



121
20j

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

**FLUJO EN MEDIOS POROSOS: VERIFICACION
EXPERIMENTAL DE ALGUNOS METODOS DE
CALCULO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
JUAN CARLOS PEÑA DELGADO

Director de Tesis: Ariel Friedmann Freundlich

México, D. F.

1987



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

CAPITULO I. INTRODUCCION	8.
CAPITULO II. ANTECEDENTES TEORICOS	12.
CAPITULO III. EXPERIMENTOS REALIZADOS	16.
III.1 Calibración de los coeficientes de Permeabilidad y Almacenamiento.	17.
III.1.1 Coeficiente de Permeabilidad.	17.
III.1.2 Coeficiente de Almacenamiento.	20.
III.2 Calibración de los Parámetros Propios del Método.	22.
III.2.1 Calibración del Parámetro Teta.	22.
III.2.2 Calibración del Incremento de Tiempo.	23.
III.3 Pruebas de Convergencia.	23.
III.4 Experimentos Realizados.	23.
III.4.1 Parábola Doble.	23.
III.4.2 Parábola por Subida.	24.
III.4.3 Configuración por Lluvia.	24.
III.4.4 Bajada al Cese de Lluvia.	24.
III.4.5 Bajada por Parábola Simple.	24.
III.5 Algunas Recomendaciones para la Medición.	25.
CAPITULO IV. COMPARACION CON CALCULOS NUMERICOS	35.
CAPITULO V. CONCLUSIONES	54.
BIBLIOGRAFIA	57.

CAPITULO I. INTRODUCCION

I. INTRODUCCION

El campo de estudio e influencia de la ingeniería es inmenso. Recorriendo tan solo una parte del mismo encontramos una gran cantidad de trechos, andurriales y vericuetos inexplorados; muchos de ellos engañosos, incluso lo suficientemente oscuros como para perder en sus profundidades a verdaderas genialidades. Pretender esclarecer en su totalidad y, a la luz de un razonamiento matemático, los misterios que se encierran en el laberinto de la naturaleza para llegar a un modelo o, a una fórmula, que nos represente su comportamiento de manera exacta; no es tarea de Titanes, ni de alquimistas, ni es un acto milagroso, ni el fruto de la meditación profunda de rigurosas sectas esotéricas orientales; es simplemente inútil. El comportamiento exacto de la naturaleza es inextricable; empeñarse en lo contrario es de necios.

Decir que de las divagaciones anteriores surge el por qué del ingeniero es una falsedad. A pesar de ello, no todo está perdido. Pretender representar el comportamiento aproximado de la naturaleza, para así tener una referencia que sea fácil de comprender por las limitaciones intelectuales del hombre, sí es la tarea del ingeniero, o al menos debía serlo; a pesar de que exista cierto grado de necedad en este intento y un enorme grado de ineptitud en muchos ingenieros.

Ahora bien, que sería preferible, permanecer anquilosados y sujetos a la fuerza de "la inercia de la inmovilidad" como muchos individuos faltos de caletre* o; intentar la heroica tarea de lograr un ligero avance en nuestro conocimiento, aunque éste sea tan solo una nimiedad.

Antes de que esto siga avanzando, debemos establecer que

* Hay que reconocer que a menudo nos mantenemos en la inmovilidad total, aunque esto no implique que carezcamos de talento.

esto es una tesis. Hacer una tesis o cualquiera otro trabajo de ingeniería; e incluso, trabajos fuera de este ámbito; se puede considerar como una muta; es decir, como el proceso de muta del tedio a la fascinación y viceversa, llegando frecuentemente a completar el mito del eterno retorno. La realización de la presente tesis no se escapó de completar la mítica circunferencia.

A estas alturas sentimos la seguridad suficiente para afirmar, que todos los proemios anteriores, nos sirven como una especie de disculpa psicológica, por la realización de una tesis de carácter puramente de investigación.

Llegado el inevitable momento de hablar técnicamente, hemos de decir que la parte de la ingeniería que nos interesa mencionar es la geohidrología; que es una sección importantísima y poco estudiada dentro del ámbito de la ingeniería. Una parte importante de la geohidrología, es el estudio del comportamiento del flujo de agua no permanente en el subsuelo, que es el tema que ahora nos interesa. El por qué es difícil de determinar; quizás la motivación sea el deseo de intentar hacer lo que, al menos, creemos que nadie ha intentado hacer.

Hablar del flujo de agua no permanente, es referirnos al comportamiento del nivel freático, cambiando con respecto al tiempo. Las pretensiones de este trabajo se limitan a determinar el grado de confiabilidad de un método numérico implícito de diferencias finitas.

El capítulo II, expone de forma sencilla la fórmula que nos representa este fenómeno y su desarrollo hasta llegar a la ecuación del método numérico.

El capítulo III habla, primeramente sobre las pruebas que fue necesario efectuar para la obtención y calibración de los parámetros requeridos. Después habla sobre los experimentos realizados en sí mismos. También contiene algunas recomendaciones para quien desee repetir dichos

experimentos.

El capítulo IV contiene la comparación entre los resultados del método y las mediciones, tanto gráficamente como en tablas, así como una pequeña explicación de las condiciones de frontera.

Por último, el capítulo V expone las conclusiones.

Las tablas y gráficas correspondientes a cada capítulo vienen al final de cada uno.

Es importante hacer notar que las mediciones necesarias se realizaron con la ayuda de una compleja red de videos; siendo precisamente en esto donde estriba parte de la complejidad de esta investigación, pues se requiere de poder medir quince piezómetros simultáneamente, lo cual, sin la ayuda de la tecnología del video, es prácticamente imposible.

Agradezco a todas las personas que laboran en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería por sus servicios y atenciones, sin los cuales, hubiese sido imposible la realización de esta tesis.

CAPITULO II. ANTECEDENTES
TEORICOS

II. ANTECEDENTES TEORICOS

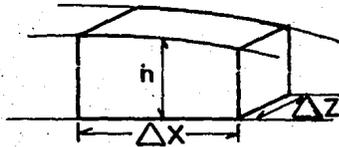
El problema a tratar consiste en el flujo de agua en medios porosos; donde pretendemos determinar cómo se comporta el nivel freático, para ciertas condiciones de flujo, sujetas a condiciones especiales de frontera.

La teoría que nos interesa se basa en la Ley de Darcy, que dice:

"La velocidad con que circula un fluido a través de un medio poroso es directamente proporcional a la pérdida de carga hidráulica e inversamente proporcional a la longitud recorrida".

$$V = K \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (1)$$

Supongamos el siguiente volumen elemental:



Según la ecuación de continuidad tenemos:

$$\Delta Q + \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0 \quad (2)$$

ΔQ es el cambio del gasto en la dirección del eje X.

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ es el cambio de volumen en el tiempo.

El cambio de volumen en el tiempo lo definimos de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = S \frac{\partial h}{\partial t} \Delta X \Delta Z \quad (3)$$

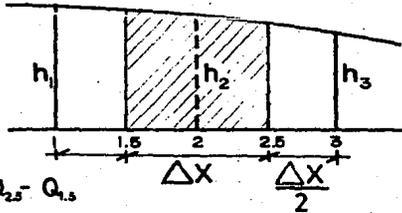
S es el porcentaje de agua liberada por volumen de material.

Además sabemos que puntualmente

$$Q = VA = K \frac{\Delta h}{\Delta L} A \quad (4)$$

Para la solución de la ecuación (2) utilizaremos un método numérico de incrementos finitos que a continuación desarrollaremos en una forma sencilla.

Consideremos el siguiente esquema de diferencias finitas y el volumen de control de la zona sombreada.



$$\text{Si } \Delta Q = Q_{2.5} - Q_{1.5}$$

Reemplazando $Q = VA = K \frac{\Delta h}{\Delta L} A$ se tiene:

$$\Delta Q = K \frac{\Delta h}{\Delta L} A_{2.5} - K \frac{\Delta h}{\Delta L} A_{1.5} \quad (5)$$

$$A = \bar{h} \Delta Z \quad \bar{h} = h_{\text{media}}$$

En este caso $\Delta L = \Delta X$, sacando como factor común $K \frac{\Delta Z}{\Delta X}$

$$\Delta Q = K \frac{\Delta Z}{\Delta X} \left[(h_3 - h_2) \frac{h_2 + h_3}{2} - (h_2 - h_1) \frac{h_1 + h_2}{2} \right] \quad (6)$$

El otro lado de la ecuación es el cambio de volumen en el tiempo $\frac{\Delta V}{\Delta t}$; al reemplazar $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\Delta h}{\Delta t}$ queda como:

$$- S \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta X \Delta Z \quad (7)$$

Si dividimos ambos miembros de la ecuación entre ΔZ , nos queda:

$$\frac{K}{\Delta X} \left[(h_3 - h_2) \frac{h_2 + h_3}{2} - (h_2 - h_1) \frac{h_1 + h_2}{2} \right] = -S \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta X \quad (8)$$

$$(h_3 - h_2)(h_2 + h_3) - (h_2 - h_1)(h_1 + h_2) = -\frac{2S(\Delta X)^2}{K} \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{(h'_2 - h_2)}{\Delta t} \quad (10)$$

donde h'_2 es la altura piezométrica del punto 2 en el futuro.

Como vamos a utilizar un método implícito, entonces sustituiremos las alturas piezométricas en los términos de la variación de h con respecto a X por un promedio pesado del valor futuro con el valor presente; esto es en el término del gradiente. θ es el valor de peso de los valores futuros.

$$[\theta h'_2 + (1-\theta)h_3 - \theta h'_2 - (1-\theta)h_2](h_2 + h_3) -$$

$$[\theta h'_2 + (1-\theta)h_2 - \theta h'_1 - (1-\theta)h_1](h_2 + h_1) = -\frac{2S(\Delta X)^2}{K} \frac{(h'_2 - h_2)}{\Delta t}$$

y esta es la ecuación que resolveremos mediante el método numérico implícito.

Al aplicar esta ecuación a todos los puntos intermedios en que se divide la línea de saturación, llegamos a un sistema de ecuaciones simultáneas lineales, donde las incógnitas son las h' o alturas piezométricas futuras en dichos puntos.

