

# Filtraciones en la Cimentación de la Cortina de la "Presa Requena"

Por el Ingeniero

**ALFONSO DE LA O.**

Jefe de la Oficina de Geología, Depto. Estudios C. N. I.

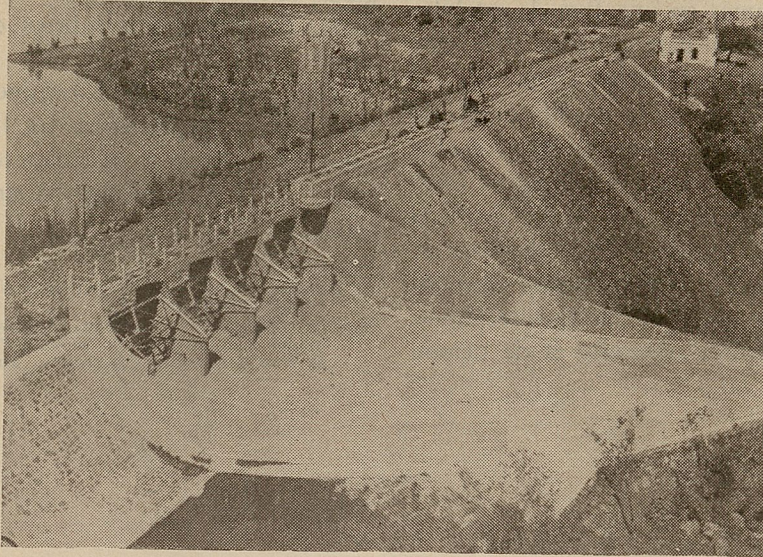
**E**N el mes de junio de 1939 se investigaban las condiciones de estabilidad de la cortina de la "Presa Requena", en el Distrito de Riego de Tula, Estado de Hidalgo.

Entre los trabajos que se efectuaron para tal fin, la Oficina de Geología, del Departamento de Estudios, de la Comisión Nacional de Irrigación, tuvo que llevar a cabo

una serie de investigaciones que estuvieron a cargo del autor, para estudiar las condiciones de permeabilidad de la cimentación de la cortina mencionada.

Uno de los problemas fundamentales era la determinación de la velocidad de filtración que se hizo por medio de colorantes, empleando la fluoresceína por considerarla como el más adecuado. La investigación tenía por objeto determinar si había fugas peligrosas en la cimentación de la cortina citada.

Como lo que se trataba de averiguar es la velocidad con que el agua almacenada en la presa pasa por los cimientos de la misma, parecía más conveniente agregar el colorante aguas arriba de la cortina, esto es, en el agua almacenada en el vaso, lo que no era aconsejable dada la gran cantidad que se requería y teniendo en cuenta que el costo del citado colorante es considerable: en el mercado se consiguió a razón de \$ 210.00 el kilogramo. Además era seguro que una gran parte de esta sustancia se perdiera con el agua que sale por la obra de toma. Por otra parte, el contaminar una zona cercana a la cortina impediría aislar las fugas localizadas en el caso



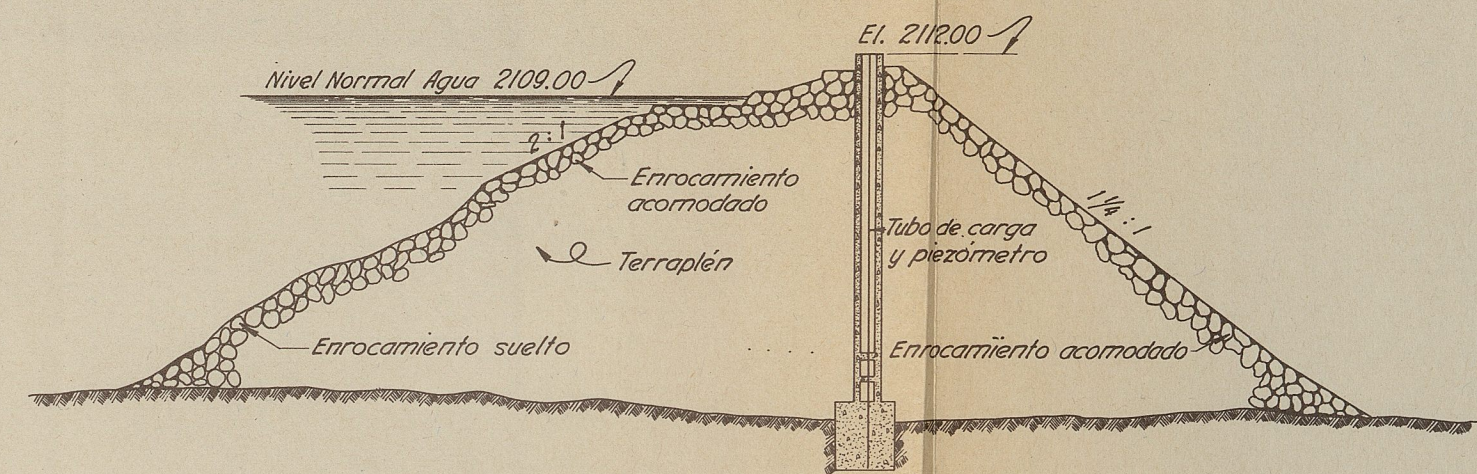
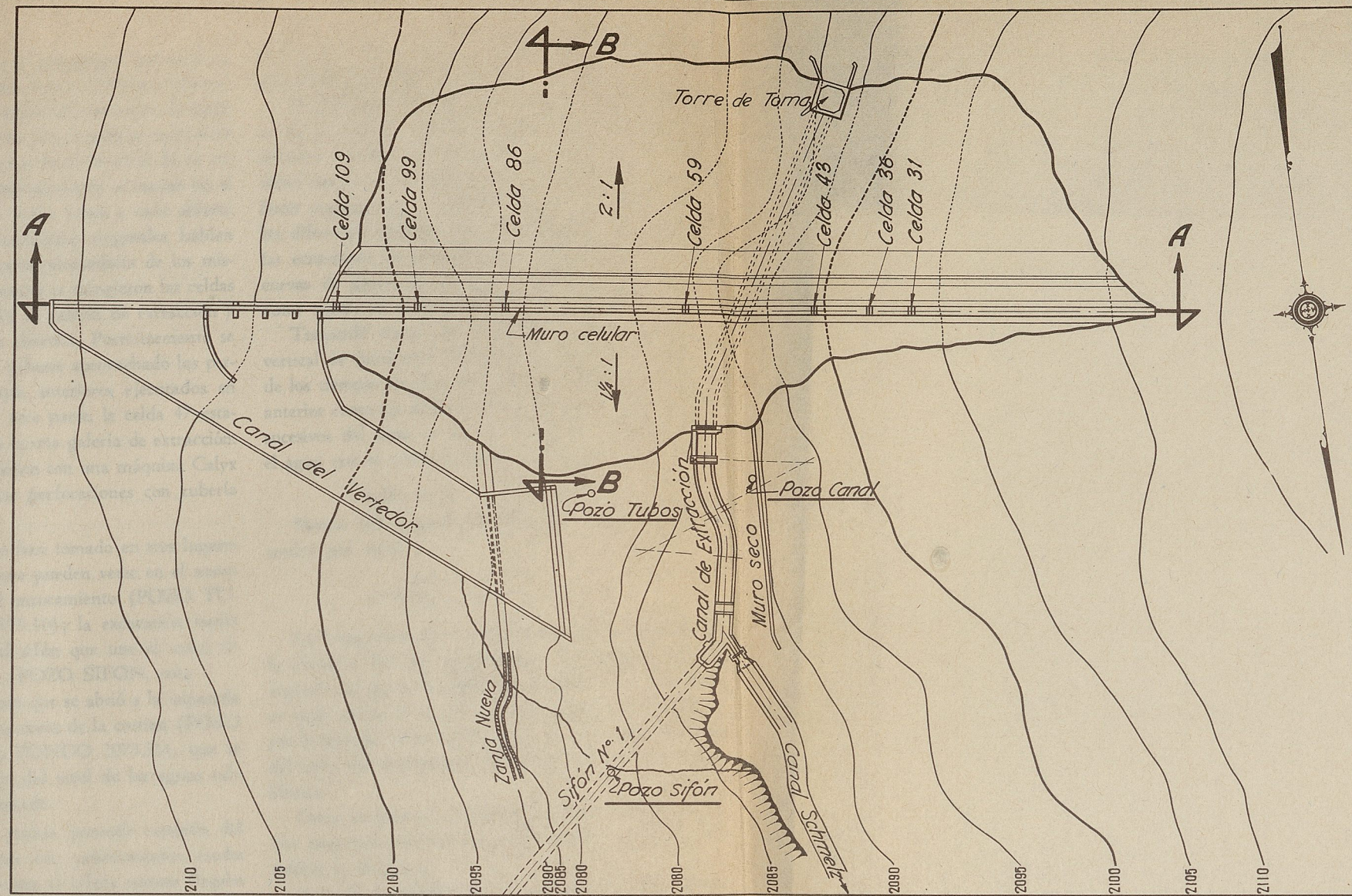
Nº 1.—Vista general de la Presa Requena desde la ladera derecha, en orden sucesivo, el vertedor fijo, las compuertas radiales, la cortina sobre cuya corona se ven las máquinas perforadoras.

que las hubiere, ya que era de esperarse que toda el agua de filtración se contaminara.

Se pensó también en hacer una serie de perforaciones junto al muro celular en el lado de aguas arriba, atravesando el enrocamiento y terraplén, tratando de llegar hasta el contacto del dentellón con el terreno original. Estas perforaciones resultarían caras y el pro-

cedimiento un tanto deficiente por dos razones; la primera, porque era muy difícil saber en realidad cuándo se había alcanzado este contacto, y la segunda, porque el colorante tendería a difundirse hacia aguas arriba con las sobrecargas que se le diera para acelerar el fenómeno y hay que tener presente que durante todos estos meses el nivel del agua almacenada en la presa fué más bien bajo, siendo necesario que la sobrecarga se diera hasta la cota 2109 que corresponde a la cresta de la obra de excedencias. El nivel del agua en la presa desde el 21 de junio, hasta mediados del mes de septiembre, fluctuó entre las cotas 2091.03 (18 horas del 30 de agosto) y 2096.17 (2 horas del 13 de septiembre).

En una junta celebrada el día 16 de junio de ese año en el Departamento Consultivo de la Comisión Nacional de Irrigación, en la que estuvieron presentes los señores ingenieros Weiss, Favela, Christopher, Larios, Dr. Waitz y el autor, se acordó que el colorante se agregara en diferentes partes de la cortina haciendo perforaciones expresas en el fondo del muro celular atravesando el cimiento de este muro hasta llegar al contacto del dente-

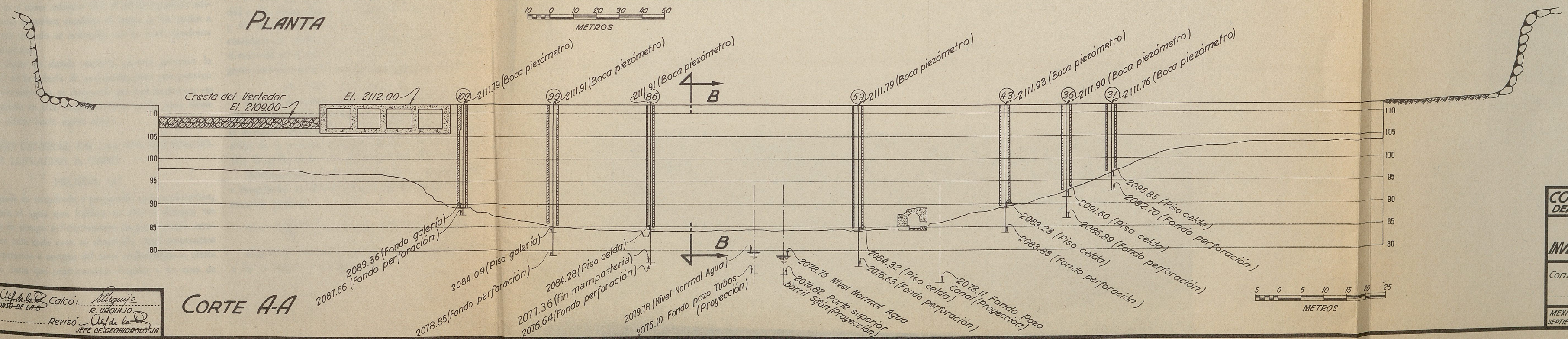


**CORTE B-B**

4 0 4 8 12 16 20  
METROS

**PLANTA**

0 10 20 30 40 50  
METROS



**CORTE A-A**

5 0 5 10 15 20 25  
METROS

**Nota**

Este plano muestra la posición relativa de las celdas experimentadas y de los sitios de muestreo de las aguas.

