Luis Potosi, S. L. P. Tel: 3-33-77
26. ING. JAIME GARCIA CASTAÑEDA Valle Allende No. 67 Dpto. 2 Conjunto Habitacional Valle de Aragón Edo. de México	BANCO DE CREDITO RURAL DEL NOROES- TE, S. A. Jalisco y Allende Cd. Obregón, Son.
27. ING. SERGIO E. GARCIA V. Guillermo Prieto No. 230 Col. Cortinas Cd. Obregón, Son.	BANCO DE CREDITO RURAL DEL NOROES- TE, S. A. Guerrero y Sinaloa Edif. "Beatriz" Cd. Obregón, Son. Tel: 3-44-98
28. ING. JAVIER JOSE J.G. GARZA GARCIA Chiapas 135 Dep. 103 Col. Roma México 7, D. F.	UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA Unidad Ixtapalapa México, D. F. Tel: 5-81-50-04 Ext. 92



DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

29. ING. HUMBERTO A. GONZALEZ ACEVEDO  
Miguel Bernal Jiménez No. 126  
Col. Polanco  
Cd. Victoria, Tamps.  
Tel: 2-53-78
- BANCO DE CREDITO RURAL DEL NOROESTE,  
S. A.  
Av. Venustiano Carranza Edificio  
Lamadrid  
Cd. Victoria, Tamps.  
Tel: 2-09-69
30. LIC. JOSE LUIS G. GONZALEZ RODRIGUEZ  
Canario No. 17  
Fracc. Arboledas  
Edo. de México  
Tel: 3-79-16-23
- INVENTARIO NACIONAL FORESTAL  
SECRETARIA DE AGRICULTURA Y GANADE-  
RIA  
Av. Progreso No. 5  
Coyoacán  
México 21, D. F.  
Tel: 5-54-81-55 Ext. 27
31. MARCO A. GONZALEZ VILCHIS  
Frontera 19 Bis. 6  
Col. Roma  
México 7, D. F.  
Tel: 5-11-10-43
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Abraham González No. 3-4o. Piso  
Col. Juárez  
México 6, D. F.  
Tel: 5-66-18-59
32. ING. FRANCISCO JIMENEZ ZUÑIGA  
Cadiz 217-5  
Col. Alamos  
México 13, D. F.  
Tel: 5-30-67-83
- SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS  
Xola y Av. Universidad  
México 12, D. F.  
Tel: 5-19-68-13
33. ING. ROBERTO LIRA  
Monnte Alban 434  
Col. Vertiz Narvarte  
México 13, D. F.  
Tel: 5-39-96-01
- INSTITUTO MEXICANO DEL SEGURO SOCIAL  
Durango No. 291  
Col. Condesa  
México 11, D. F.  
Tel: 5-53-85-45
34. ING. GILBERTO LIZARDI MEZA  
Calle 4ta. 152 Oeste  
H. Caborca, Sonora  
Tel: 2-15-52
- BANCO DE CREDITO RURAL, S. A.  
Adalberto Sotelo y Calle 3era.  
H. Caborca, Sonora  
Tel: 2-03-37