Además de lo anterior, es necesaria una condición inicial en todos los puntos y dos condiciones de frontera (ver capítulo IV).

CAPITULO III. EXPERIMENTOS
REALIZADOS

III. EXPERIMENTOS REALIZADOS

III.1 Calibración de los coeficientes de Permeabilidad y Almacenamiento.

Para iniciar el estudio, procedimos a la obtención de los coeficientes de Permeabilidad y Almacenamiento, por ser parámetros indispensables para los problemas de flujo.

III.1.1 Coeficiente de Permeabilidad.

Para el cálculo de la permeabilidad se experimentó con la Parábola de Dupuit en régimen establecido; también se experimentó con la Prueba de Pozo y por último con un Permeámetro de carga constante. Los resultados obtenidos se promediaron y dieron un cálculo final de K, sin embargo el valor empleado se ajustó mediante una prueba de flujo permanente.

Los cálculos fueron los siguientes:

Para la Parábola de Dupuit (con carga constante), se utilizó la fórmula siguiente

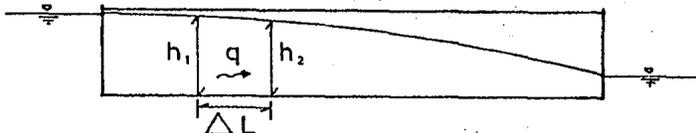
$$h^2 = \frac{h_2^2 - h_1^2}{L} x + h_1^2 \quad (11)$$

y el gasto por unidad de ancho es:

$$q = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2\Delta L} \quad (12)$$

despejando la permeabilidad

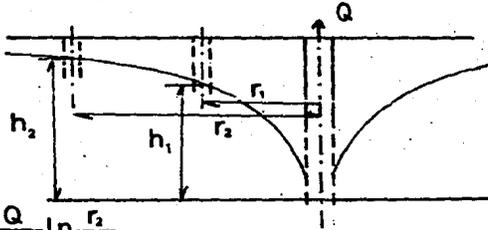
$$K = \frac{2q\Delta L}{h_1 - h_2} \quad (13)$$



En estas pruebas se calculó el valor de K para cada sección entre piezómetros, después se promediaron los valores. Se hicieron tres pruebas de parábola, variando los valores entre 0.18 y 0.27; la permeabilidad promedio resultó:

$$K_{\text{PARABOLA}} = 0.20 \text{ cm/s}$$

Para el pozo se empleó la fórmula de Thiem para acuíferos libres:



$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (14)$$

donde h_1 altura piezométrica en el pozo de observación 1
 h_2 altura piezométrica en el pozo de observación 2
 r_1 radio del pozo experimental al pozo de observación 1
 r_2 radio del pozo experimental al pozo de observación 2

despejando K tenemos que

$$K = \frac{Q}{\pi (h_2^2 - h_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (15)$$

los valores estuvieron entre 0.15 y 0.25, con promedio de

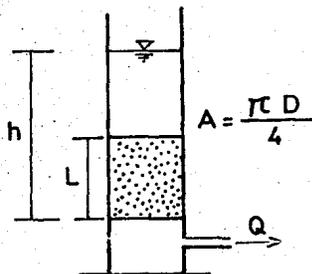
$$K_{\text{POZO}} = 0.18 \text{ cm/s}$$

En el caso del Permeámetro de carga constante tenemos lo siguiente:

$$Q = K \frac{h}{L} A \quad (16)$$

entonces.

$$K = \frac{Q L}{h A} \quad (17)$$



y el valor de la permeabilidad varió entre 0.11 y 0.17, con promedio:

$$K_{\text{PERMEABIL.}} = 0.16 \text{ cm/s}$$

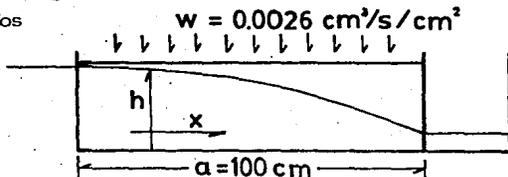
promediando todos estos valores tenemos que:

$$K = 0.18 \text{ cm/s}$$

Después se experimentó con una parábola formada por lluvia que se llevó a la estabilización del régimen. La ecuación de este fenómeno es la siguiente:

$$h = \frac{W}{2Kb} (a^2 - x^2) \quad (18)$$

Un diagrama de este fenómeno sería como el que a continuación presentamos



y definimos las literales como:

b = ancho medio del acuífero.

a = longitud total del acuífero.

w = gasto de lluvia por unidad de área.
al despejar y calcular K nos dio:

$$K = 0.31 \text{ cm/s}$$

Al observar tanta variación para los valores de K decidimos introducir los datos de este problema en nuestro programa, en la prueba de lluvia; donde experimentamos distintos valores de K hasta encontrar aquel que nos diera valores de h similares a los medidos; dicho valor fué:

$$K = 0.28 \text{ cm/s}$$

que corresponde al valor de la permeabilidad empleado en el resto de los cálculos (vease tablas 1 y 2; y gráfica 1).

III.1.2 Coeficiente de Almacenamiento.

El coeficiente de almacenamiento se obtuvo al saturar una muestra del medio poroso en el permeámetro de carga constante, y medir el volumen de agua que se desaguaba; este volumen se divide entre el volumen de la muestra saturada y nos determinó el valor del coeficiente de almacenamiento:

$$S = 0.2$$

Para corroborar el valor anterior, realizamos una prueba de bombeo, de la cual obtuvimos las gráficas 2 y 3 mostradas. Estas gráficas se determinan empleando la teoría de Theis con las siguientes fórmulas:

$$a = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{ecuación de Theis} \quad (19)$$

$$W(u) = -0.577 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots \quad \text{función de pozo}$$

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} = \text{argumento de la } W(u) \quad (20)$$

$$T = \text{Transmisibilidad} = K b$$

Al superponer las gráficas 2 y 3 determinamos que

$$W(u) = 1.21 \quad 1/u = 5 \quad u = 0.2 / \text{cm}$$

$$a = 1.02 \text{ cm} \quad t = 1.86 \text{ s}$$

y el gasto

$$Q = 13.66 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

de la ecuación (19) obtenemos

$$T = 1.29 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

y de (20) encontramos el valor del coeficiente de almacenamiento

$$S = 0.19$$

Ahora bien; utilizando este valor de S en el método implícito; los resultados daban un error considerable, por lo que procedimos a ajustarlo por medio de tanteos, sin embargo, dicho ajuste nos condujo a un valor muy distinto al anterior. El valor ajustado del coeficiente de almacenamiento fué:

$$S = 0.021$$

que corresponde practicamente al 10% del otro valor, pero es la única manera de que el método nos de resultados aceptables (ver gráfica 4).

III.2 Calibración de los Parámetros Propios del Método.

III.2.1 Calibración del Parámetro Teta.

Después de obtenidos los parámetros de K y S, buscamos el valor de θ óptimo, ya en el método.

El valor de θ , que ya habíamos mencionado en el capítulo anterior, sirve para dar un determinado peso al valor futuro o al valor presente, en el método implícito. Si a θ le damos como valor 0, es decir que se nulifica la influencia de los valores futuros, entonces caemos en el caso explícito; dicho caso ya fue estudiado por Ruiz Urbano. Al comparar el método explícito con el implícito, vemos que el explícito está muy limitado por la condición:

$$\frac{2K\bar{h}\Delta t}{S(\Delta x)} \leq 0.5 \quad (21)$$

condición que, para el caso implícito, no es necesaria. La condición anterior nos lleva a limitar el valor de Δt , en el caso explícito, a valores menores a 1 segundo o, a aumentar el valor de S a valores que nos dan como resultados unas cargas muy superiores a las medidas; no obstante, si empleamos los mismos valores de θ y Δt para ambos casos, siempre y cuando cumplamos con las restricciones del explícito, tenemos resultados similares, con ligera tendencia del implícito a parecerse más a la configuración experimental. El caso implícito es mucho menos exigente en sus limitantes, por lo que nos permite llegar a valores muy parecidos a los medidos.

El caso implícito se da para valores de θ diferentes de cero; en este trabajo se experimentó con $\theta = 0.5$ y $\theta = 1$. Con 0.5 da resultados que, en los primeros segundos, bajan más lento que los medidos y, en los segundos finales, lo hacen más rápido. Si utilizamos el valor de $\theta = 1$, es decir, dando al futuro todo el peso, se logrará la configuración más apegada a la realidad, aunque la diferencia es mínima. Se presenta la gráfica de comparación entre los valores para $\theta = 0.5$, $\theta = 1$ y los valores medidos (vease gráfica 5).

III.2.2 Calibración del Incremento del Tiempo.

Otro factor que afecta en los resultados del método, es el incremento del tiempo Δt .

En las pruebas anteriores, para $S=0.021$ y $\phi =1$, se experimentó con un valor arbitrario de $\Delta t =15$ segundos; posteriormente estudiamos el efecto debido al incremento de tiempo. Se hicieron pruebas con los valores de 5, 15, 30 y 45 segundos; luego se compararon resultados (esto se hizo para la bajada simple). Al ver que el efecto debido al incremento de tiempo era mínimo (ver tablas 6, 7 y 8); con una ligera tendencia a bajar más rápido para los Δt de 5 y 15 segundos; entonces, por comodidad y rapidez de cálculo, decidimos continuar el trabajo con $\Delta t =15$ segundos. Para valores del incremento de tiempo mayores a 30 segundos y bajadas o cambios bruscos, el método fallaba en el primer intervalo, aunque en los siguientes daba resultados razonables.

III.3 Pruebas de Convergencia.

Para comprobar la convergencia del método, se corrió el programa en dos fases: La primera fue llevando el caso de la lluvia hasta la estabilización de la parábola (ver tablas 2 y 3); y la segunda fue haciendo que el caso de la doble parábola llegara al plano (ver tablas 4 y 5). Al mismo tiempo verificamos que ambos casos convergen a una sola condición independientemente del valor de S .

III.4 Experimentos Realizados.

Los experimentos que se estudiaron en la presente investigación fueron: Parábola doble, Parábola por subida, Configuración por lluvia, Bajada al cese de la lluvia y Bajada simple.

III.4.1 Parábola Doble.