Adaptó: *[Signature]* Calco: *[Signature]*  
ING. ALFONSO DE LEO  
Verificó: *[Signature]* Revisó: *[Signature]*  
JEFE DE GEOHIDROLOGÍA

**COMISION NACIONAL DE IRRIGACION**  
DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOHIDROLOGIA

Distrito de Riego de Tula, Hgo.

**INVESTIGACIONES EN LA PRESA REQUENA**

Conforme *[Signature]* JEFE DEL DEPTO. DEPTO. CONSULTIVO  
CONTROL TEC. Y ADM. Aprobó: *[Signature]* VOCAL EJECUTIVO

MEXICO, D. F. SEPTIEMBRE-1939

S-3-C-570

llón con el terreno original; se ademarían con tubo de fierro estas perforaciones para evitar cualquier fuga en la masa de la mampostería arriba del contacto; la carga del colorante se haría a presión para lo cual se instalarían tuberías verticales más o menos hasta el nivel de la corona del muro celular. Las perforaciones se harían en el lugar donde no se hubieran hecho pozos a cielo abierto por considerarse que las condiciones originales habían sido alteradas en dichos lugares, alejándolas de los mismos. Para hacer las perforaciones se escogieron las celdas 7, 19, y 47 a la izquierda de la galería de extracción y las 59, 86, 99, y 109 a la derecha. Posteriormente se eliminaron las primeras por haberse aprovechado las perforaciones hechas en trabajos anteriores ejecutados en las celdas 31, 36 y 43. Por otra parte, la celda 47 estaba inundada con agua de la misma galería de extracción.

Las perforaciones se hicieron con una máquina Calyx modelo H-33, ademandando las perforaciones con tubería de 2" de diámetro.

Las muestras de agua se han tomado en tres lugares aguas abajo de la cortina que pueden verse en el anexo Núm. 1, o sean al pie del enrocamiento (POZO TUBOS, cota en el fondo 2075.10); la excavación hecha para descubrir el barril del sifón que une el canal de salida con el canal nuevo (POZO SIFON, cota . . . . 2074.82); por último, el pozo que se abrió a la izquierda del canal de extracción, muy cerca de la cortina (POZO CANAL, COTA EN EL FONDO 2073.11), que se profundizó hasta más abajo del nivel de las aguas subterráneas de la ladera izquierda.

El agua de filtración podría provenir también del dren del muro celular pero éste, prácticamente estaba seco. El gasto normal que por él aflúa apenas llegaba a 0.97 l. p. s. como máximo (14 al 19 de agosto); además, a veces escurrían caudales de agua de los pozos a cielo abierto cuando se trabajaba en las investigaciones del muro celular.

Otro lugar de donde también podría provenir la filtración era la galería de extracción, pero por pruebas hechas anteriormente se demostró que prácticamente no hay filtración en ella, cuando menos en la zona desde el muro celular hacia aguas abajo.

## PROCESO GENERAL DE LAS INVESTIGACIONES LLEVADAS A CABO.

### PRUEBA "A"

Después de terminada y preparada cada perforación, se extraía el agua que hubiere en ella y durante un período de tiempo suficientemente largo, variable naturalmente para cada caso, se observaba sistemáticamente la recuperación o ascenso del nivel hidrostático o piezométrico hasta que prácticamente llegaba a su cota de

equilibrio, lo que se acusaba porque ya no había ascenso apreciable del espejo del agua.

En esta forma se obtenía una gráfica niveles-tiempos o sea la ley de recuperación de los niveles, que nos informa e ilustra acerca del movimiento de las aguas subterráneas en la zona de la perforación. Para poder hacer comparaciones fácilmente de este fenómeno entre las diferentes perforaciones estudiadas, se determinaron las ecuaciones de estas leyes, deduciéndose también las curvas de gastos de las perforaciones, para lo cual el autor siguió el método de análisis siguiente:

Tomando como ejes de coordenadas en un plano vertical la horizontal del nivel de equilibrio como eje de los tiempos en días ( $t$ ) y el eje del pozo, normal al anterior como eje de los niveles o bien abatimientos ( $D$ ) sucesivos del agua, si ( $a$ ) es el área de la perforación, el agua que se acumula en un lapso ( $dt$ ) será:

$$a \cdot dD = q \cdot dt \dots\dots\dots (1)$$

Siendo ( $q$ ) el gasto del pozo, que según la anterior tendrá por valor

$$q = a \frac{dD}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

La integración de la primera nos da la ecuación de la curva o ley de recuperación; de acuerdo con la segunda, el gasto variable ( $q$ ) es igual a la pendiente en cada punto de la curva niveles-tiempos, multiplicada por el área de la sección del pozo. El gasto ( $q$ ) depende del valor del abatimiento "D" para el régimen ya establecido.

Como en general se trataba de velocidades de afluencias pequeñas era legítimo aceptar para la ley de filtración la de Darcy:

$v = K \cdot J$ , siendo ( $K$ ) el coeficiente de permeabilidad y ( $J$ ) la pendiente. En el caso de las celdas 31, 36 y 43, las perforaciones no estaban entubadas y si se considera un coeficiente medio de permeabilidad para el material en el que están hechas las perforaciones, los gastos estarán representados por la ecuación general:

$$q = C (2H - D)D \dots\dots\dots (3)$$

(C), la determinaremos partiendo de los datos de observación (curva abatimientos-tiempos), para lo cual es necesario integrar la ecuación (1).  $H$  es la profundidad de la perforación abajo del nivel de equilibrio y ( $D$ ) la profundidad del agua abajo de dicho nivel.

Substituyendo el valor de ( $q$ ) en la ecuación (1) e integrando, se obtiene para la ley de recuperación la ecuación general:

$$t = \frac{1.1515 a}{HC} \left[ \log \cdot D - \log \cdot (2H - D) \right] \dots\dots\dots (4)$$

Con la que se calcularon diferentes valores de (C) a fin de trazar la ley aceptada,

$$C = \frac{1.1515a}{Ht} \times \log. \frac{D}{2H-D} \dots\dots\dots(5)$$

En el caso de las celdas 59, 86, 99 y 109, las perforaciones fueron entubadas y ademadas hasta el contacto de la mampostería del dentellón con la arcilla del subsuelo; por lo tanto, la admisión del agua de filtración era sólo por la parte inferior, por lo que estas perforaciones se consideraron como pozos a presión pudiendo representarse la curva de gastos como sigue:

$$q = C.D. \dots\dots\dots(6)$$

En este caso la integración de la ecuación (1) nos lleva a la siguiente expresión:

$$t = \frac{2.303a}{t} (\log. D - \log. H) \dots\dots\dots(7)$$

O bien para calcular C

$$C = \frac{2.303a}{t} \times \log. \frac{D}{H} \dots\dots\dots(8)$$

El cálculo y trazado de las curvas revela que las consideraciones en que se basó su deducción son correctas ya que se ajustan bien a los puntos observados. En la determinación de las constantes de las diferentes ecuaciones dadas en el presente estudio podría haberse utilizado el procedimiento de mínimos cuadrados que es muy laborioso y que prácticamente nos daría el mismo resultado.

Se observaron algunas anomalías en el fenómeno de recuperación de las celdas 99 y 56 que a su tiempo se explicarán. La gráfica en este caso es una sucesión de líneas rectas de ecuación general:

$$D = B - At. \dots\dots\dots(9)$$

En este caso a fortiori,  $q = \text{constante}$ , en cada tramo.

### PRUEBA "B"

Terminada la prueba "A" se montaba una tubería hasta el nivel de la corona de la presa para hacer una prueba de permeabilidad, para lo cual se llenaba la tubería hasta arriba y se observaba después cómo iba descendiendo el nivel del agua con el tiempo; en esta forma se determinaba una gráfica niveles-tiempos o ley de abatimiento de niveles, que es decreciente. Para poder hacer también comparaciones numéricas se determinaron las ecuaciones de estas leyes y la rapidez variable de descenso.

En general el eje horizontal o de los tiempos (t), corresponde al nivel de equilibrio hidrostático en la perforación. El eje de los niveles (h), es vertical y se fijó en algunos casos gráficamente y en otros analíticamente. La forma general de estas ecuaciones es:

$$h = \frac{M}{(t+A)^n} \dots\dots\dots(10)$$

h, altura correspondiente a la época (t); M, A y n constantes. Se trata de curvas llamadas politrópicas, resultando algunas de ellas hipérbolas equiláteras, cuando  $A = 0$  y  $n = 1$ , referidas a sus asíntotas, en este caso los ejes ya indicados.

El gasto absorbido en un instante dado es:

$$q = a \frac{dh}{dt} \dots\dots\dots(11)$$

Siendo a, el área de la sección del tubo de carga o piezómetro. De la ecuación número (10) se deduce, la expresión para la rapidez de descenso:

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{M.n}{\left(\frac{M}{h}\right)^{\frac{n-1}{n}}} \dots\dots\dots(12)$$

### PRUEBA "C"

Terminadas las pruebas anteriores se procedía a hacer la del colorante, poniéndose éste en los tubos de carga manteniendo el nivel prácticamente constante durante todo el experimento.

Desde antes de la carga se tomaban muestras testigos de agua en los sitios mencionados anteriormente, es decir, pozo-tubos, pozo-sifón, pozo-canal y después de la carga se tomaban muestras sistemáticamente para examinarlas en el fluoroscopio.

Las muestras fueron numeradas en orden progresivo anotándose la fecha y hora en la que fueron tomadas. Para poder observarlas sin dificultad se dejaban reposar por varios días a fin de que las materias en suspensión muy finas, se depositaran, quedando así el agua completamente transparente. El resultado positivo o negativo de cada prueba después del examen se llevaba cuidadosamente en un registro.