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

<u>NOMBRE Y DIRECCION</u>	<u>EMPRESA Y DIRECCION</u>
42. ING. ROGELIO MONTERRUBIO T. Balboa 408-2 Col. Portales México 13, D. F. Tel: 5-39-71-52	COMISION DEL LAGO DE TEXCOCO, S.R.H. Campamento José Fabela en Aragón México, D. F.
43. ING. BENITO MUÑOZ HERNANDEZ H. Colegio Militar 355-A Monterrey, N. L. Tel: 74-85-83	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, UNAM Ciudad Universitaria Monterrey, N. L. Tel: 52-49-69
44. ING. CARLOS NAVARRO VIZUET Ahorro Postal 14-404 Col. Postal México 13, D. F. Tel: 5-79-69-14	COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD Ródano No. 14 México 5, D. F. Tel: 5-14-56-14
45. ING. JORGE OLGUIN MARTINEZ Bosque de la Antequera No. 39 Fraccionamiento La Herradura México 10, D. F. Tel: 5-89-19-60	CONSTRUCTORA Y PERFORADORA LATINA, S. A. Rfo Rhin No. 77 Col. Cuauhtémoc México 5, D. F. Tel: 5-14-29-26
46. ING. MARCO ANTONIO DE J. OLIVARES Juárez 918-2 Cd. Victoria, Tamps.	BANCO DE CREDITO RURAL DEL NORESTE, S. A. Morelos y González Garza Cd. Victoria, Tamps. Tel: 2-52-51
47. ING. RAFAEL PADILLA COPADO Av. Cuauhtémoc No. 1017-5 Col. del Valle México 12, D. F. Tel: 5-75-39-78	BANCO NACIONAL DE CREDITO RURAL, S.A. Calzada México Coyoacán Col. Pedro María Anaya México 13, D. F.
48. ING. JUAN DE DIOS PEREZ MARTINEZ Huertas 107-Dto. 702 Col. del Valle México 12, D. F.	U.A.S.L.P. - UNAM

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

49. ING. ARMANDO RAMIREZ RASCON  
Av. Universidad 2016 Edif. 16-102  
Col. Oxtopulco Universidad  
México 20, D. F.  
Tel: 5-50-08-48
50. ING. RAUL RASCON SOTO  
Calle Uarsquita No. 2007  
Col. Mirador  
Chihuahua, Chih.  
Tel: 5-23-32
51. ALFONSO ROA GUTIERREZ  
Av. Paseo de los Alamos No. 325  
Jardines de Celaya
52. ING. HECTOR ROMERO ALVAREZ  
Insurgentes Norte 1839  
Col. Lindavista  
México 14, D. F.  
Tel: 5-77-80-47
53. ING. DANIEL ROMERO ARELLANO  
Calle Río de la Cadena No. 15  
Manzana 18 Lote 8  
Fracc. Real del Moral  
México, D. F.
54. ROGELIO SANCHEZ SOTO  
Av. PII No. 239  
Col. Educación  
México 21, D. F.
55. CITALAN SANTANA LOPEZ  
11a. Calle Poniente No. 242  
Tapachula, Chiapas
56. ING. SALOMON SEDANO LICONA  
México, D. F.
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
Ródano No. 265  
México 19, D. F.
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Calle 3a. No. 604-3er. Piso  
Chihuahua, Chih.  
Tel: 2-98-79
- BANCO DE CREDITO RURAL DEL CENTRO,  
S. A.  
Colón No. 2  
Tel: 2-74-62
- COMISION ESTATAL DE AGUA Y SANEA-  
MIENTO  
López Mateos No. 198  
Cd. Nezahualcoyótl, México
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Balderas No. 55-4o. Piso  
México, D. F.  
Tel: 5-85-50-66
- SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
Paseo de la Reforma No. 107-1er. P.  
Col. Juárez  
México, D. F.  
Tel: 5-66-95-58
- BANCO DE CREDITO RURAL DEL ISTMO,  
S. A.  
6a. Av. Norte y Primera Poniente  
Tapachula, Chiapas  
Tel: 14-20
- COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
Ródano No. 14  
México, D. F.