Consiste en la saturación de un medio poroso a una altura conocida,

Una vez que todos los piezómetros tienen la misma carga, en estado de reposo estable, se procede a bajar bruscamente la carga piezométrica en los extremos; con ello la configuración del perfil del agua en el medio poroso se comporta como una parábola, con vértice al centro y caídas a los lados.

III.4.2 Parábola por Subida.

Ahora se parte de un nivel piezométrico bajo, también en reposo estable, y se va elevando dicho nivel en uno de los extremos del modelo, con lo que se logra la configuración de una parábola con concavidad hacia arriba.

III.4.3 Configuración por Lluvia.

En esta prueba se parte igual que en la anterior de carga piezométrica pequeña, también estable; se dejan los drenes de los extremos vertiendo para mantener en los mismos el nivel inicial, y se permite la entrada de un gasto constante uniformemente distribuido en el área de la superficie del modelo a manera de lluvia. De esta forma se logrará la configuración de una parábola simétrica. El gasto que se empleó por lluvia fue $W = 0.0057$ cm/s.

III.4.4 Bajada al Cese de Lluvia.

Una vez que la prueba anterior llega a condiciones de estabilidad, se corta la entrada del gasto por lluvia, con lo que la parábola anteriormente formada empezará a drenar por los extremos; y esta es la configuración que toma el nivel piezométrico en esta prueba.

Para la solución numérica de los tres primeros experimentos se utilizó el programa uno.

III.4.5 Bajada por Parábola Simple.

Al igual que en el caso de la parábola doble, se inicia con un nivel alto estable, y se baja bruscamente la carga piezométrica en un extremo; con esto la configuración será de una parábola, pero sin ser simétrica como la parábola doble, y con un extremo con la carga piezométrica mucho más grande que en el otro.

Para la solución numérica de este último caso se utilizó el programa dos.

III.5 Algunas Recomendaciones para la Medición.

En las mediciones, como ya habíamos señalado en la introducción, fue necesaria la utilización de equipo de video. En nuestro caso empleamos dos cámaras de video; una en formato VHS y, la otra en formato Super 8.

Una de las primeras y más importantes recomendaciones para realizar el experimento en un modelo hidrológico, es la adecuada selección del equipo de video. Dadas las características del experimento, se requiere de la mayor precisión posible; por ello recomendamos realizar primeramente una prueba de la precisión y nitidez de la grabación por medio de la cámara de video. Es necesario que en la reproducción se vean claramente marcas a cada uno o dos milímetros; más aparte el nivel del agua en los piezómetros. La grabación debe contener todos los piezómetros y un cronómetro, en una sola cinta de ser posible; en caso contrario, se pueden utilizar más cámaras de video simultáneas; pero todas deben de captar perfectamente las marcas y el nivel de agua de los piezómetros que le correspondan, más el cronómetro; esto último es para que coincidan los tiempos de las mediciones al pasar los videos y, evitar algún defase en el tiempo. Se puede emplear un cronómetro para cada cámara, pero ello complicaría la medición, pues sería necesaria la perfecta coordinación de todos los cronómetros o, en su defecto, que se sepa perfectamente el defase existente entre ellos, para posteriormente corregir las lecturas al tiempo adecuado.

En lo que respecta a la videograbadora, se requiere una que posea pausa con avance de imágenes de fracciones de segundo, para así poder medir los intervalos de acuerdo a nuestras necesidades. La reproducción de la imagen durante la pausa debe ser clara. Para nuestro caso empleamos una pausa con avance de 1/15 de segundo.

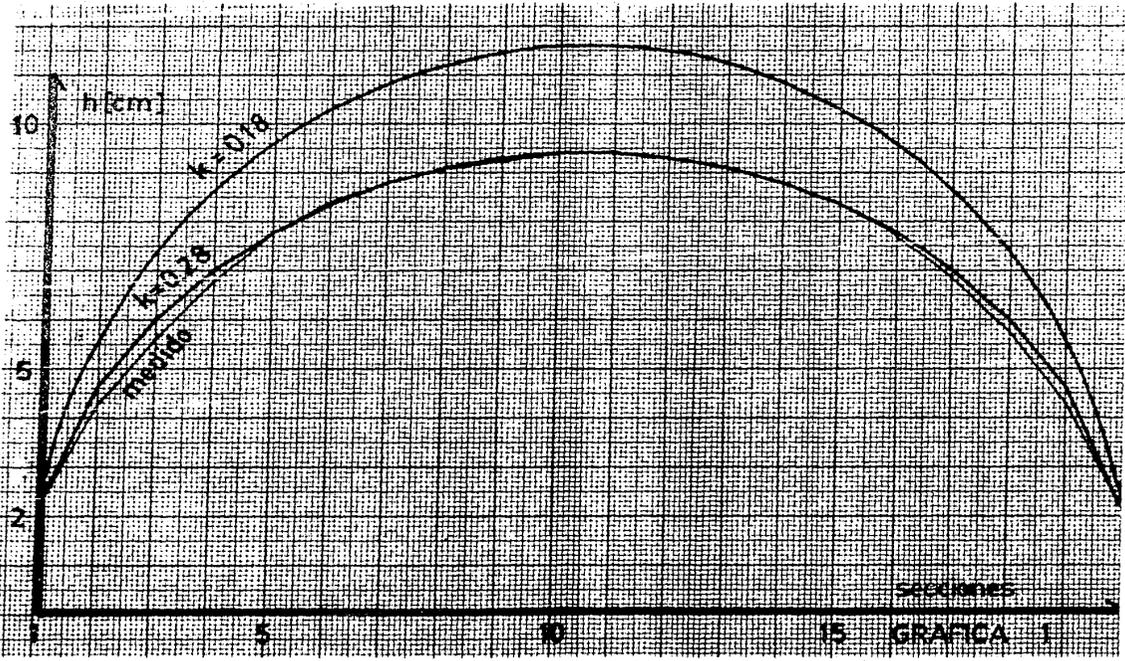
Para aumentar la calidad del video y, por ende su nitidez, se requiere de la mayor cantidad posible de luz. Si se utilizan reflectores o lámparas de gran potencia, es necesario que el reflejo que se produzca debido a ellas en los piezómetros o, en el cronómetro, no perjudique a la imagen del video; esto debe revisarse periódicamente, pues a menudo, el menor movimiento de la cámara de video, hace que dichos reflejos afecten a la imagen.

Se recomienda la utilización de tripiés muy firmes para la fijación del equipo.

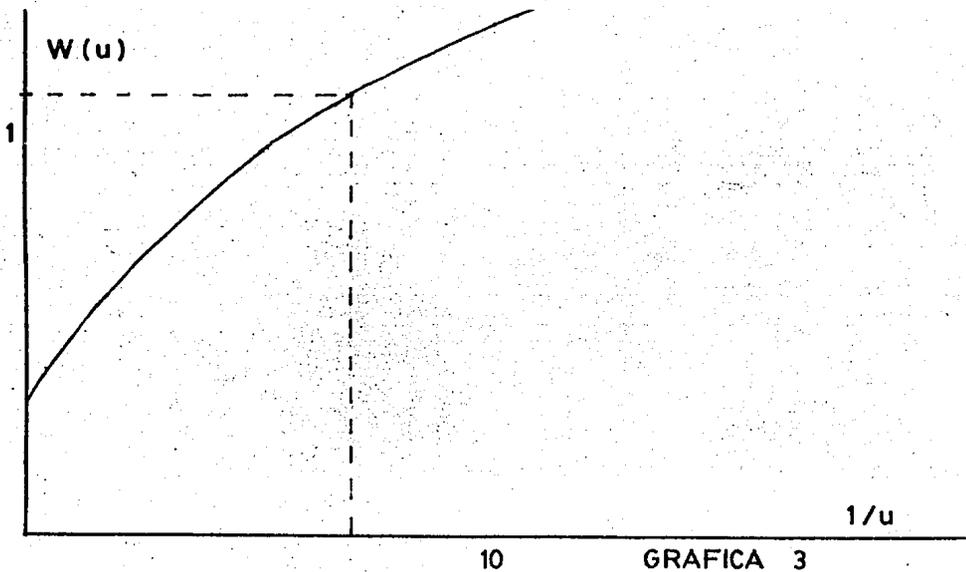
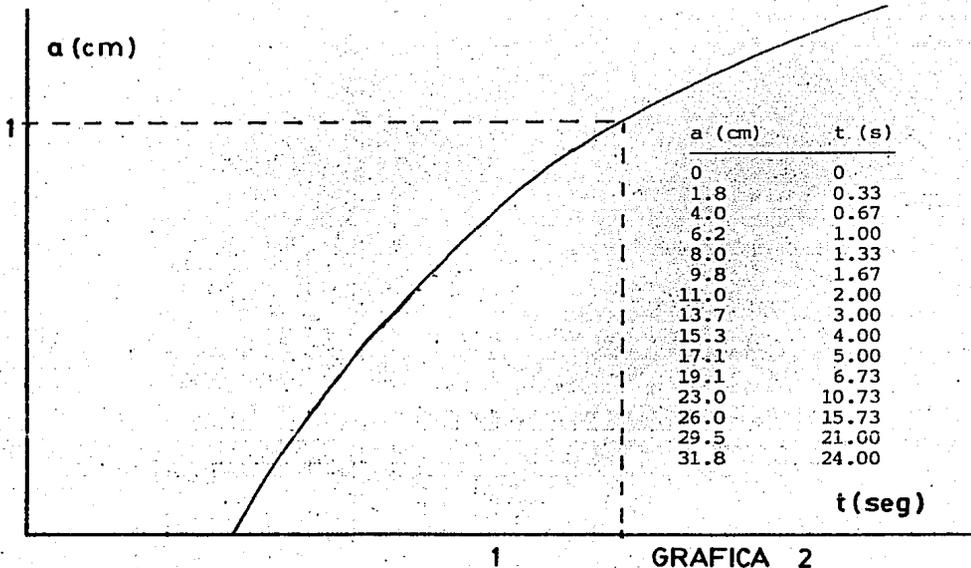
En lo que respecta a las pruebas, sólo diremos que si se desea realizar la prueba de lluvia, debe evitarse que llegue a saturarse en algún sitio la superficie de la muestra, pues esto afecta a los resultados. Para evitar lo anterior, se recomienda el empleo de gastos de lluvia muy pequeños.