### Cantidad de fluoresceína usada

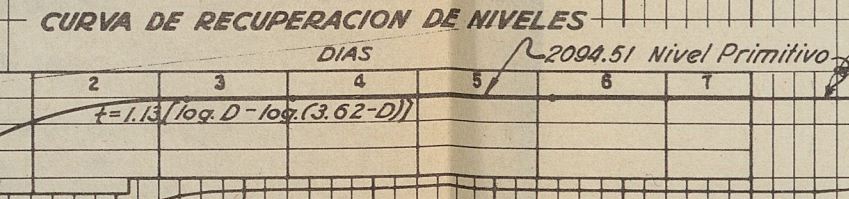
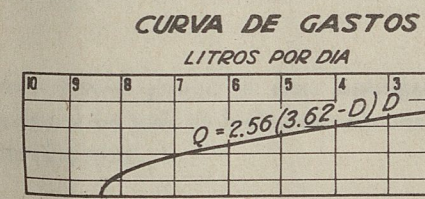
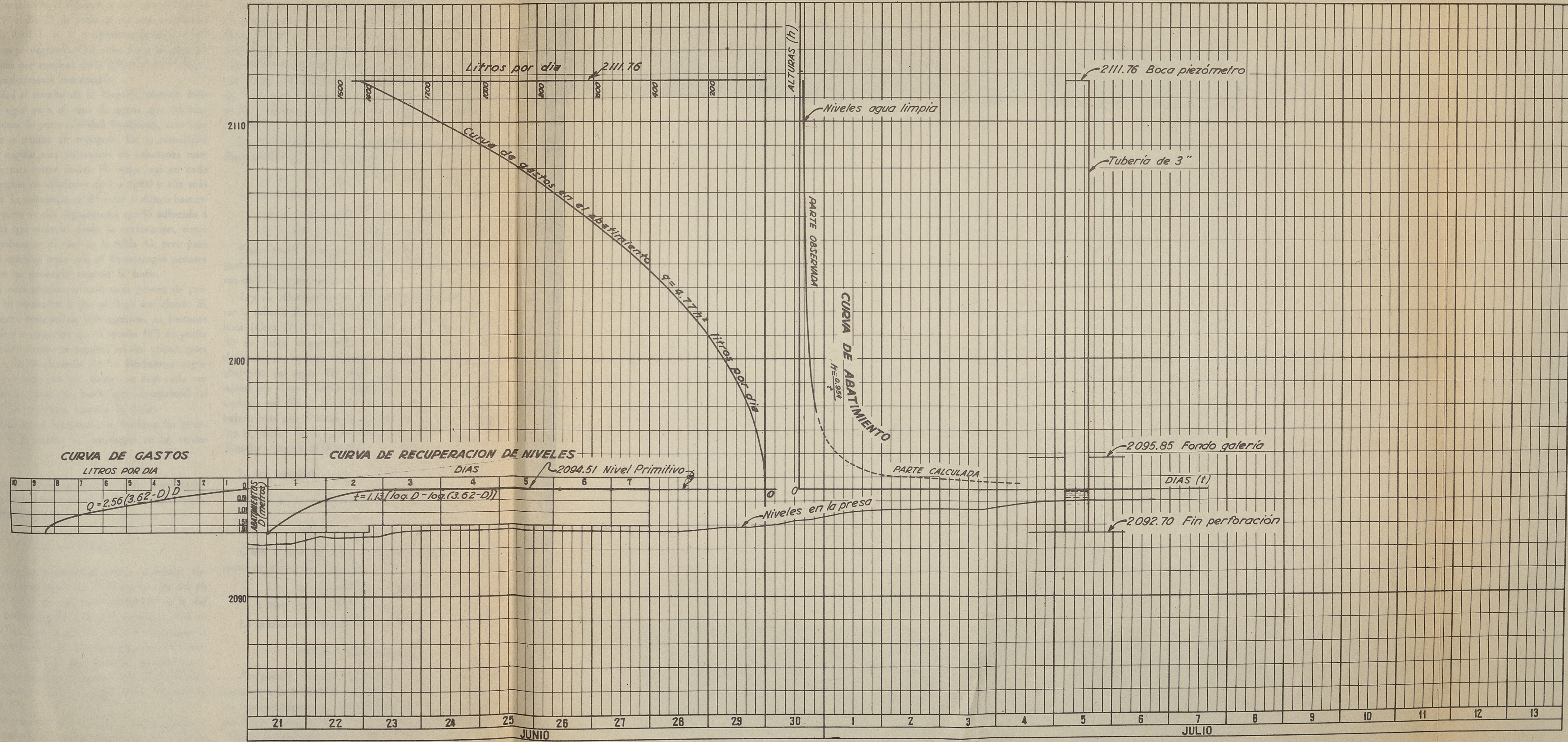
Algunos hidrólogos recomiendan que la cantidad de colorante en kilogramos que debe utilizarse en pruebas semejantes a las efectuadas debe ser:

$$c = d.q.$$

d, distancia en kilómetros del punto de carga al de muestreo; (q) gasto de la corriente que se contamine en metros cúbicos por segundo.

En el caso nuestro el punto de muestreo más alejado es el que corresponde al sifón, siendo su máxima distancia a la celda más alejada (la número 31) de 137 metros.

En cuanto al caudal (q) no es posible determinarlo; se podría tomar como base el que aparece en el pozo de los tubos o del sifón que es una parte de la filtración aunque de ninguna manera el caudal que escurre en



ANEXO N° 2.

**COMISION NACIONAL DE IRRIGACION**  
DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOHIDROLOGIA  
Distrito de Riego de Tula, Hgo.  
**INVESTIGACIONES EN LA PRESA REQUENA**  
**GRAFICAS DE LA CELDA 31**

Conforme: *[Signature]* JEFE DEL DEPTO. DEPTO. CONSULTIVO  
CONTROL TEC. Y ADM. Aprobó: *[Signature]* VOCAL EJECUTIVO

MEXICO, D.F. SEPTIEMBRE-1958

S-3-C-571

Calculó: *[Signature]* ING. ALFONSO DE LA O  
Verificó: *[Signature]* JEFE DE GEOHIDROLOGIA

cada perforación o celda considerada. Se hizo un aforo volumétrico cuidadoso del escurrimiento total en el sifón después de restablecido el régimen a una cota del espejo del agua 2077 el día 23 de junio de ese año, resultando un gasto de 0.961 l. p. s. o aproximadamente 0.001 metros cúbicos por segundo. Con estos datos la cantidad de fluoresceína por emplear sería  $0.001 \times 0.137$  Kgs., cantidad completamente inaceptable.

En realidad el criterio de la fórmula anterior debe aplicarse en rigor para el caso de aguas que circulan por formaciones de permeabilidad localizada, caso que precisamente se trataba de averiguar. En la actualidad se aconseja emplear esta substancia en soluciones muy concentradas para evitar dudas. El autor usó en cada prueba 50 gramos en soluciones de 1 a 5,000 y aún más concentradas. La substancia se difundió y diluyó bastante; además, parte de ella seguramente quedó adherida a los materiales que atravesó desde la perforación, como puede comprobarse en el caso de la celda 43, pero pasó la suficiente cantidad para que el fluoroscopio acusara perfectamente su presencia cuando la hubo.

En todas estas pruebas se tuvo todo género de precauciones y los resultados a que se llegó son claros. El proceso de estos trabajos de investigación, es bastante lento, máxime si se considera que la prueba (C) no podía hacerse al mismo tiempo ni siquiera en dos celdas, pues debía evitarse la interferencia de los fenómenos registrados en una y otra; por este motivo se dejó cada vez pasar el tiempo necesario hasta que desapareció el colorante en las muestras, cuando lo hubo.

En las siete celdas estudiadas se hicieron las pruebas A y B. Y la prueba "C" solamente en las celdas 43 y 86.

Explicando el proceso general de estas investigaciones se pasa a detallar los trabajos hechos en cada una de las celdas experimentadas.

#### CELDA NUMERO 31

*Perforación.*—La perforación estaba ya hecha: tiene un diámetro aproximado de 3". Como la cota del piso del muro celular en esa parte es 2095.85 y la del fondo de la perforación 2092.70, ésta tiene una profundidad de 3.15 m. (ver anexos 1 y 2), no sabiéndose la parte que corresponde a la mampostería y la correspondiente a la arcilla. Es de suponerse que atravesó el cimiento ya que en las exploraciones a cielo abierto hechas en la 34 se encontró que su espesor está comprendido entre 1.25 y 2.50.

*Ley de recuperación de niveles.*—Antes de agotar el agua de la perforación se encontró que su nivel estaba a la cota 2094.51. A las 8 horas del 21 de junio se vació

la perforación, observándose que ya para el día 23 a las 13 horas prácticamente había recuperado dicho nivel, lo que revela un considerable movimiento de aguas subterráneas debido tal vez a una permeabilidad grande. Como puede verse en el anexo Núm. 2, durante esos días la cota del agua almacenada en el vaso es inferior a la del fondo de la perforación, lo que indica claramente que el agua circulante es la freática de la ladera izquierda de la boquilla. Sería interesante observar el fenómeno de recuperación cuando haya una carga considerable en la presa.

La ley de recuperación determinada partiendo de las observaciones según se indicó ya, es:

$$t=1.13 \left[ \log. D - \log. (3.62 - D) \right]$$

La curva de gastos

$$Q = 0.00256 (3.62 - D)D, \text{ m}^3 \text{ por día.}$$

$$Q = 2.56 (3.62 - D)D, \text{ litros por día.}$$

Como puede verse en el mismo anexo Núm. 2, los gastos variaron d 8.4 l. p. d. para un abatimiento máximo de 1.81, hasta ser nulos.

*Ley de Abatimiento de Niveles.*—Después de montar la tubería de carga se llenó de agua limpia hasta la boca (Cota 2111.76) a las 15 horas 4 minutos del día 30 de junio, comenzando a observar los niveles de descenso, que indican también una rapidez fuerte en la absorción del agua. En efecto para las 21 horas del mismo día el nivel había descendido 14.05 m. Las observaciones del día 1º de julio indican que el agua había bajado más que el nivel de la junta del tubo de carga, con el "niple" de la perforación donde ya no pasaba el flotador y fueron desechadas.

$$\text{La ley calculada es } h = \frac{0.954}{t}$$

La rapidez de descenso es en valor absoluto:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h^2}{0.954} \text{ m.p.d.}$$

Como el área del tubo de 3" es de 0.00455 m<sup>2</sup> la curva de gastos en el abatimiento será:

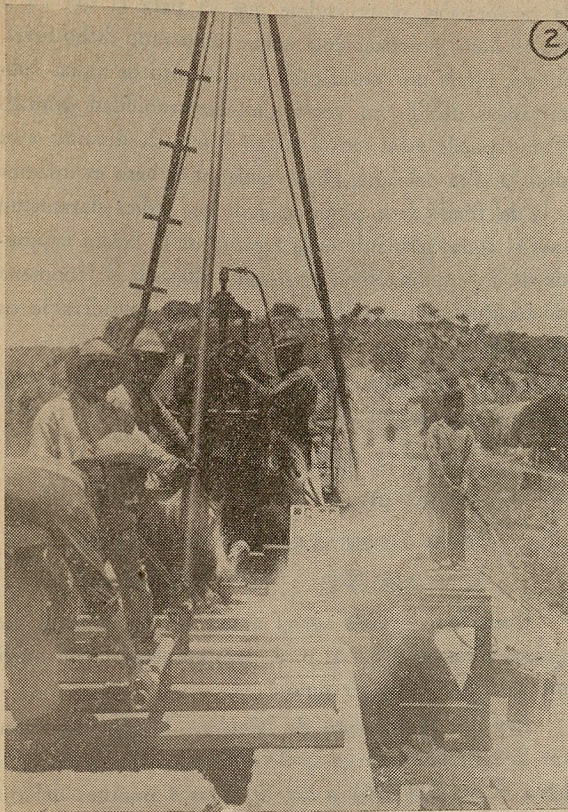
$$Q = 0.00477 h^2, \text{ m}^3 \text{ por día}$$

$$\text{o bien } Q = 4.77 h^2, \text{ l.p.d.}$$

La gráfica correspondiente está en el anexo Núm. 2.

#### CELDA NUMERO 36

*Perforación.*—La perforación está en condiciones semejantes a la de la celda 31, también es de 3" de diámetro aproximadamente. Su profundidad abajo del piso del muro celular es de 4.71 m. diferencia de las cotas 2091.60 del piso del muro y 2086.89, fondo de la perforación (véase anexos 1 y 3). No se sabe cuánto corres-



Nº 2.—Una de las máquinas perforadoras Galyx H-33, que se utilizaron en las investigaciones hechas, trabajando en la celda 86.

ponde a la mampostería pero casi es seguro que la perforación la atravesó.

*Ley de Recuperación de Niveles.*—Antes de vaciar la perforación se vió que el nivel del agua en ella era 2091.96. Esto se hizo a las 11 horas del 21 de junio; para las 12 horas 30 minutos del 27 puede decirse que el agua había alcanzado su nivel de equilibrio, aunque quedando un poco más abajo que el primitivo. La recuperación fué más lenta que en la 31, a pesar de que la perforación es más profunda. Durante los días de observación los niveles del agua en la presa estuvieron entre 5.30 y 1.50 más altos que los niveles del agua de la perforación, como puede verse en el anexo Núm. 3. Es de presumirse que el agua que circulaba en esta zona del cimiento provenía en parte del agua del vaso y el resto del agua freática de la ladera izquierda.

Partiendo de las observaciones se encontró para la ley de recuperación:

$$t = 3.31 \left[ \log. D - \log. (9.22 - D) \right]$$

Para la curva de gastos se encontró:

$$Q = 0.000345 (9.22 - D)D, \text{ m}^3 \text{ p. d.}$$

$$Q = 0.345 (9.22 - D)D, \text{ litros por día.}$$

Para el máximo abatimiento el gasto es de 7.3 l. p. s., como puede verse en el anexo Núm. 3.