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

<u>NOMBRE Y DIRECCION</u>	<u>EMPRESA Y DIRECCION</u>
35. ING. FRANCISCO M. LOMELI RADILLO ✓ Bravo y Altamirano Depto. 9 La Paz, B. C.S.	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Revolución No. 1145 Nte. La Paz B. C. S. Tel: 2-30-14
36. ING. MARIO MACHADO MENDIVIL ✓ Calle 10 No. 40 Interior 7 Ensenada, B. C.	BANCO NACIONAL DE CREDITO RURAL, S.A. López Mateos 2132 Ensenada, B. C. Tel: 9-10-44
37. HUGO CESAR MALDONADO SALDAÑA ✓ Sirna No. 8-3 Col. Industrial México 14, D. F. Tel: 5-77-81-94	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Paseo de la Reforma No. 69-7o. Piso México, D. F. Tel: 5-66-84-36
38. MARIO MEDINA ROSALES ✓ Av. Fabian Flores No. 24 San Pablo Oztotepec México 23, D. F.	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Paseo de la Reforma No. 107-1er. P. Col. San Rafael México 7, D. F. Tel: 5-66-95-58
39. ING. EDUARDO MESTA RIOJAS ✓ Arista No, 906 Tequisquiapan, S. L. P.	DIRECCION REGIONAL DE OBRAS HIDRAU- LICAS PARA EL DESARROLLO RURAL, REGION NORESTE, S.R.H. V. Carranza No. 1563 Tequisquiapan, S. L. P. Tel: 3-38-25
40. LUIS MONDRAGON PALACIOS ✓ Alamos 309 Jardines de Celaya	BANCO DE CREDITO RURAL DEL CENTRO, S. A. Colón y Zaragoza Querétaro, Qro. Tel: 2-74-62
41. GABINO G. MONTERROSA REYES Popocatepetl No. 165 Col. Portales México 13, D. F.	SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS Paseo de la Reforma No. 107-1er. P. Col. San Rafael México 4, D. F. Tel: 5-66-95-58

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA ( DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

- |  |   |
|--|---|
| 57. ING. CRISTOBAL SOLIS VILLEGAS<br>Rto San Lorenzo 267 Nte.<br>Los Mochis, Sinaloa<br>Tel: 2-07-53                           | BANCO NACIONAL DE CREDITO RURAL, S.A.<br>Leyva y Cárdenas<br>Los Mochis, Sinaloa<br>Tel: 2-14-30  |
| 58. ING. OSCAR TITO VILA<br>Panamericana No. 98-C<br>Los Arguitos<br>Querétaro, Qro.   | SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS<br>Panamericana No. 29<br>Querétaro, Qro.<br>Tel: 2-55-28  |
| 59. ING. GABRIEL TREJO<br>Canarios 179<br>Parque Residencial<br>Coacalcos Edo. de México                                       | INGENIERIA Y SISTEMAS<br>Londres 40-3er. Piso<br>Col. Juárez<br>México 6, D. F.<br>Tel: 5-11-95-95  |
| 60. JOSE VARGAS VALADEZ<br>Cieneguilla<br>Villa Unión Durango  | BANCO DE CREDITO RURAL DEL CENTRO<br>NORTE, S. A.<br>Ave. Avila Camacho No. 3900 Ote.<br>Cieneguilla<br>Villa Unión Durango<br>Tel: 2-99-12 |
| 61. ING. OSCAR FERNANDO VAZQUEZ BRIONES<br>Ensenada No. 20<br>Capistrano, Atizapán<br>Edo. de México<br>Tel: 3-97-63-85        | SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS<br>Abraham González No. 3 Mezzanine<br>Col. Morelos<br>México 6, D. F.<br>Tel: 5-66-89-92                |
| 62. JUAN MANUEL UGALDE JIMENEZ<br>Emiliano Zapata 807<br>Col. del Valle<br>Zamora, Mich.                                       | BANCO DE CREDITO RURAL DEL PACIFICO<br>SUR, S. A.<br>Av. 20 de noviembre No. 20<br>Zamora, Mich.<br>Tel: 2-03-31 Ext. 30                    |
| 63. ING. JOSE FELIPE YTUARTE OLIVO<br>Bosque de Rio Frio No. 105<br>Fracc. La Herradura<br>México 10, D. F.<br>Tel: 5-89-35-96 | COMISION DEL PAPALOAPAN<br>Cd. Miguel Alemán, Ver.  |

DIRECTORIO DE ASISTENTES AL CURSO DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA DEL  
12 AL 31 DE JULIO DE 1976 )

NOMBRE Y DIRECCION

EMPRESA Y DIRECCION

64. MAURO MORENO CORZO  
Edificio 35 Entrada "1" Dpto.404  
Unidad Lindavista Vallejo  
México 14, D. F.  
Tel: 5-67-30-56

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS  
1a. Av. Norte y 12a. Poniente  
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
Tel: 2-09-81