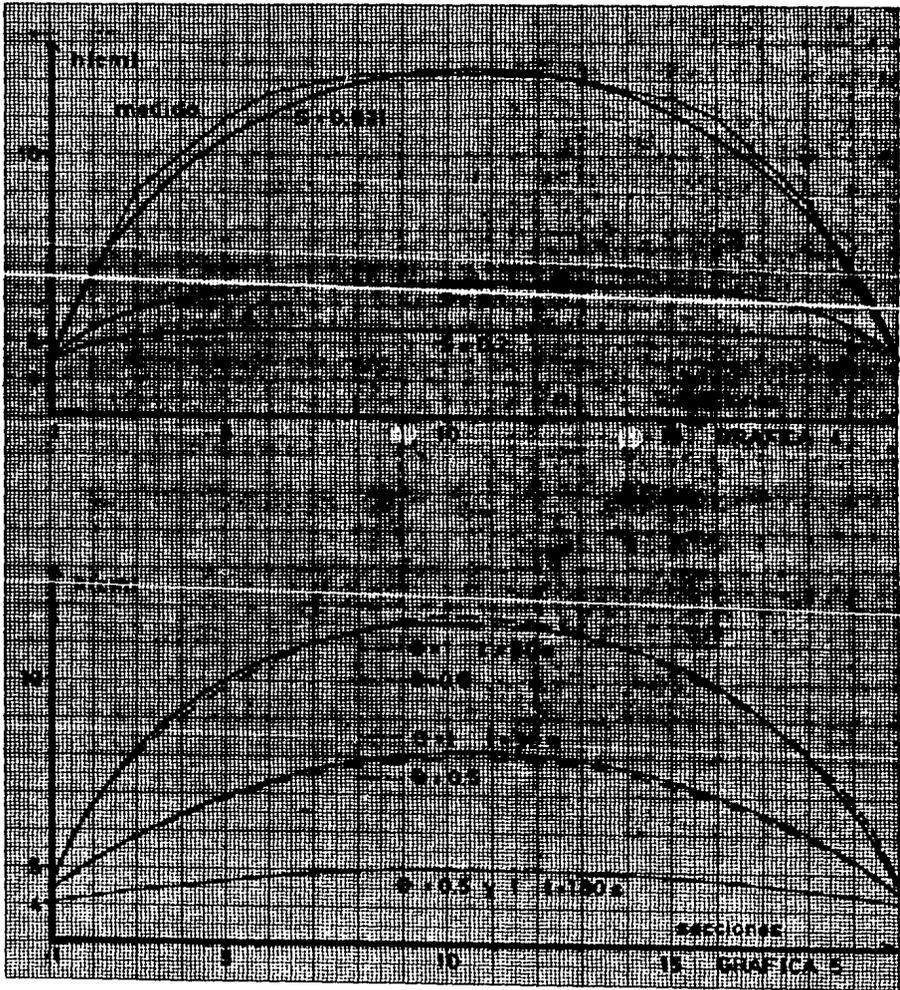
Otra recomendación importante es el empleo de arena adecuada para cumplir con los requisitos del número de Reynolds (ver capítulo V). El diámetro máximo de las partículas de arena que nos propone Juárez Badillo es de 0.4 milímetros.

Por último se recomienda grabar con sonido, para poder dar las indicaciones del tipo de prueba y del inicio y final de la misma.



GRAFICA 1





LLUVIA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .01 DT= 15 TETA= 1 K=0.18

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
60	2.20	5.26	6.94	8.12	9.01	9.68	10.19	10.55	10.78	10.90	10.90	10.78	10.55	10.19	9.68	9.01	8.12	6.94	5.26	2.20
120	2.20	5.54	7.33	8.59	9.54	10.26	10.81	11.20	11.45	11.58	11.58	11.45	11.20	10.81	10.26	9.54	8.59	7.33	5.54	2.20
180	2.20	5.55	7.34	8.61	9.56	10.29	10.84	11.23	11.49	11.61	11.61	11.49	11.23	10.84	10.29	9.56	8.61	7.34	5.55	2.20
240	2.20	5.55	7.35	8.61	9.57	10.29	10.84	11.23	11.49	11.61	11.61	11.49	11.23	10.84	10.29	9.57	8.61	7.35	5.55	2.20
300	2.20	5.55	7.35	8.61	9.57	10.29	10.84	11.23	11.49	11.61	11.61	11.49	11.23	10.84	10.29	9.57	8.61	7.35	5.55	2.20
360	2.20	5.55	7.35	8.61	9.57	10.29	10.84	11.23	11.49	11.61	11.61	11.49	11.23	10.84	10.29	9.57	8.61	7.35	5.55	2.20

TABLA 1. CALIBRACION DE K

LLUVIA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .01 DT= 15 TETA= 1 K=0.28

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
60	2.20	4.54	5.89	6.86	7.59	8.15	8.57	8.87	9.06	9.16	9.16	9.06	8.87	8.57	8.15	7.59	6.86	5.89	4.54	2.20
120	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.35	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.35	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
180	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.36	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.36	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
240	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.36	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.36	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
300	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.36	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.36	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20

TABLA 2. CALIBRACION DE K Y CONVERGENCIA A LA PARABOLA

LLUVIA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .1

DT= 15

TETA= 1

K = 0.28

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
90	2.20	3.11	3.64	3.97	4.18	4.32	4.40	4.45	4.48	4.50	4.50	4.48	4.45	4.40	4.32	4.18	3.97	3.64	3.11	2.20
180	2.20	3.64	4.49	5.02	5.51	5.83	6.06	6.21	6.31	6.36	6.36	6.31	6.21	6.06	5.83	5.51	5.02	4.49	3.64	2.20
270	2.20	4.02	5.09	5.85	6.42	6.84	7.16	7.39	7.53	7.60	7.60	7.53	7.39	7.16	6.84	6.42	5.85	5.09	4.02	2.20
360	2.20	4.27	5.48	6.34	6.99	7.48	7.85	8.11	8.28	8.36	8.36	8.28	8.11	7.85	7.48	6.99	6.34	5.48	4.27	2.20
450	2.20	4.43	5.72	6.64	7.33	7.86	8.25	8.54	8.72	8.81	8.81	8.72	8.54	8.25	7.86	7.33	6.64	5.72	4.43	2.20
540	2.20	4.52	5.86	6.81	7.53	8.08	8.49	8.79	8.98	9.07	9.07	8.98	8.79	8.49	8.08	7.53	6.81	5.86	4.52	2.20
630	2.20	4.58	5.93	6.91	7.64	8.20	8.62	8.92	9.12	9.22	9.22	9.12	8.92	8.62	8.20	7.64	6.91	5.93	4.58	2.20
720	2.20	4.61	5.98	6.94	7.70	8.27	8.70	9.00	9.20	9.30	9.30	9.20	9.00	8.70	8.27	7.70	6.94	5.98	4.61	2.20
810	2.20	4.62	6.00	6.99	7.74	8.31	8.74	9.05	9.25	9.35	9.35	9.25	9.05	8.74	8.31	7.74	6.99	6.00	4.62	2.20
900	2.20	4.63	6.02	7.01	7.76	8.33	8.76	9.07	9.27	9.37	9.37	9.27	9.07	8.76	8.33	7.76	7.01	6.02	4.63	2.20
990	2.20	4.64	6.02	7.02	7.77	8.34	8.77	9.08	9.29	9.39	9.39	9.29	9.08	8.77	8.34	7.77	7.02	6.02	4.64	2.20
1080	2.20	4.64	6.03	7.02	7.77	8.35	8.78	9.09	9.29	9.39	9.39	9.29	9.09	8.78	8.35	7.77	7.02	6.03	4.64	2.20
1170	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.35	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.35	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
1260	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.35	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.35	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
1350	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.35	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.35	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
1440	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.35	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.35	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20
1530	2.20	4.64	6.03	7.03	7.78	8.35	8.79	9.10	9.30	9.40	9.40	9.30	9.10	8.79	8.35	7.78	7.03	6.03	4.64	2.20

TABLA 3. CONVERGENCIA A LA PARABOLA

DOBLE PARABOLA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .1 DT= 15 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31
120	7.00	7.48	7.91	8.29	8.62	8.89	9.10	9.27	9.38	9.43	9.43	9.38	9.27	9.10	8.89	8.62	8.29	7.91	7.48	7.00
240	7.00	7.22	7.44	7.63	7.80	7.94	8.06	8.15	8.21	8.24	8.24	8.21	8.15	8.06	7.94	7.80	7.63	7.44	7.22	7.00
360	7.00	7.11	7.22	7.32	7.41	7.49	7.55	7.60	7.64	7.65	7.65	7.64	7.60	7.55	7.49	7.41	7.32	7.22	7.11	7.00
480	7.00	7.06	7.12	7.17	7.22	7.26	7.29	7.32	7.34	7.35	7.35	7.34	7.32	7.29	7.26	7.22	7.17	7.12	7.06	7.00
600	7.00	7.03	7.06	7.09	7.12	7.14	7.16	7.17	7.18	7.19	7.19	7.18	7.17	7.16	7.14	7.12	7.09	7.06	7.03	7.00
720	7.00	7.02	7.03	7.05	7.06	7.07	7.08	7.09	7.10	7.10	7.10	7.10	7.09	7.08	7.07	7.06	7.05	7.03	7.02	7.00
840	7.00	7.01	7.02	7.03	7.03	7.04	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.04	7.03	7.03	7.02	7.01	7.00
960	7.00	7.00	7.01	7.01	7.02	7.02	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.02	7.02	7.02	7.01	7.01	7.00	7.00
1080	7.00	7.00	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.02	7.02	7.02	7.02	7.02	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.00	7.00
1200	7.00	7.00	7.00	7.00	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.00	7.00	7.00	7.00
1320	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
1440	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00

TABLA 4. CONVERGENCIA AL PLANO

DOBLE PARABOLA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO $S = .01$

DT = 15

TETA = 1

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31
60	7.00	7.06	7.12	7.18	7.23	7.27	7.30	7.33	7.35	7.36	7.36	7.35	7.33	7.30	7.27	7.23	7.18	7.12	7.06	7.00
120	7.00	7.01	7.01	7.02	7.02	7.02	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.02	7.02	7.02	7.01	7.01	7.00
180	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
240	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00