*Ley de Abatimiento de Niveles.*—Al montarse la tubería su boca quedó a la cota 2111.90. La velocidad de descenso es menor que en la celda Núm. 31.

La ecuación de esta Ley es:

$$h = \frac{9.55}{(t + 0.3)^{1.304}}$$

La rapidez de descenso en valor absoluto:

$$\frac{dh}{dt} = 0.232 h^{1.767}, \text{ m.p.d.}$$

El gasto será

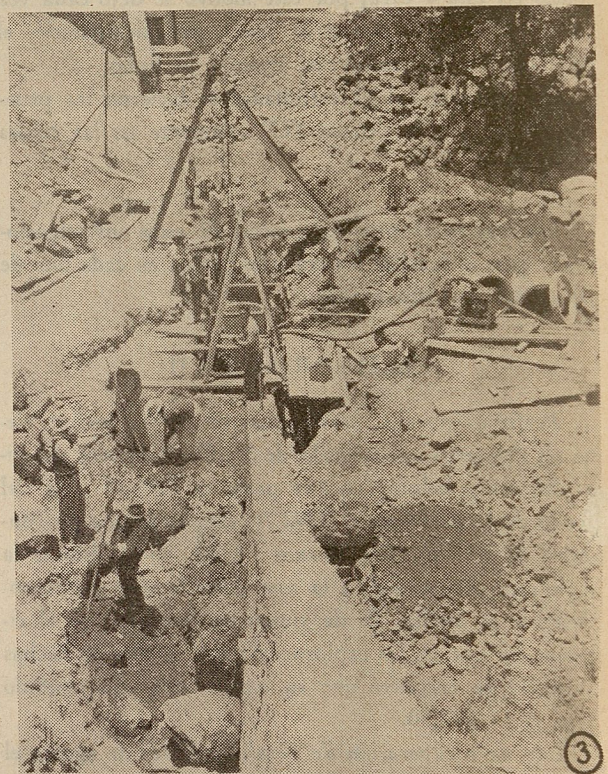
$$Q = 0.00455 \times 0.232 h^{1.767} = 0.00106 h^{1.767} \text{ m}^3 \text{ p. d.}$$

o bien:

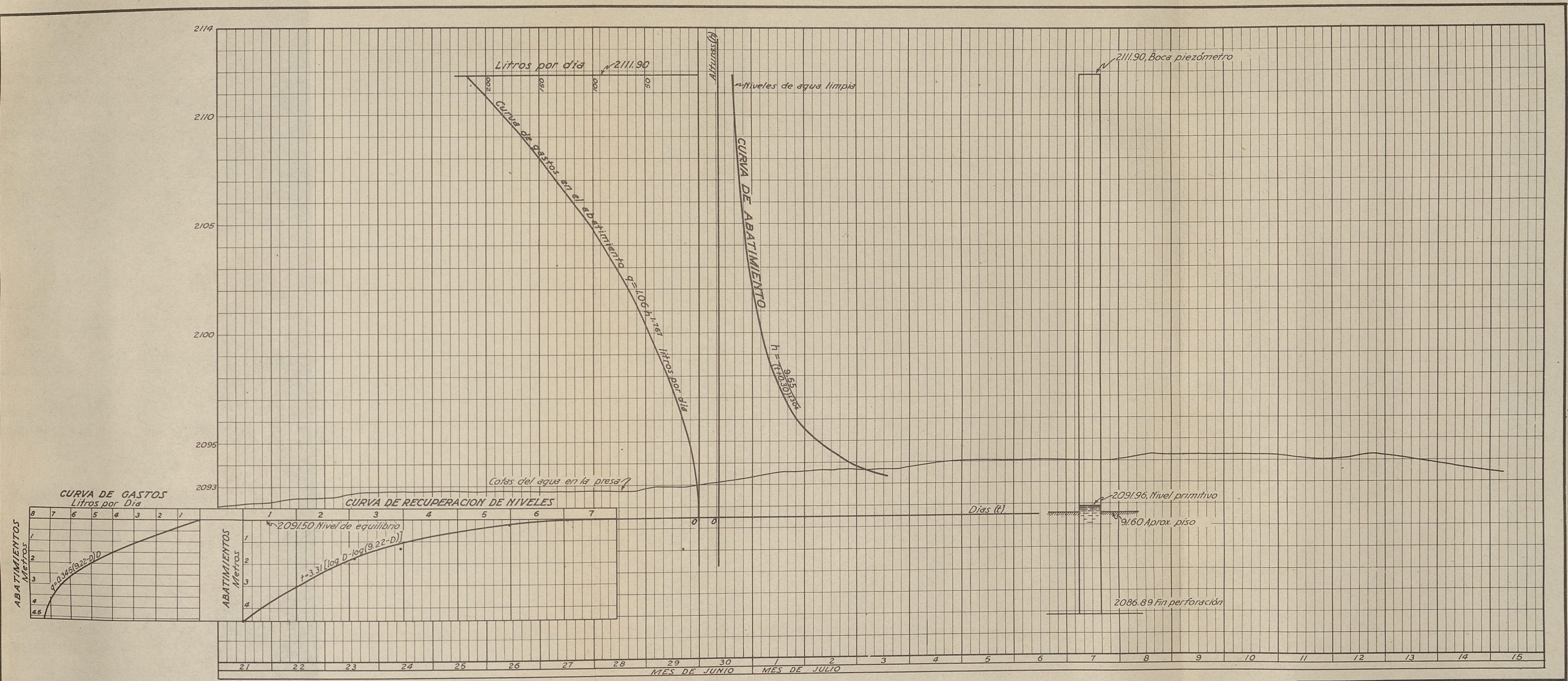
$$Q = 1.06 h^{1.767} \text{ l.p.d., cuya gráfica figura en el anexo 3}$$

### CELDA NUMERO 43

*Perforación.*—La perforación fué hecha con anterioridad. Al revisarse y limpiarse se encontró que el fondo llega hasta la cota 2083.83; como el piso del muro celular está a la 2089.23, la perforación tiene una profundidad de 5.40 m. No pudo averiguarse si está totalmente hecha en la mampostería o si penetró en el subsuelo, aunque



Nº 3.—Trabajos preliminares en la construcción del dentellón interceptor al pie del enrocamiento. En el fondo el pozo-Tubos.



Calculó: *[Signature]*  
 Ing. A. DE LA O  
 Verificó: *[Signature]*  
 Revisó: *[Signature]*  
 JEFE DE GEOHIDROLOGIA

ANEXO Nº 3

**COMISION NACIONAL DE IRRIGACION**  
 DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOHIDROLOGIA  
 Distrito de Riego Nº 3 (Tula, Hgo.)  
**TRABAJOS DE INVESTIGACION EN LA PRESA REQUENA - GRAFICAS DE LA CELDA 36**  
 Conforme: *[Signature]* DEPTO. CONSULTIVO  
 JEFE DEL DEPTO. Aprobó: *[Signature]* VOCAL EJECUTIVO  
 CONTROL TEC Y ADM.  
 MEXICO, D.F. AGOSTO, 1939

S-3-C-572

es probable que así sea, es decir, que una parte de su longitud quedó dentro de la arcilla. En el extremo superior existe un tubo de 3" empotrado unos 0.30 m. en la mampostería.

*Ley de Recuperación de Niveles.*—El día 21 de junio a las 13 horas fué medido el nivel del agua en la perforación, encontrándose una cota de 2089.11; la cota media del agua en la presa durante ese día fué 2092.23 o sea una diferencia de nivel de 3.12 m. Se limpió y vació el agua y desde ese momento se comenzaron las observaciones del ascenso de niveles cuya gráfica puede verse en el anexo número 4. No llegó a restablecerse el nivel primitivo, considerándose que el agua había llegado a su nivel de equilibrio cuando no hubo variación sensible en el ascenso (cota 2086.92), para lo que necesitó 9 días aproximadamente.

La ecuación de esta ley es

$$t = 4.62 \left[ \log. D - \log. (6.34 - D) \right]$$

La curva de gastos correspondientes es  $q = 0.358 (6.34 - D) D$ , 1 p. d.

Como puede verse en el mismo anexo Núm. 4, los gastos variaron desde 3.6 litros por día hasta ser nulos.

*Ley de abatimiento de niveles.*—Se montó una tubería de carga hasta la cota 2111.93, se llenó de agua y se observó su descenso. La ley determinada es:

$$h = \frac{42.8}{t^{0.976}}$$

La rapidez instantánea de descenso es:

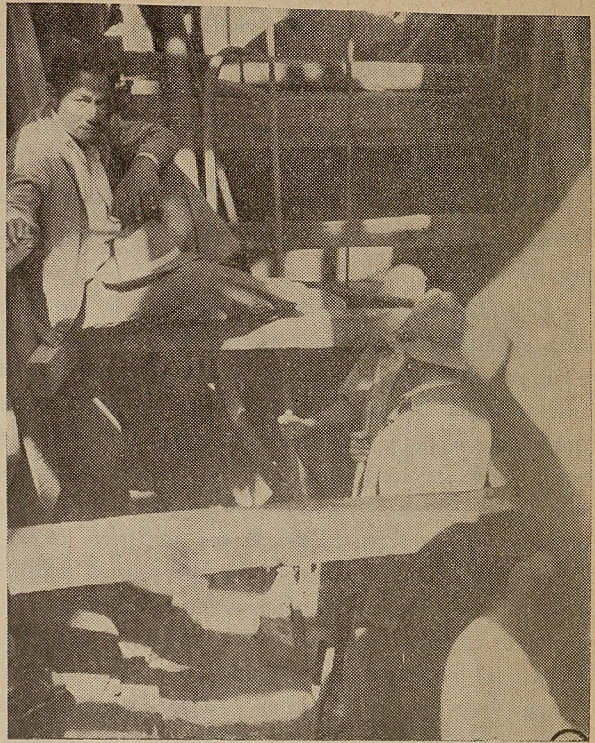
$\frac{dh}{dt} = 0.0208 h^{2.02} \text{m.p.d.}$  y la curva de gastos en el abatimiento  $q = 0.0946 h^{2.02} \text{l.p.d.}$

*Prueba de colorante.*—El día 2 de julio se hizo la carga de fluoresceína a las 10 horas, con carga media constante correspondiente a la cota 2111.68.

Desde el día anterior se sacaron muestras testigos de los 3 sitios de prueba y sistemáticamente después. Todas fueron observadas con el fluoroscopio, con los resultados siguientes:

*Pozo-tubos.*—Hasta antes de iniciar las experiencias de colorantes en la celda 86, se tomaron 85 muestras, desde el primero de julio a las 19 horas 15 minutos hasta el 13 de septiembre a las 7 horas 45 minutos, con resultados siempre negativos. Salvo en dos o tres ocasiones antes de tomar las muestras, el agua era bombeada hasta descubrir el chorro principal de la filtración.

*Pozo-sifón.*—Se tomaron 55 muestras desde el 1º de julio a las 20 horas 30 minutos hasta el 10 de agosto a las 7 horas 35 minutos. También aquí, con raras excep-



Nº 4.—Fondo de la excavación del dentellón interceptor, junto al pozo-Tubos. Puede verse la formación arcillosa.

ciones, debido a interrupciones en el servicio de las bombas, siempre se vació el agua de la excavación.

Todas las muestras resultaron negativas, es decir, no se acusó la presencia del colorante.

*Pozo-canal.*—Hasta antes de hacer la experiencia en la celda 86 se tomaron 76 muestras, es decir, hasta el 13 de septiembre a las 7 horas 50 minutos. Este pozo recibe agua de diferentes direcciones, pues está excavado totalmente en la arcilla. Se procuró siempre vaciar el agua que filtraba después de sacar las muestras a fin de evitar la dilución excesiva del colorante. Sin embargo, hubo ocasiones en las que no pudo hacerse tal operación debido principalmente a derrumbes en el pozo.