TABLA 5. CONVERGENCIA AL PLANO

BAJADA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO $S = .021$

DT = 5

TETA = 1

TIEMPO	SECCION																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	
30	10.91	10.87	10.78	10.68	10.58	10.46	10.33	10.18	10.00	9.79	9.54	9.26	8.92	8.53	8.08	7.54	6.90	6.13	5.18	3.93	1.63
60	10.79	10.71	10.53	10.35	10.15	9.95	9.73	9.49	9.23	8.95	8.64	8.31	7.93	7.52	7.06	6.54	5.95	5.26	4.43	3.38	1.72
90	10.65	10.53	10.32	10.10	9.87	9.63	9.37	9.10	8.82	8.51	8.18	7.83	7.44	7.03	6.57	6.07	5.50	4.85	4.08	3.11	1.60
120	10.45	10.35	10.13	9.90	9.65	9.40	9.13	8.85	8.55	8.24	7.90	7.54	7.16	6.75	6.30	5.80	5.25	4.63	3.89	2.97	1.55
150	10.28	10.17	9.95	9.71	9.45	9.21	8.94	8.65	8.35	8.04	7.70	7.35	6.97	6.56	6.11	5.63	5.09	4.48	3.77	2.67	1.50
180	10.10	10.00	9.78	9.54	9.29	9.04	8.77	8.48	8.19	7.87	7.54	7.19	6.81	6.41	5.98	5.50	4.97	4.38	3.68	2.82	1.50
210	9.93	9.83	9.61	9.38	9.13	8.88	8.61	8.33	8.04	7.73	7.40	7.06	6.69	6.29	5.86	5.39	4.88	4.29	3.61	2.76	1.47

TABLA 6. PRUEBAS CON INCREMENTO DE TIEMPO

BAJADA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .021 DT= 15 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
30	10.87	10.81	10.70	10.58	10.45	10.31	10.16	9.98	9.78	9.55	9.29	8.98	8.64	8.24	7.77	7.24	6.60	5.85	4.92	3.71	1.88
60	10.72	10.64	10.46	10.27	10.07	9.85	9.63	9.39	9.12	8.84	8.53	8.19	7.82	7.41	6.95	6.44	5.85	5.18	4.37	3.34	1.72
90	10.55	10.45	10.24	10.02	9.79	9.55	9.30	9.03	8.74	8.44	8.11	7.76	7.38	6.97	6.52	6.01	5.45	4.81	4.05	3.09	1.60
120	10.37	10.27	10.05	9.82	9.58	9.32	9.06	8.78	8.49	8.17	7.84	7.49	7.11	6.70	6.25	5.76	5.22	4.60	3.67	2.96	1.55
150	10.19	10.08	9.85	9.63	9.39	9.13	8.86	8.58	8.29	7.97	7.64	7.29	6.92	6.51	6.07	5.59	5.06	4.45	3.75	2.86	1.50
180	10.01	9.91	9.69	9.45	9.21	8.96	8.69	8.41	8.12	7.81	7.48	7.13	6.76	6.36	5.93	5.46	4.94	4.35	3.66	2.80	1.50
210	9.84	9.74	9.52	9.29	9.05	8.80	8.53	8.26	7.97	7.66	7.34	7.00	6.63	6.24	5.82	5.35	4.84	4.26	3.59	2.75	1.47

TABLA 7. PRUEBAS CON INCREMENTO DE TIEMPO

BAJADA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .021 DT= 30 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
30	10.82	10.76	10.63	10.49	10.34	10.18	10.00	9.80	9.57	9.32	9.02	8.68	8.29	7.84	7.32	6.71	6.01	5.20	4.25	3.16	1.68
60	10.66	10.57	10.38	10.19	9.98	9.76	9.53	9.28	9.01	8.73	8.41	8.07	7.69	7.26	6.82	6.31	5.73	5.06	4.25	3.22	1.72
90	10.48	10.38	10.17	9.95	9.72	9.48	9.22	8.95	8.67	8.37	8.04	7.69	7.31	6.90	6.45	5.96	5.40	4.76	4.01	3.06	1.60
120	10.30	10.19	9.97	9.75	9.51	9.26	8.99	8.72	8.43	8.12	7.79	7.44	7.06	6.65	6.21	5.73	5.19	4.57	3.85	2.94	1.55
150	10.12	10.01	9.79	9.56	9.32	9.07	8.80	8.52	8.23	7.92	7.59	7.24	6.87	6.47	6.03	5.56	5.03	4.43	3.72	2.84	1.50
180	9.94	9.84	9.62	9.39	9.15	8.89	8.63	8.36	8.06	7.76	7.43	7.09	6.72	6.33	5.90	5.43	4.92	4.33	3.65	2.80	1.50
210	9.77	9.66	9.45	9.22	8.98	8.73	8.47	8.20	7.91	7.61	7.29	6.95	6.59	6.20	5.78	5.32	4.81	4.24	3.57	2.74	1.47

TABLA 8. PRUEBAS CON INCREMENTO DE TIEMPO

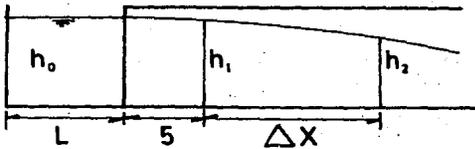
CAPITULO IV. COMPARACION
CON CALCULOS
NUMERICOS

IV. COMPARACION CON CALCULOS NUMERICOS

Antes de presentar los resultados del método numérico y los datos medidos, tenemos que señalar que las condiciones de frontera para los casos: Doble Parábola, Subida y Lluvia; fueron introducidas al programa número uno por medio de archivos de datos; con lo cual tanto la ecuación para el primer punto, que en el método vendría siendo la sección 2; como para el último punto, que en el método sería la sección 19; se presentan los valores de las alturas piezométricas, tanto presentes como futuros, de las secciones 1 y 20, como datos de frontera conocidos.

Para el caso de la Bajada, sólo las alturas piezométricas de la sección 20 son datos conocidos; por esto es necesaria la adición de una ecuación extra para el cálculo de la altura piezométrica en la sección 1. Además se requiere de una segunda ecuación aguas arriba, para poder determinar la carga de lo que sería la sección 0, carga que es necesario conocer, pues surge como incógnita al hacer la ecuación de la sección 1.

A continuación esquematizamos las condiciones de frontera de las secciones 0 y 1 para el caso de la Bajada.



Por continuidad tenemos que para la sección 0:

$$\frac{(h'_0 - h_0)L}{\Delta t} = -K \frac{(h'_1 - h'_0)}{5}$$

Además, para la sección 1:

$$\frac{2 \Delta X (h'_0 - h_1) h_0}{5} - (h'_1 - h'_2)(h_1 + h_2) = \frac{2(\Delta X)^2 S}{\Delta t K} (h'_1 - h_1)$$

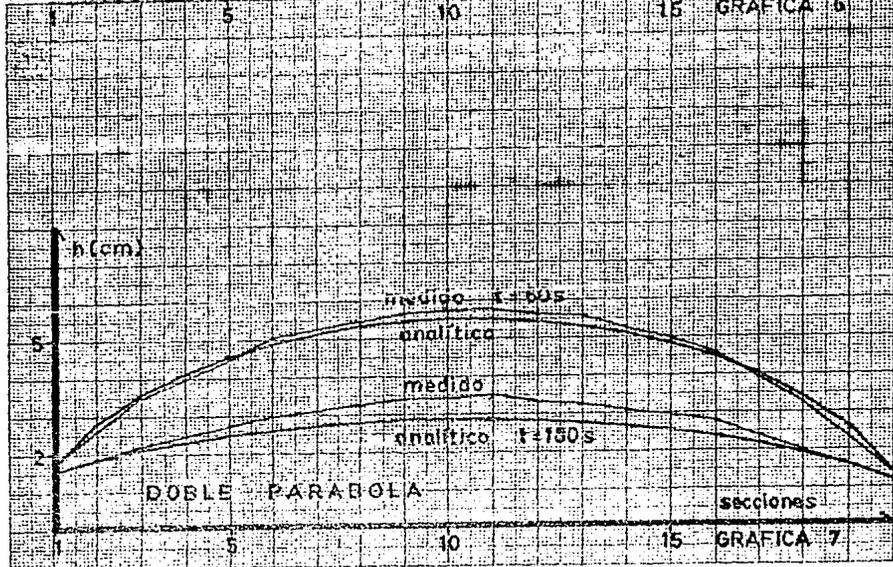
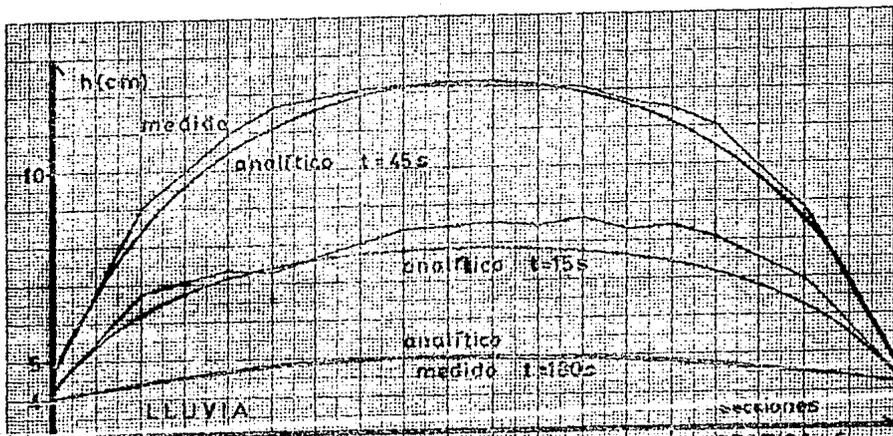
y estas son las dos ecuaciones adicionales para completar el sistema necesario para la solución de la Bajada. Dichas ecuaciones fueron anexadas al programa 1 para formar el programa 2.

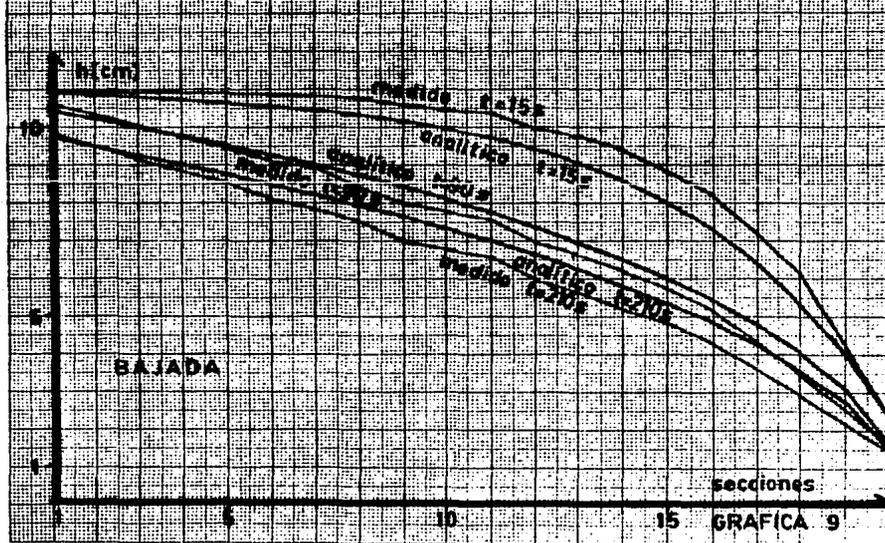
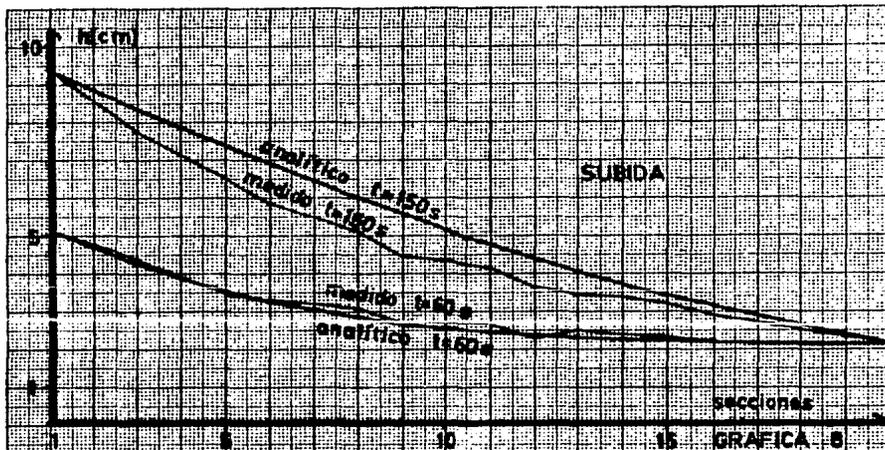
A continuación presentamos gráficas, a manera de fotografías, de todas las secciones para distintos tiempos y, para todas las pruebas; comparando el perfil medido con el perfil calculado (ver gráficas 6, 7, 8 y 9).

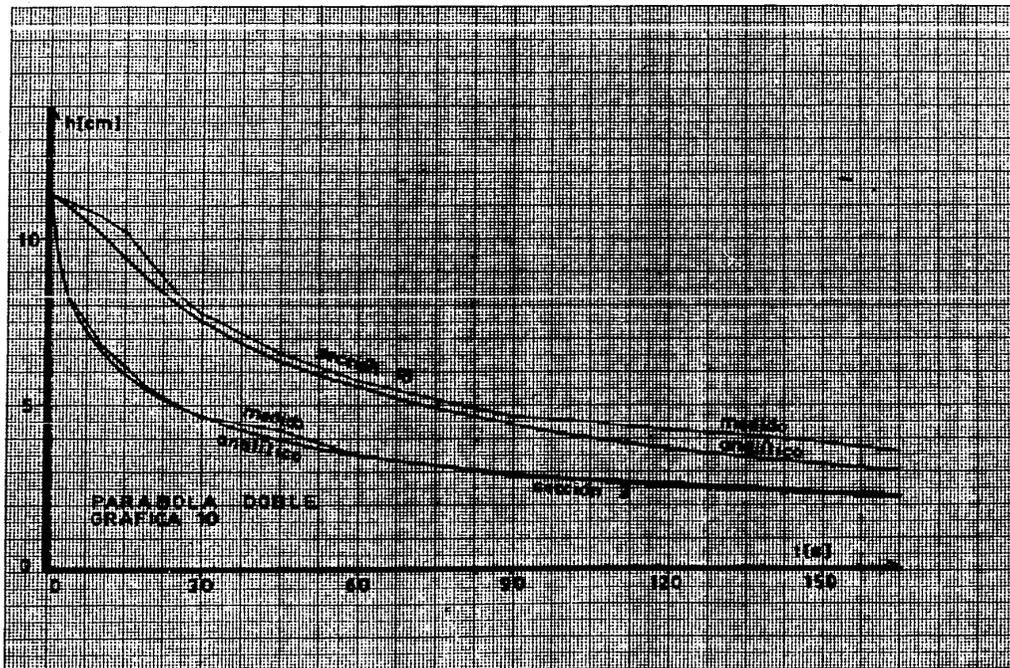
Después presentamos el desarrollo, para dos secciones de cada prueba, de la variación de la altura piezométrica, tanto medida como calculada (gráficas 10, 11, 12 y 13).

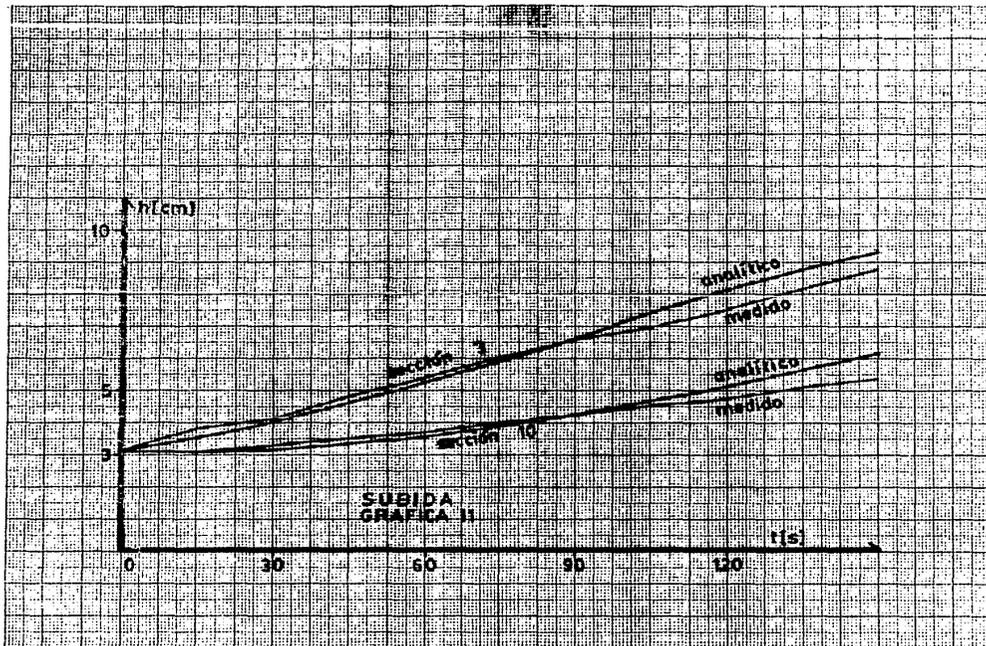
Por último se presentan las tablas con los resultados calculados (tablas 9, 10, 11 y 12), y las tablas con algunos datos medidos (tablas 13, 14, 15 y 16).

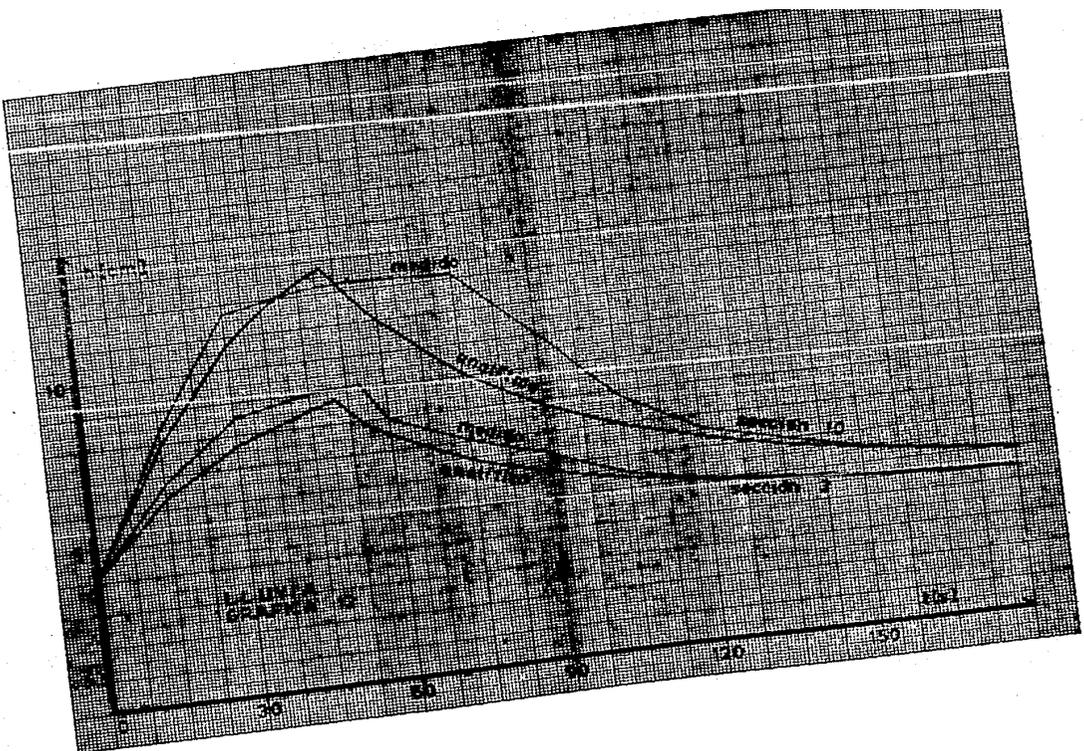
Además anexamos los listados de los programas 1 y 2, utilizados para los cálculos numéricos de estos experimentos.