El examen de las muestras dió resultados negativos hasta la número 26 de las 7 horas 54 minutos del día 19 de julio en la que se vieron indicios de coloración, dándose la muestra de esta fecha como dudosa. Las muestras números 27 y 28 de los días siguientes fueron positivas; dudosas de la 29 a la 33 y positivas desde la 34 hasta la 38. La 39 fué dudosa. La 40 negativa. Las 41 y 42 del 4 y 5 de agosto, positivas. Desde la 43 en adelante todas fueron negativas, es decir, a la número 76 del día 13 de septiembre. Las muestras dudosas se deben a la acumulación excesiva de agua que a veces provenía del exterior cuando hubo derrumbes.

El resultado final es el siguiente:

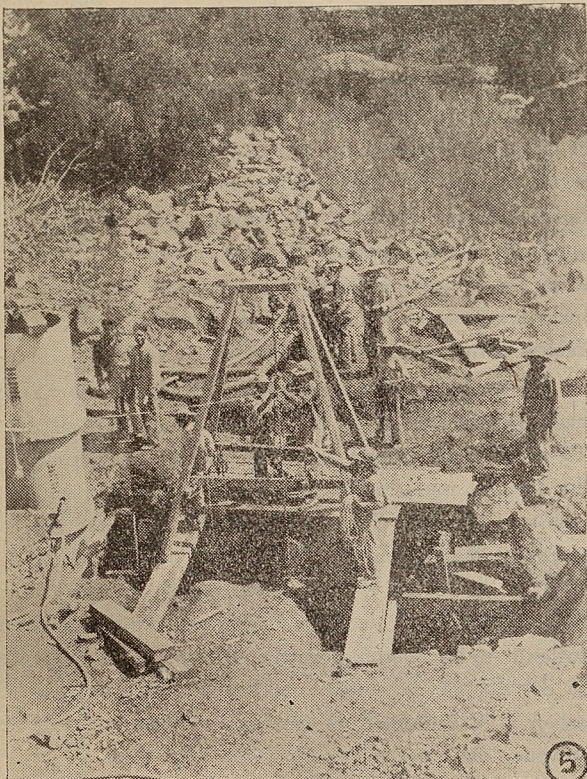
De las 10 horas del día 2 a las 9 horas 45 minutos

del día 20 de julio o sea un período de 18 días, en números redondos, el resultado fué negativo.

Del día 20 de julio a las 9 horas 45 minutos hasta el 5 de agosto a las 8 horas 24 minutos o sea un período de 26 días, resultado positivo.

El día 6 no se muestreó por no haber personal en la presa. De la última fecha en adelante el resultado fué negativo.

*Velocidad media de filtración.*—Como se comprenderá, el cálculo de ésta tiene que ser aproximado debido a que por el fenómeno de difusión es probable que desde antes del día 20 haya llegado el pie de la onda de fluoresceína al lugar de prueba, en cantidad tan pequeña que no pudo ser atestiguada. A este respecto cabe notar que ya la muestra 26 de julio acusó huellas pero dudosas. Por otra parte, siendo casi imposible reconstruir las superficies equipotenciales que pueden haberse desarrollado durante el fenómeno y por lo mismo las líneas de corriente a través de la arcilla, no se podrá calcular las longitudes de las trayectorias recorridas por el agua, por ésto es razonable y aceptable considerar el recorrido rectilíneo entre la perforación de la celda y el fondo del pozo de prueba, tomando la cota media en la perforación entre el fin del "niple" de 3" y el fondo que es la zona de filtración:



Nº 5.—Haciendo un muestreo de agua en la excavación del pozo-Tubos.

Cota-perforación fin "niple".....	2088.80
Cota-fondo perforación .....	2083.83
Cota-fondo pozo prueba.....	2073.11
Cota-media en la perforación.....	2086.32

Distancia horizontal entre la perforación y el pozo, 44.4 mts.

La distancia buscada será de 46.3 mts.

Al tiempo de recorrido de los 18 días ya mencionados entre la fecha en que se hizo la carga y en la que se atestiguó el colorante en el pozo de prueba hay que hacer una pequeña corrección debido a que el 2 de julio a las 10 horas el nivel del agua en el tubo de carga era 2100.87, por lo que hay que descontar el tiempo que tardó el agua con colorante en recorrer la distancia de 14.55 m. vertical (2100.27 menos 2086.32).

La carga en el tubo se mantuvo propiamente constante a una cota media de 2111.68. Para calcular este tiempo de recorrido necesitamos conocer la velocidad de descenso correspondiente al nivel medio anterior o sea una carga en la curva de abatimiento de 22.58 m. (véase anexo Núm. 4), con una abcisa  $t = 2$  días.

Para esta carga la rapidez de descenso será:

$$\frac{dh}{dt} = 0.0208 h^{2.02} = 11.2 \text{ m.p.d.}$$

Entonces para recorrer 14.55 m. se necesitará un tiempo de 1.3 días. Por lo tanto, el tiempo efectivo de paso del colorante es 18.0 menos 1.3 = 16.7 días. De lo anterior resulta una velocidad media de  $46.3/16.7 = 2.77$  m. p. d.

Contaremos las cargas desde el nivel en el tubo de carga hasta el fondo del sitio de prueba. Así pues, durante ésta la carga fué:

$$2111.68 - 2073.11 = 38.57 \text{ m.}$$

Carga que corresponde al nivel de equilibrio en la perforación:

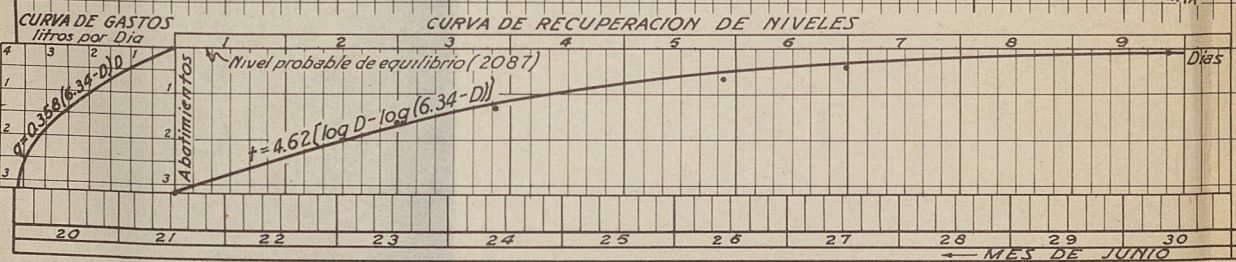
$$2087.00 - 2073.11 = 13.89 \text{ m.}$$

Como para una carga de 38.57 m. y una longitud de recorrido de 46.3 m. resulta una velocidad media de 2.77 m. p. d., para un gradiente de 1, esta velocidad sería de:

$$2.77 \times \frac{46.3}{38.57} = 3.33 \text{ m.p.d.}$$

Y para una carga de 13.89 (normal durante la experiencia):

$$3.33 \times \frac{13.89}{46.3} = 1.00 \text{ m.p. día.}$$



Calculó: *[Signature]* *[Signature]*  
 ING. A. DELTA O. A. FREJO S.  
 Verificó: *[Signature]* Revisó: *[Signature]*  
 JEFE DE GEOLOGIA Jefe de Geología

**COMISION NACIONAL DE IRRIGACION**  
 DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOLOGIA.  
 Distrito de Riego N° 3 (Tula, Hgo.)  
**TRABAJOS DE INVESTIGACION EN LA PRESA REQUENA-GRAFICAS DE LA CELDA 43**  
 Conforme: *[Signature]* DEPTO. CONSULTIVO  
 JEFE DEL DEPTO. Aprobó: *[Signature]* VOCAL EJECUTIVO  
 CONTROL TEC. Y ADM. MEXICO, D.F. AGOSTO 1939  
**ANEXO N° 4** **S-3-C-569**

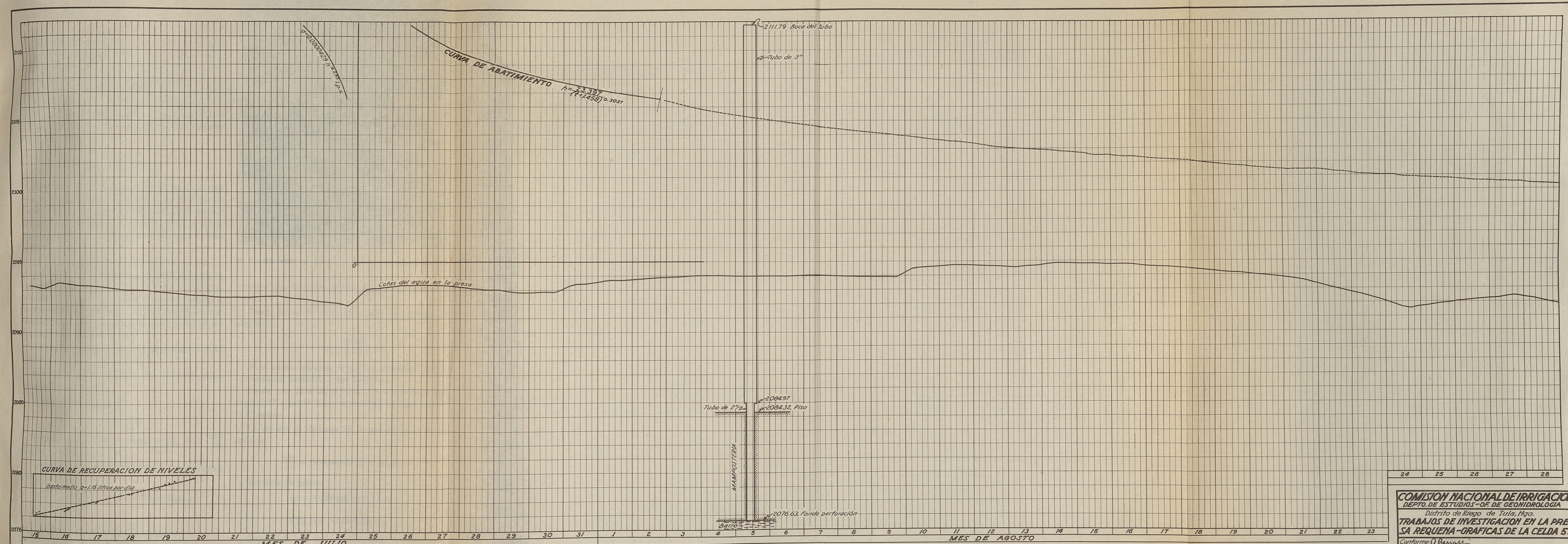


Gráfico No. 1735 1/2

CURVA DE ABATIMIENTO  $h = \frac{23.397}{(2.1458)^2} \cdot 3037$

2111.79 Boca del tubo  
Tubo de 3"

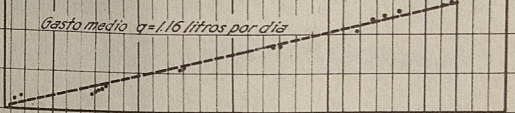
Cotas del agua en la presa

Tubo de 2"  
2084.97  
2084.32, Piso

MAMPOLITERIA

2076.63, Fondo perforación

CURVA DE RECUPERACION DE NIVELES



24 25 26 27 28

COMISION NACIONAL DE IRRIGACION  
DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOHIDROLOGIA  
Distrito de Riego de Tula, Hgo.  
**TRABAJOS DE INVESTIGACION EN LA PRE-  
SA REQUENA-GRAFICAS DE LA CELDA 59**

Conforme: *[Signature]* JEFE DEL DEPTO. DEPTO. CONSULTIVO  
CONTROL TEC. Y ADM. Aprobó: *[Signature]* VOCAL EJECUTIVO  
MEXICO, D.F. AGOSTO, 1939

ANEXO N°5

S-3-C-576

Calculó: *[Signature]* Calco: *[Signature]*  
IVAN NIREV A. FREJO S.  
Verificó: *[Signature]* Revisó: *[Signature]*  
A. VERGARA JEFE OF. GEOHIDROLOGIA

La velocidad de 3.33 m. p. d. con gradiente de 1, corresponde a velocidades de percolación observadas en materiales granulares muy finos, como arcilla y légamo (Ver Ground Water, Tolman, 1937).