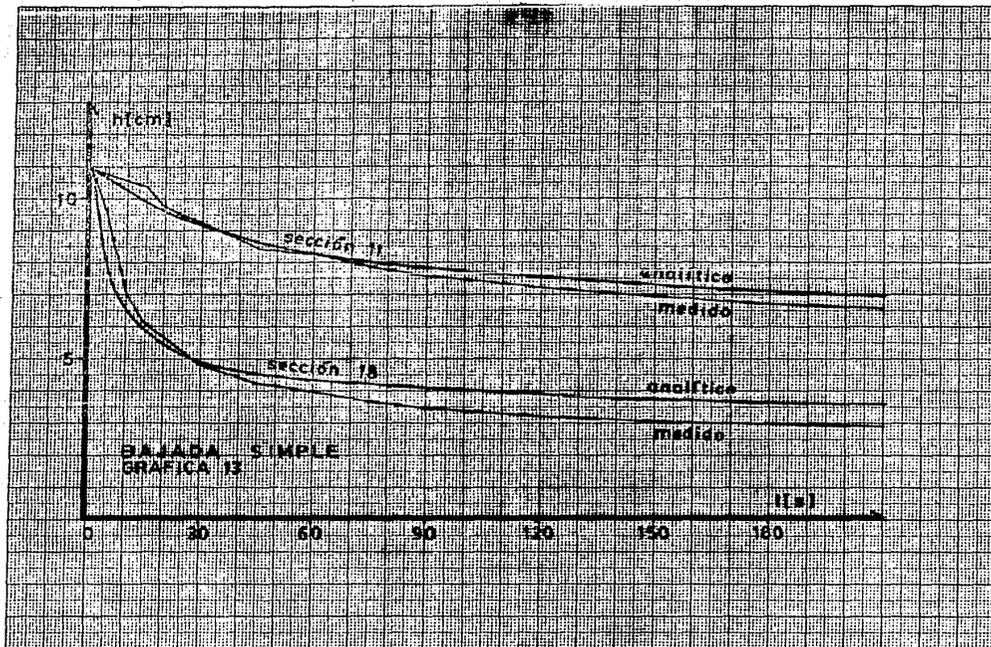












DOBLE PARABOLA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .021 DT= 15 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31
15	2.37	3.99	5.29	6.33	7.14	7.77	8.24	8.57	8.79	8.89	8.89	8.78	8.56	8.21	7.73	7.09	6.27	5.22	3.90	2.26
30	1.97	3.57	4.63	5.41	6.02	6.49	6.85	7.12	7.29	7.37	7.37	7.28	7.10	6.82	6.45	5.96	5.34	4.53	3.44	1.74
45	1.84	3.19	4.04	4.69	5.19	5.58	5.88	6.10	6.24	6.31	6.30	6.22	6.07	5.84	5.52	5.11	4.58	3.89	2.97	1.45
60	1.72	2.84	3.58	4.13	4.56	4.90	5.16	5.35	5.47	5.53	5.52	5.45	5.32	5.12	4.85	4.50	4.04	3.46	2.68	1.41
75	1.71	2.63	3.25	3.72	4.09	4.39	4.61	4.77	4.89	4.92	4.92	4.86	4.74	4.56	4.32	4.01	3.61	3.09	2.41	1.31
90	1.55	2.43	2.97	3.39	3.72	3.97	4.17	4.31	4.41	4.45	4.44	4.38	4.28	4.12	3.90	3.62	3.27	2.81	2.20	1.24
105	1.61	2.28	2.75	3.12	3.41	3.64	3.82	3.94	4.02	4.06	4.05	4.00	3.91	3.76	3.57	3.32	3.00	2.59	2.05	1.22
120	1.57	2.15	2.57	2.90	3.16	3.36	3.52	3.64	3.71	3.74	3.75	3.69	3.60	3.47	3.29	3.06	2.77	2.41	1.93	1.21
135	1.55	2.05	2.42	2.71	2.95	3.13	3.28	3.38	3.44	3.47	3.47	3.42	3.34	3.22	3.06	2.85	2.59	2.26	1.83	1.20
150	1.54	1.97	2.30	2.54	2.77	2.94	3.07	3.16	3.22	3.24	3.24	3.20	3.12	3.01	2.86	2.67	2.43	2.13	1.74	1.19
165	1.54	1.91	2.20	2.43	2.62	2.77	2.89	2.98	3.03	3.05	3.04	3.00	2.94	2.83	2.70	2.52	2.30	2.03	1.68	1.19
180	1.54	1.86	2.12	2.33	2.50	2.63	2.74	2.82	2.86	2.88	2.87	2.84	2.77	2.68	2.55	2.39	2.19	1.94	1.62	1.19

TABLA 9. DATOS CALCULADOS

SUBIDA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .021 DT= 15 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11
15	3.99	3.69	3.50	3.37	3.29	3.23	3.19	3.16	3.15	3.13	3.13	3.12	3.12	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11
30	4.86	4.45	4.11	3.85	3.65	3.50	3.39	3.31	3.25	3.21	3.18	3.16	3.14	3.13	3.13	3.12	3.12	3.11	3.11	3.11
45	5.37	4.99	4.64	4.33	4.07	3.85	3.67	3.53	3.43	3.34	3.28	3.24	3.20	3.18	3.16	3.14	3.13	3.12	3.12	3.11
60	6.16	5.70	5.29	4.91	4.58	4.29	4.05	3.84	3.68	3.55	3.44	3.36	3.30	3.25	3.21	3.18	3.16	3.14	3.12	3.11
75	6.87	6.40	5.95	5.53	5.15	4.81	4.50	4.24	4.01	3.82	3.67	3.54	3.44	3.36	3.30	3.25	3.20	3.17	3.14	3.11
90	7.51	7.04	6.59	6.15	5.74	5.35	5.00	4.69	4.41	4.17	3.96	3.79	3.64	3.52	3.42	3.34	3.27	3.21	3.16	3.11
105	8.31	7.85	7.42	6.92	6.45	6.01	5.61	5.23	4.90	4.60	4.33	4.10	3.91	3.74	3.60	3.48	3.38	3.29	3.21	3.14
120	9.14	8.62	8.11	7.62	7.14	6.67	6.24	5.82	5.44	5.09	4.77	4.49	4.24	4.02	3.82	3.66	3.51	3.38	3.26	3.15
135	9.77	9.26	8.76	8.26	7.78	7.31	6.85	6.42	6.00	5.62	5.26	4.92	4.62	4.35	4.10	3.89	3.69	3.49	3.32	3.15
150	10.35	9.85	9.35	8.86	8.38	7.90	7.44	7.00	6.56	6.15	5.76	5.38	5.04	4.71	4.41	4.14	3.88	3.63	3.39	3.15

TABLA 10. DATOS CALCULADOS

LLUVIA-METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .021 DT= 15 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07
15	4.23	5.37	6.19	6.75	7.14	7.42	7.61	7.73	7.81	7.85	7.85	7.82	7.75	7.63	7.46	7.20	6.83	6.29	5.53	4.46
30	4.47	6.31	7.57	8.49	9.18	9.69	10.08	10.35	10.52	10.61	10.61	10.53	10.37	10.11	9.74	9.23	8.56	7.67	6.45	4.70
45	4.57	6.89	8.43	9.57	10.43	11.10	11.59	11.95	12.18	12.30	12.30	12.19	11.97	11.62	11.13	10.48	9.62	8.50	6.99	4.75
60	4.51	5.99	7.05	7.86	8.52	9.03	9.43	9.72	9.91	10.01	10.02	9.93	9.74	9.46	9.07	8.57	7.93	7.13	6.10	4.67
75	4.39	5.42	6.20	6.83	7.33	7.74	8.06	8.29	8.45	8.53	8.53	8.46	8.32	8.09	7.79	7.40	6.91	6.30	5.55	4.57
90	4.31	5.05	5.65	6.14	6.54	6.87	7.12	7.31	7.44	7.50	7.51	7.46	7.34	7.16	6.92	6.61	6.22	5.76	5.19	4.49
105	4.21	4.78	5.25	5.64	5.97	6.24	6.45	6.61	6.71	6.77	6.77	6.73	6.64	6.50	6.31	6.06	5.76	5.39	4.96	4.45
120	4.16	4.59	4.97	5.29	5.55	5.77	5.95	6.08	6.17	6.22	6.23	6.19	6.12	6.01	5.85	5.65	5.41	5.13	4.79	4.41
135	4.11	4.45	4.76	5.02	5.24	5.42	5.57	5.68	5.76	5.80	5.81	5.78	5.72	5.63	5.51	5.35	5.16	4.93	4.67	4.37
150	4.10	4.37	4.61	4.82	5.00	5.15	5.27	5.37	5.44	5.47	5.48	5.46	5.42	5.34	5.24	5.11	4.95	4.77	4.56	4.33
165	4.09	4.30	4.49	4.67	4.82	4.94	5.05	5.13	5.18	5.22	5.22	5.21	5.17	5.11	5.03	4.92	4.79	4.65	4.48	4.29
180	4.08	4.25	4.41	4.55	4.67	4.78	4.87	4.93	4.98	5.01	5.02	5.01	4.98	4.93	4.86	4.77	4.66	4.54	4.40	4.25