Las pruebas hechas en el Laboratorio de Tierras del Departamento de Proyectos, con muestras inalteradas de la arcilla del sitio de la presa Requena, indican velocidades medias entre 1.00 y 0.01 m. por año, pero estos resultados no son contradictorios en virtud de que eran muestras escogidas y pueden considerarse como homogéneas dentro de sus pequeñas dimensiones; en cambio en grandes masas puede no ser la formación homogénea y aún presentar zonas de menor resistencia para el paso del agua.

CELDA NUMERO 59

*Perforación.*—Es de las perforaciones especiales, atraviesa la mampostería del dentellón. Como la cota del piso es 2084.32 y la del fondo 2076.63, la profundidad será de 7.69 m. El ademe es de tubo de 2" perfectamente cementado en la mampostería, hasta donde ésta termina.

*Ley de recuperación de niveles.*—El 15 de julio se agotó el agua en la perforación, llegándose hasta la cota 2077.06, es decir, que según los datos de perforación había azolve en el pozo, en 0.43 m. Esto se comprobó posteriormente al averiguar ciertas anomalías observadas en la curva de recuperación y se ordenó se hicieran otra vez las observaciones.

Por ahora, discutiremos los datos observados, aunque después se estudien los últimos datos.

Se ve que la gráfica tiende a una recta con pequeños aumentos bruscos.

La ecuación es de la forma

$$h = At + B$$

Se encuentra para la pendiente media  $A = \frac{dh}{dt}$  un valor de 0.569.

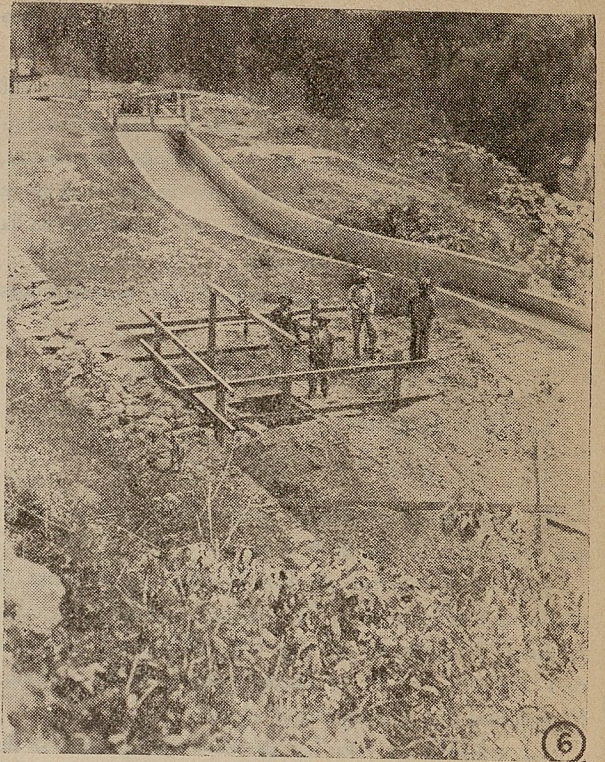
Como el área del tubo es 0.00203 m<sup>2</sup> el gasto medio constante será:

$$q = a. A = 0.00203 \times 0.569 = 0.001156 \text{ m}^3 \text{ p. d.}$$

ó 1.16 l. p. d.

Es probable que estando el tubo desazolvado la curva cambie y también el valor del gasto o gastos.

*Ley de abatimiento de niveles.*—Se montó una tubería de 3" sobre la de ademe y se llenó de agua hasta la boca (cota 2111.79). La gráfica resultó de poca pendiente, seguramente por el azolve ya dicho; es de



Nº 6.—Haciendo un muestreo de agua en el pozo-Canal.

esperarse que la nueva gráfica resulte de mayor pendiente.

Desde alturas de 11.61 hacia arriba se utilizará la ecuación

$$h = \frac{23.397}{(t + 1.458)^{0.3037}}$$

Para alturas menores la gráfica disminuye mucho su pendiente, tendiendo a una línea recta.

Desde julio 26 a las 13 horas 35 minutos hasta septiembre 27 a las 18 horas el descenso del agua fué de 14.47 metros.

La rapidez de descenso en la primera parte de la curva es

$$\frac{dh}{dt} = 0.000009423 h^{4.293} \text{ m.p.d}$$

La curva de gastos.

$$q = 0.0000429 h^{4.293} \text{ l.p.d.}$$

CELDA NUMERO 86

*Perforación.*—Es de las perforaciones especiales. Como la cota del piso del muro celular es de 2084.28 y la del fondo de la perforación 2076.64, su profundidad es de 7.64 m. La cota donde terminó la mampostería es de 2077.36 por lo que tiene un espesor de 6.92 m. La perforación penetró 72 cm. en el barro.

El ademe hasta terminar la mampostería es de tubo de 2" de diámetro.

*Ley de recuperación de niveles.*—A las 9 horas del día 14 del mes de agosto se limpió la perforación iniciándose la observación de la recuperación de niveles. Dicha recuperación fué relativamente rápida si se tiene en cuenta que la admisión del agua era solamente en la parte inferior de la perforación.

La ley determinada partiendo de las observaciones fué:

$$t = 11.75 (\log. D - \log. 5.86)$$

La curva de gastos:

$$q = 0.4 \times D., 1 \text{ p. d.}$$

El gasto máximo para el abatimiento también máximo de 5.86 m. es de 2.34 l p. s.

*Ley de abatimiento de niveles.*—Se montó sobre el ademe una tubería de 3" la cual se llenó de agua a las 17 horas 20 minutos del día 6 de septiembre hasta la cota 2111.93, que es la parte superior de la tubería. El descenso fué relativamente rápido.

La ecuación de esta ley determinada, partiendo de las observaciones:

$$h = \frac{192}{(t + 2.323)^{1.7}}$$

rapidez de descenso:

$$\frac{dh}{dt} = 0.077 h^{1.588} \text{ m.p.d.}$$

de la anterior se dedujo la curva de gastos en el abatimiento y es:

$$q = 0.3514 h^{1.588} \text{ l.p.d.}$$

Estas gráficas pueden verse en el anexo Núm. 6.

*Prueba del colorante.*—Terminadas las pruebas anteriores, el día 13 de septiembre se colocaron 50 gr. de fluoresceína en la parte inferior de la perforación a las 13 horas 34 minutos. Desde antes se tomaron las muestras testigos y después sistemáticamente durante varios

días, hasta terminar la experiencia. Dichas muestras correspondientes a los lugares de muestreo que hemos llamado POZO CANAL Y POZO TUBOS. No se creyó necesario tomar muestras en el pozo sifón porque para esta fecha ya estaba terminado el dentellón interceptor al pie del enrocamiento de la cortina donde se encuentra el pozo de los tubos. Además el agua que pasara por este lugar tendría que pasar por el pozo sifón.

En el pozo canal durante toda la experiencia no hubo presencia de colorante, las muestras tomadas corresponden de la Núm. 77 de las 12 horas 20 minutos del 13 de septiembre, a la Núm. 117 de las 7 horas 40 minutos del día 6 de octubre.

En el pozo sifón sí se tuvieron resultados positivos relativamente pronto, según se explica en seguida:

Las muestras tomadas en este sitio de prueba corresponden de la Núm. 86 de las 12 horas 10 minutos de septiembre 13, a la 132 de las 7 horas 35 minutos del 6 de octubre. Ya desde la muestra Núm. 89 de las 7 horas 31 minutos de septiembre 14 empezó a haber indicios de colorante.

La muestra Núm. 90 de las 12 horas 5 minutos del mismo día 14 fué completamente positiva; y desde esta hora debe contarse el tiempo para calcular las velocidades medias de paso. La presencia de la fluoresceína desde la muestra 90 aumentó hasta la Núm. 93 de las 13 horas 25 minutos del día 15 que es la muestra más positiva. Disminuyó y fué desapareciendo poco a poco, siendo la última muestra positiva la Núm. 117 de las 7 horas 35 minutos del día 24. Todas las muestras subsecuentes hasta la 132 resultaron negativas, lo cual indica que había terminado el paso del colorante.

De lo anterior pueden sacarse las siguientes conclusiones:

Primera.—Tiempo que tardó en llegar el colorante de la celda al sitio de prueba:

$$14 \text{ d} - 12 \text{ h} - 5 \text{ m.}$$

$$\frac{13 \text{ d} - 13 \text{ h} - 30 \text{ m.}}{= 22 \text{ h} \quad 35 \text{ m.}} = 22.584^{\text{h}} = 0.94 \text{ días.}$$

Segunda.—Tiempo que tardó en pasar el colorante:

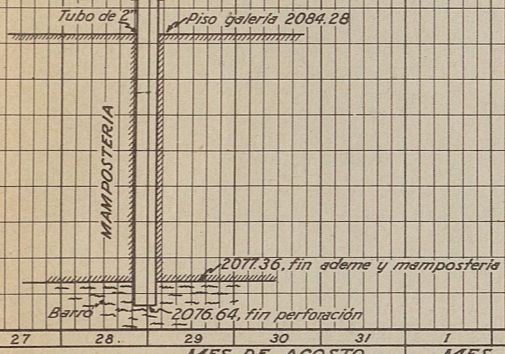
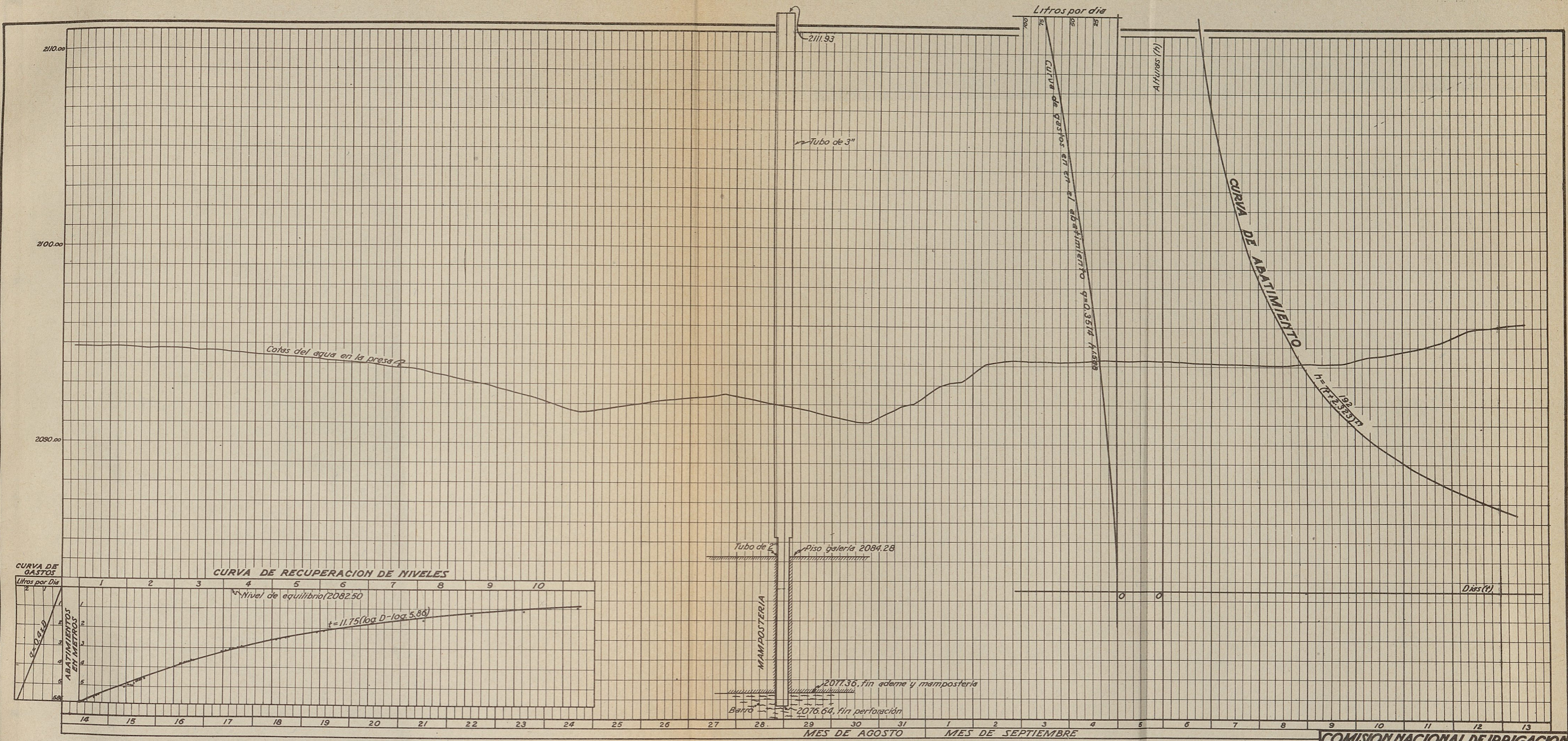
$$24 \text{ d} - 7 \text{ h} - 35 \text{ m.}$$

$$\frac{14 \text{ d} - 12 \text{ h} - 5 \text{ m.}}{9 \text{ d} - 19 \text{ h} - 30 \text{ m.}} = 9.81 \text{ días}$$

Tercera.—Pueden tomarse dos casos extremos para estimar la velocidad de paso. El primero, considerando la distancia total entre la celda 86 y el sitio de prueba y el segundo considerando solamente el recorrido que corresponde al desarrollo del contacto del dentellón con la arcilla. Para este último caso se tomaron como base los datos de la exploración lateral de la celda 75. La

Nº 7.—Haciendo un muestreo de agua en el pozo-Sifón. Puede verse la Bomba auxiliar.

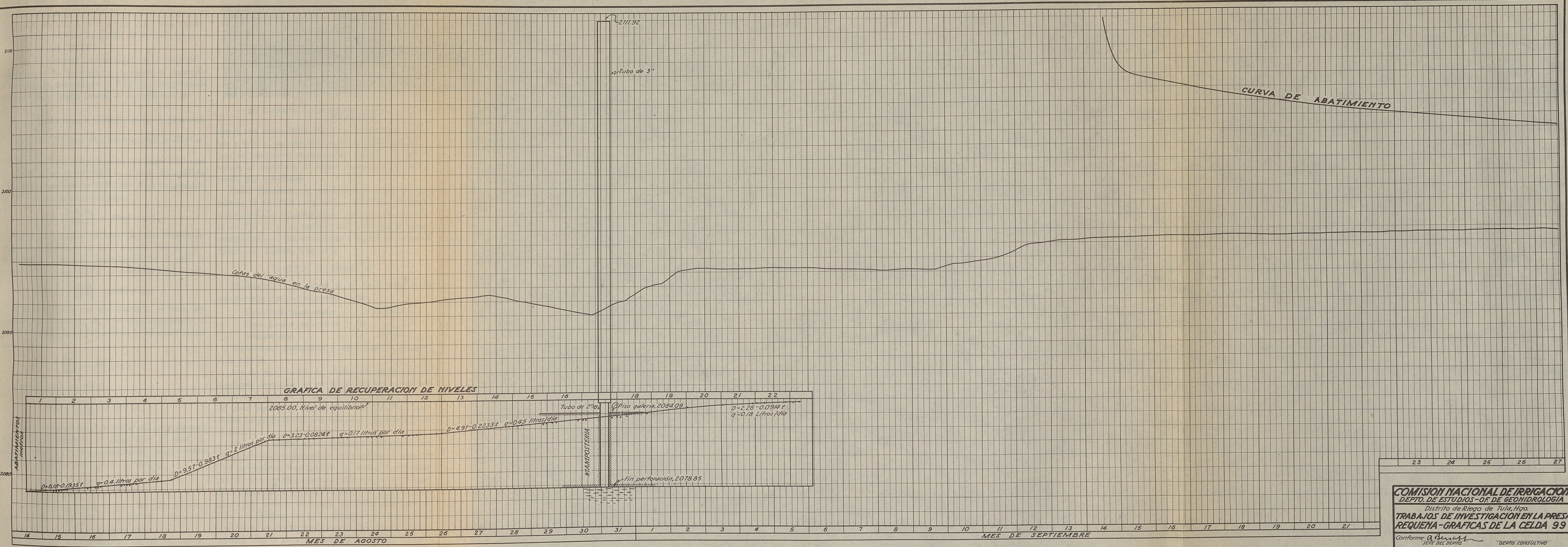




Calculó: *[Signature]*  
 Ing. A. DE LA O.  
 Verificó: *[Signature]*  
 Revisó: *[Signature]*  
 JEFE DE GEOLOGIA

ANEXO N° 6

COMISION NACIONAL DE IRRIGACION  
 DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOHIDROLOGIA  
 Distrito de Riego de Tula Hgo.  
**TRABAJOS DE INVESTIGACION EN LA PRE-  
 SA REQUENA - GRAFICAS DE LA CELDA 86**  
 Conforme: *[Signature]* JEFE DEL DEPTO. DEPTO. CONSULTIVO  
 Aprobó: *[Signature]* VOCAL EJECUTIVO  
 CONTROL TEC. Y ADM. MEXICO, D.F. AGOSTO, 1935  
 S-3-C-574



**COMISION NACIONAL DE IRRIGACION**  
 DEPTO. DE ESTUDIOS-OF. DE GEOHIDROLOGIA  
 Distrito de Riego de Tula, Hgo.  
**TRABAJOS DE INVESTIGACION EN LA PRESA**  
**REQUENA - GRAFICAS DE LA CELDA 99**

Conforme: *A. Benavente* JEFE DEL DEPTO. DEPTO. CONSULTIVO  
 CONTROL TEC. Y ADM. MEXICO, D.F. AGOSTO, 1939  
 Aprobó: *A. Benavente* VOCAL EJECUTIVO

ANEXO Nº 7

Calculó: *A. Benavente* Calculó: *A. Benavente*  
 ING. A. DELAHO A. TREJO S.  
 Verificó: *A. Benavente* Revisó: *A. Benavente*  
 JEFE DE GEOHIDROLOGIA

S-3-C-575

profundidad del dentellón en la arcilla aguas abajo es de 2 m. y el espesor de la mampostería desde el eje del muro celular hasta la cara de aguas abajo de 0.75 m., de modo que el desarrollo del contacto sería 2.75 m. Por otra parte, si la cota del fondo de la mampostería en la 86 es 2077.36, la de la arcilla aguas abajo probablemente será 2079.36. La arcilla en el pozo-tubos comienza a la cota 2076.07.

Como la distancia horizontal entre la celda 86 y dicho pozo es 51 m. teniendo en cuenta el desarrollo del contacto ya mencionado de 2.75 m. y despreciando el desnivel entre ambos puntos, el recorrido será de ... 53.75 m.

Para el primer caso, la velocidad media de paso será:

$$\frac{53.75}{0.94} = 57.2 \text{ m. p. día, con una carga de } 28.93 \text{ m.,}$$

diferencia de cotas entre el nivel constante del agua en el tubo de carga (2111.43) y el nivel de equilibrio del agua en la perforación (2082.50). Para un gradiente de 100% o uno, la velocidad sería:

$$57.2 \times \frac{53.75}{28.93} = 106.4 \text{ m.p.d.}$$

Para la carga normal probable que tuvo durante las experiencias: diferencia de nivel entre la cota de equilibrio 2082.50 y la zona impermeable en el sitio de prueba 2076.07 o sea 6.43 m. la velocidad normal será:

$$106.4 \times \frac{6.43}{53.75} = 12.7 \text{ m.p.d.}$$

Si se toma el caso extremo contrario, es decir, que prácticamente el tiempo de 0.94 días corresponde al paso por el desarrollo del dentellón, la velocidad media será:

$$\frac{2.75}{0.94} = 2.93 \text{ m.p.d.}$$

Y con el gradiente 100%.

$$2.93 \times \frac{2.75}{28.93} = 0.28 \text{ m.p.d.}$$

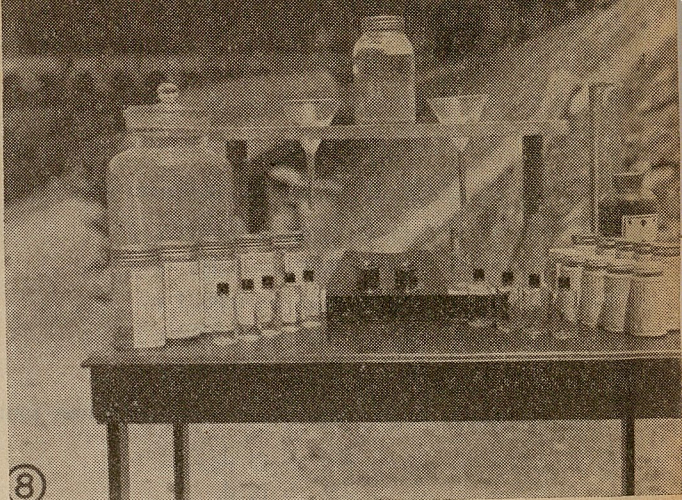
Y para la carga normal probable que tuvo durante la experiencia, diferencia de cotas entre el nivel de equilibrio 2082.50 y la cota probable del terreno frente a la celda 2079.36, o sean 3.14 m. se tendrá:

$$0.28 \times \frac{3.14}{2.57} = 0.32 \text{ m.p.d.}$$

Durante las experiencias el agua del vaso se mantuvo entre los niveles 2096.11 y 2097.42 o sea entre 15.32 y 14.01 m. abajo del nivel de carga.

Los resultados tan diferentes en los dos casos extremos considerados, aconseja que debe tenerse sumo cuidado al deducir conclusiones de ellos.

Las experiencias hechas por el Laboratorio de Tietras del Departamento de Proyectos, de muestras inalteradas de la arcilla de diferentes zonas de la formación



Nº 8.—Parte del equipo utilizado en las pruebas de Fluoresceína.

donde está construída la presa oscilan entre 1.00 m. por año y 0.01 m. por año, por lo que las velocidades extremas de paso antes calculadas se explican por escurrimiento en superficies de menor resistencia y no propiamente por percolación.

Como velocidades de percolación, en materiales granulares, la de 106.4 m. p. d. con 100% de pendiente, corresponderá a arenas gruesas y gravillas; mientras que la de 0.28 m. p. d. también con 100% de pendiente corresponde a arcillas, arenas finas o lógamo (ver Ground Water, de Tolman, Pág. 100).

#### CELDA NUMERO 99

*Perforación.*—Con ademe de 2" hasta terminar la mampostería con las siguientes cotas:

Cota fondo muro celular . . . . .	2084.09
Cota fondo perforación y fin mampostería . . . . .	2078.85

Profundidad perforación y espesor de la mampostería 5.24 m.

*Ley de recuperación de niveles.*—Se observaron las siguientes anomalías: en vez de ser una curva continua fué una sucesión de rectas iniciándose primero con una de poca pendiente, después un tramo de fuerte pendiente, luego disminuyó ésta, volviendo a aumentar hasta el final.

No es de creerse que la aportación subterránea hubiese aumentado y disminuído sucesivamente, y sería difícil correlacionar estos cambios con los niveles en el vaso que durante las observaciones estuvieron sobre el espejo del agua en la perforación entre 7.30 y 16 m. más altos. Más bien es de creerse que dicho fenómeno se debe a huecos, tal vez en la mampostería, comunicados con la perforación (no en la zona cementada del tubo de ademe). Así la poca pendiente de las líneas de recuperación, o sea mayor tiempo en el ascenso, se debería a que los huecos estarían llenándose, luego el agua alcanzaba zonas más compactas, es decir, menor volumen por llenar y el ascenso era más rápido manifestándose así en la recta de recuperación.

Las ecuaciones de estas rectas sucesivas son:

$$D = 6.18 - 0.1935 t$$

$$D = 9.57 - 0.983 t$$

$$D = 3.23 - 0.0824 t$$

$$D = 4.91 - 0.2223 t$$

$$D = 2.26 - 0.0914 t$$

Los gastos medios constantes correspondientes son:

$$0.4 \text{ l. p. d.}$$

$$2.0 \text{ l. p. d.}$$

$$0.17 \text{ l. p. d.}$$

$$0.45 \text{ l. p. d.}$$

$$0.18 \text{ l. p. d.}$$

### CELDA NUMERO 109

*Perforación.*—Ademe de tubo de 2", con las siguientes cotas :

Cota piso galería.....	2089.36
Cota fin mampostería y ademe...	2087.66
Cota fin perforación.....	2087.42
Espesor dentellón.....	1.70 m.
Profundidad perforación.....	1.94 m.

*Ley de recuperación de niveles.*—A pesar de que los niveles del agua en la presa sobre el fondo de la perforación oscilaron durante las observaciones entre 4.20 y 7.30 m., el nivel apenas ascendió 0.11 m. no habiendo obstrucción en la perforación, en 10.7 días o sea desde las 14 horas 30 minutos del día 14 hasta las 8 horas del día 25 de agosto. De lo anterior se deduce que no hay movimiento notable de aguas subterráneas, lo que puede deberse a la impermeabilidad de esta zona del cimiento.

*Ley de abatimiento.*—Concordando con las observaciones anteriores, a pesar de la carga de 24.37 m. dada con la tubería de 3", el abatimiento fué apenas de 1.95 m. desde las 17 horas 15 minutos del 25 de agosto hasta las 6 horas del 13 de septiembre o sea una rapidez de descenso de:

$$\frac{1.95}{18.53} = 0.105 \text{ m.p.d.}$$

### RESUMEN Y COMPARACIONES

Para dar una idea de conjunto del resultado de las investigaciones hechas, se hizo el cuadro resumen adjunto que nos servirá para hacer comparaciones finales, las cuales consisten en calcular los gastos, velocidades de descenso, etc. de las diferentes perforaciones, considerando que hubiesen trabajado en circunstancias semejantes, cuando menos con las mismas cargas tanto en la recuperación como en el abatimiento.

En esta forma las cifras calculadas nos permiten establecer diferencias de permeabilidades y también del movimiento de las aguas subterráneas. Como las perforaciones en las celdas 31, 36 y 43 no están además y en cambio las correspondientes a las 59, 86, 99 y 109 sí lo están, podrían calcularse las perforaciones de gastos equivalentes en uno u otro caso, pero se prefirió hacer esta comparación en las condiciones en que realmente están. Es de advertirse asimismo, que los valores relativos que se encuentren para ciertas cargas no permanecerán constantes para otras en el caso de los abatimientos; tratándose de la recuperación, estas relaciones serán constantes para las curvas de gastos que corresponden a ecuaciones de estructura semejante.

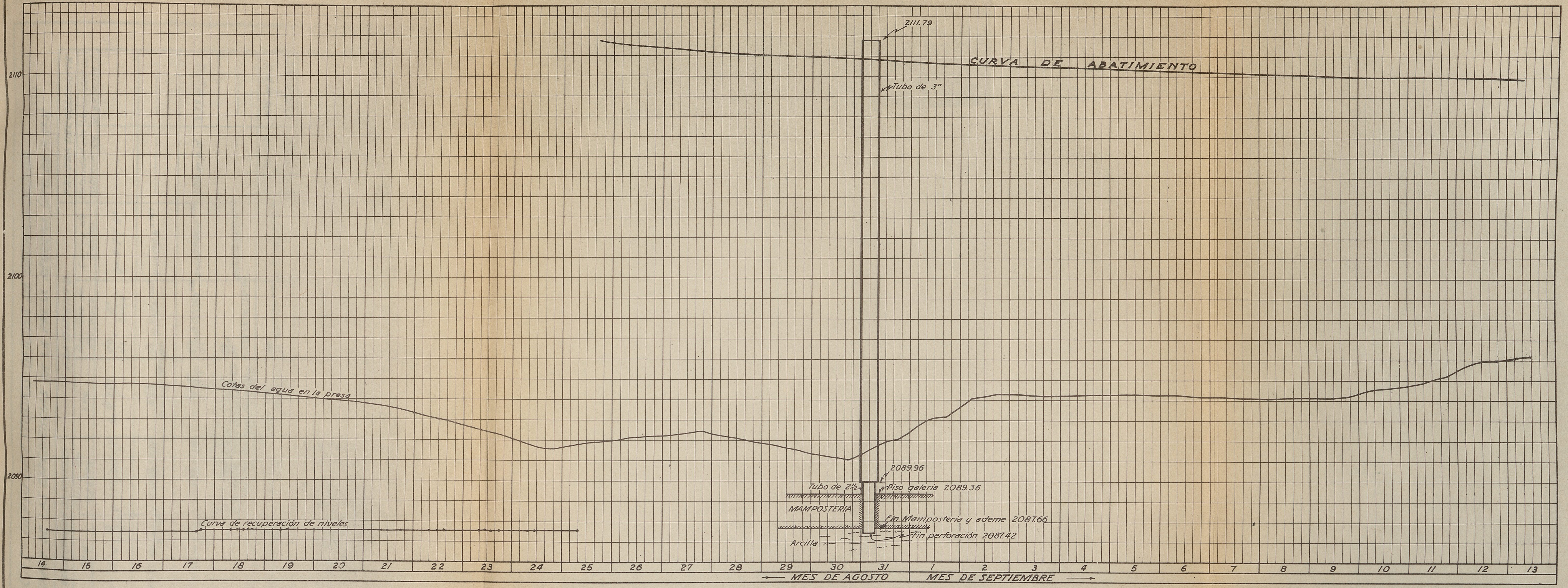
### CUADRO DE COMPARACION SOBRE EL COMPORTAMIENTO RELATIVO DE LAS DIVERSAS PERFORACIONES ESTUDIADAS DE LA PRESA REQUENA

(D — 3.17 h = 22.50, Constantes)

CELDAS	RECUPERACION		ABATIMIENTO		
	Gasto momentáneo l. p. día	Valores relativos	Rapidez de descenso m. p. día	Gasto momentáneo l. p. día	Valores relativos en gasto y rapidez
31.	$2.56 \times 3.17^2 = 25.9$	7.2	531.0	241.0	47.4
36	$0.344 \times 3.17^2 = 3.46$	0.96	56.8	259.8	5.1
43	3.6	1.00	11.2	51	1.0
59	1.16 (constante)	0.32	6.0	27.4	0.54
86	$0.4 \times 3.17 = 1.27$	0.35	10.8	49.3	0.96
99	0.18 a 2 (constantes)	0.05 a 0.56	11.45 a 0.55	52 a 2.5	1.02 a 0.05
109	0	0	0.11	0.50	0.009

Convencionalmente tomaremos la celda 43 como unidad de comparación, considerando siempre en la recuperación una carga máxima de  $D=3.17$  m., que corresponde a la que tuvo esta celda cuando la perfo-

ración estuvo vacía. En este caso la estimación del gasto se hará prolongando la curva respectiva cuando la cantidad de 3.17 m. resulte mayor que la carga máxima con la que realmente trabajó la perforación. Esta pro-



Observado y calculado: *[Signature]* Calcd: *[Signature]*  
 Verificado: *[Signature]* Revisó: *[Signature]*  
 JEFE DE GEOLOGIA

ANEXO N° 8

**COMISION NACIONAL DE IRRIGACION**  
 DEPTO. DE ESTUDIOS - OF. DE GEOHIDROLOGIA  
 Distrito de Riego de Tula Hgo.  
**TRABAJOS DE INVESTIGACION EN LA PRESA REQUENA - GRAFICAS DE LA CELDA 109**

Conforme *[Signature]* DEPTO. CONSULTIVO  
 JEFE DEL DEPTO.

Aprobó: *[Signature]*  
 CONTROL TEC. Y ADM. VOCAL EJECUTIVO.

MEXICO, D.F. AGOSTO, 1939

S-3-C-573

**C.N.I. - DEPTO DE ESTUDIOS-OFICINA DE GEOHIDROLOGIA**  
**RESUMEN DE LAS EXPERIENCIAS EN LA PRESA REQUENA (D.T.O. DE R. N.º 3)**

CELDAS	RECUPERACION DE NIVELES		ABATIMIENTO			PRUEBA DEL COLORANTE	
	Ley	Curva de Gastos	Ley	Rapidez de descenso	Curva de Gastos	Velocidad sin sobrecarga	Velocidad con gradiente l
31	$t = 1.13 \log \frac{D}{3.62-D}$	$q = 2.56(3.62-D)D$	$h = \frac{0.954}{t}$	$\frac{dh}{dt} = \frac{h^2}{0.954}$	$q = 4.77 h^2$	—	—
36	$t = 3.31 \log \frac{D}{9.22-D}$	$q = 0.345(9.22-D)D$	$h = \frac{9.55}{(t+0.3)^{1.304}}$	$\frac{dh}{dt} = 0.232 h^{1.767}$	$q = 1.06 h^{1.767}$	—	—
43	$t = 4.62 \log \frac{D}{9.22-D}$	$q = 0.358(6.34-D)D$	$h = \frac{42.8}{t^{0.976}}$	$\frac{dh}{dt} = 0.0208 h^{2.02}$	$q = 0.0946 h^{2.02}$	100 m.p.d.	3.33 m.p.d.
59	—	Gasto medio en la recuperación, 116 Litros por día	$h = \frac{23.397}{(t+1.458)^{0.3037}}$ <i>t no menor de q</i>	$\frac{dh}{dt} = 0.000009423 h^{4.293}$	$q = 0.0000429 h^{4.293}$	—	—
86	$t = 11.75 \log \frac{D}{5.86}$	$q = 0.4 \times D$	$h = \frac{192}{(t+2.323)^{1.7}}$	$\frac{dh}{dt} = 0.077 h^{1.588}$	$q = 0.3514 h^{1.588}$	12.7 m.p.d. ó 0.32 m.p.d.	106 m.p.d. ó 0.28 m.p.d.
99	—	Gastos medios D = 6.18 - 0.1935 t 0.4 litros por día D = 9.57 - 0.9830 t 2.0 litros por día D = 3.23 - 0.0824 t 0.17 litros por día D = 4.91 - 0.2233 t 0.45 litros por día D = 2.257 - 0.0914 t 0.18 litros por día	—	De 11.45 m.p.d. ó 0.55 m.p.d.	—	—	—
109	—	—	—	0.105 m.p.d.	0.477 l.p.d.	—	—

Notación: t, en días, D en metros, q, en litros por día, h, en metros,  $\frac{dh}{dt}$  en metros por día.

longación se consigue haciendo un cambio de ejes con lo que la ecuación de gastos toma la forma siguiente en caso de ser parábola:  $q=K D^2$ .

El cuadro comparativo nos indica que la perforación de la celda 31, da 7.2 veces más gasto en la recuperación que la 43; la 36, un gasto ligeramente menor. La 59 y 99 gastos menores (aproximadamente); la 86 el 35% de la 43, mientras que en la 109 puede considerarse el gasto como nulo.

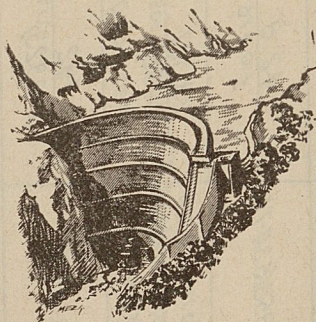
En el abatimiento tanto en gastos como en rapidez de descenso, la celda 31 absorbería 47.4 veces más agua que la 43; la 36, 5.1 veces más; la 59 la mitad, la 86 prácticamente la misma cantidad, disminuyendo después notablemente. Por último, la 109 prácticamente no absorbería agua.

No hay que olvidar que las últimas cuatro celdas están ademadas hasta la parte inferior; realmente los fenómenos observados en ellas probablemente serían de mayor intensidad tal vez como en la 36, si no existiera dicho ademe.

Recordaremos también que la velocidad normal de paso del colorante en la celda 43 es de 1 metro por día, mientras que en la 86 tomando los casos extremos, 12.7 ó 0.32 metros por día.

Por último, en vista de los resultados de las pruebas A y B en las celdas 59, 99 y 109, no se consideró necesario hacer la del colorante.

Se da un plano con una gráfica que indica la permeabilidad relativa en las diferentes zonas de la cortina donde fueron hechas las experiencias.



# GRAFICAS DE PERMEABILIDADES RELATIVAS

ING. ALONSO DE LA O