TABLA 11. DATOS CALCULADOS

BAJADA METODO IMPLICITO

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S= .021 DT= 15 TETA= 1

TIEMPO	SECCION																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
15	10.92	10.89	10.85	10.78	10.71	10.65	10.54	10.43	10.30	10.15	9.93	9.67	9.38	9.01	8.55	7.98	7.37	6.69	5.91	5.07	4.21
30	10.87	10.81	10.73	10.62	10.48	10.31	10.11	9.85	9.55	9.25	8.85	8.35	7.75	7.05	6.25	5.35	4.45	3.55	2.65	1.75	0.85
45	10.81	10.73	10.57	10.41	10.24	10.05	9.81	9.54	9.20	8.75	8.25	7.65	6.95	6.15	5.25	4.35	3.45	2.55	1.65	0.75	-0.15
60	10.73	10.64	10.45	10.27	10.07	9.85	9.63	9.37	9.02	8.54	8.05	7.45	6.75	5.95	5.05	4.15	3.25	2.35	1.45	0.55	-0.35
75	10.64	10.54	10.35	10.14	9.92	9.69	9.45	9.19	8.81	8.31	7.75	7.15	6.45	5.65	4.75	3.85	2.95	2.05	1.15	0.25	-0.55
90	10.55	10.45	10.24	10.02	9.78	9.55	9.30	8.93	8.44	7.91	7.35	6.75	6.05	5.25	4.35	3.45	2.55	1.65	0.75	-0.15	-0.85
105	10.45	10.34	10.11	9.87	9.62	9.37	9.11	8.73	8.25	7.71	7.15	6.55	5.85	5.05	4.15	3.25	2.35	1.45	0.55	-0.35	-1.05
120	10.37	10.25	10.01	9.75	9.50	9.24	8.97	8.59	8.11	7.57	7.01	6.41	5.71	4.91	4.01	3.11	2.21	1.31	0.41	-0.49	-1.25
135	10.28	10.17	9.91	9.65	9.39	9.12	8.85	8.47	7.99	7.45	6.89	6.29	5.59	4.79	3.89	2.99	2.09	1.19	0.29	-0.59	-1.41
150	10.19	10.07	9.80	9.53	9.26	8.99	8.71	8.33	7.85	7.31	6.75	6.15	5.45	4.65	3.75	2.85	1.95	1.05	0.15	-0.65	-1.57
165	10.10	10.00	9.72	9.45	9.18	8.91	8.63	8.25	7.77	7.23	6.67	6.07	5.37	4.57	3.67	2.77	1.87	0.97	0.07	-0.77	-1.63
180	10.01	9.91	9.63	9.35	9.08	8.81	8.53	8.15	7.67	7.13	6.57	5.97	5.27	4.47	3.57	2.67	1.77	0.87	-0.03	-0.83	-1.69
195	9.92	9.82	9.54	9.27	8.99	8.73	8.45	8.07	7.59	7.05	6.49	5.89	5.19	4.39	3.49	2.59	1.69	0.79	-0.11	-0.91	-1.75
210	9.84	9.74	9.46	9.19	8.91	8.65	8.37	7.99	7.51	6.97	6.41	5.81	5.11	4.31	3.41	2.51	1.61	0.71	-0.19	-0.97	-1.81

TABLA 12. DATOS CALCULADOS

DOBLE PARABOLA-DATOS MEDIDOS

TIEMPO	SECCION																	
	1	3	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20			
0	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	11.31	
15	2.37	6.19	8.05	8.81	9.67	10.11	10.24	10.26	10.24	10.15	9.87	9.23	8.61	6.38	2.26			
30	1.98	4.66	6.14	6.76	7.39	7.70	7.76	7.77	7.70	7.65	7.85	6.81	6.28	4.60	1.74			
45	1.84	3.92	5.29	5.99	6.48	6.55	6.58	6.58	6.52	6.43	6.03	5.66	5.21	3.60	1.45			
60	1.72	3.48	4.57	5.05	5.55	5.68	5.75	5.75	5.63	5.57	5.23	4.97	4.57	3.24	1.41			
75	1.71	3.16	4.17	4.57	4.97	5.16	5.17	5.18	5.08	5.06	4.66	4.44	4.07	2.91	1.31			
90	1.65	2.81	3.74	4.11	4.44	4.63	4.67	4.67	4.57	4.54	4.23	4.01	3.63	2.60	1.24			
105	1.61	2.78	3.54	3.90	4.25	4.44	4.49	4.50	4.39	4.37	4.03	3.83	3.47	2.47	1.23			
120	1.59	2.65	3.36	3.69	4.03	4.22	4.25	4.27	4.14	4.08	3.77	3.60	3.27	2.36	1.21			
135	1.56	2.51	3.15	3.48	3.84	4.01	4.10	4.10	3.96	3.87	3.59	3.41	3.07	2.24	1.20			
150	1.55	2.39	3.01	3.30	3.65	3.74	3.89	3.89	3.76	3.69	3.38	3.18	2.95	2.16	1.20			
165	1.54	2.26	2.80	3.07	3.37	3.57	3.61	3.61	3.48	3.41	3.11	2.97	2.71	2.01	1.19			

TABLA 13. DATOS MEDIDOS

SHRIDA-DATOS MEDIDOS

TIEMPO	SECCION																	
	1	3	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20			
0	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	
15	4.26	3.81	3.41	3.31	3.31	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	
30	4.89	4.11	3.71	3.51	3.41	3.41	3.31	3.31	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	3.11	
45	5.46	4.81	4.12	3.91	3.71	3.51	3.51	3.51	3.21	3.31	3.26	3.24	3.19	3.11	3.11	3.11	3.11	
60	6.21	5.41	4.51	4.31	4.11	3.71	3.71	3.71	3.31	3.51	3.40	3.30	3.26	3.16	3.11	3.11	3.11	
75	6.92	6.01	5.11	4.71	4.41	4.11	4.01	3.91	3.61	3.61	3.54	3.48	3.33	3.23	3.11	3.11	3.11	
90	7.60	6.61	5.51	5.11	4.76	4.31	4.26	4.11	3.73	3.73	3.71	3.64	3.40	3.27	3.11	3.11	3.11	
105	8.25	6.96	5.94	5.49	5.11	4.61	4.54	4.36	3.93	3.91	3.88	3.78	3.54	3.37	3.14	3.11	3.11	
120	8.90	7.51	6.44	5.91	5.41	4.91	4.76	4.65	4.14	4.11	4.05	3.93	3.62	3.43	3.15	3.11	3.11	
135	9.56	8.16	7.01	6.37	5.73	5.17	5.11	4.91	4.58	4.27	4.22	4.06	3.76	3.47	3.15	3.11	3.11	
150	10.16	8.79	7.53	6.88	6.13	5.45	5.36	5.14	4.61	4.46	4.40	4.21	3.91	3.52	3.15	3.11	3.11	

TABLA 14. DATOS MEDIDOS

LLUVIA-DATOS MEDIDOS

TIEMPO	SECCION																	
	1	3	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20			
0	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	
15	4.22	6.77	7.35	7.30	8.01	8.39	8.43	8.53	8.44	8.63	8.32	8.43	8.12	6.98	4.48	4.48	4.48	
30	4.50	8.51	10.21	10.88	11.47	11.71	11.71	11.75	11.71	11.71	11.32	11.06	10.52	8.49	4.70	4.70	4.70	
45	4.57	9.04	10.96	11.65	12.10	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	12.08	11.72	11.53	11.06	8.84	4.75	4.75	
55	4.63	9.11	11.13	11.77	12.17	12.28	12.28	12.28	12.19	12.14	11.88	11.68	11.24	8.86	4.74	4.74	4.74	
60	4.50	7.97	10.46	11.54	12.12	12.27	12.27	12.27	12.16	12.11	11.88	11.67	11.13	8.44	4.63	4.63	4.63	
75	4.40	7.01	9.07	10.17	11.51	12.12	12.17	12.17	12.05	11.98	11.66	11.13	10.28	7.53	4.54	4.54	4.54	
90	4.31	6.34	7.81	8.51	9.49	9.93	10.06	10.08	10.08	10.01	9.78	9.23	8.64	6.70	4.47	4.47	4.47	
105	4.22	5.49	6.43	6.82	7.44	7.71	7.81	7.84	8.04	7.96	7.78	7.40	7.03	5.86	4.38	4.38	4.38	
120	4.15	5.35	5.70	6.00	6.37	6.56	6.57	6.63	6.66	6.63	6.47	6.29	6.07	5.27	4.33	4.33	4.33	
135	4.11	4.87	5.50	5.92	6.08	6.04	6.03	6.00	5.95	5.91	5.79	5.60	5.43	4.89	4.28	4.28	4.28	
150	4.11	4.67	5.11	5.31	5.45	5.55	5.51	5.52	5.47	5.41	5.32	5.20	5.11	4.70	4.26	4.26	4.26	
165	4.09	4.54	4.93	4.97	5.16	5.18	5.16	5.18	5.17	5.13	5.05	4.96	4.87	4.54	4.26	4.26	4.26	
180	4.04	4.37	4.65	4.78	4.90	4.97	4.96	4.96	4.93	4.91	4.87	4.80	4.71	4.50	4.25	4.25	4.25	

TABLA 15. DATOS MEDIDOS

TESIS CON FALLAS DE ORIGEN

PRUEBA-DATOS MEDIDOS

TIEMPO	SECCION																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
15	10.94	10.94	10.91	10.87	10.77	10.57	10.44	10.39	9.98	9.78	9.41	8.81	8.20	6.13	2.31					
30	10.94	10.76	10.50	10.31	9.91	9.52	9.35	9.25	8.58	8.37	7.83	7.38	6.75	4.82	1.88					
45	10.88	10.49	10.06	9.78	9.25	8.55	8.66	8.45	7.86	7.56	7.07	6.63	6.04	4.23	1.77					
60	10.85	10.36	9.86	9.55	9.04	8.59	8.45	8.27	7.77	7.44	6.94	6.40	5.77	3.97	1.72					
75	10.75	10.18	9.65	9.31	8.71	8.21	8.03	7.84	7.21	6.93	6.44	6.01	5.40	3.67	1.62					
90	10.62	10.04	9.44	9.07	8.45	7.98	7.78	7.57	6.91	6.63	6.17	5.73	5.11	3.47	1.60					
120	10.45	9.81	9.19	8.76	8.09	7.59	7.41	7.21	6.55	6.24	5.77	5.34	4.79	3.20	1.55					
210	9.35	9.15	8.55	8.11	7.51	6.97	6.77	6.59	5.91	5.62	5.19	4.82	4.26	2.91	1.47					

TABLA 16. DATOS MEDIDOS

PROGRAMA 1

```

10 OPTION BASE 1
20 DIM H(20), ZI(500), ZF(500), N(20), DT(20), Q(20, 4), HF(20)
30 REM "LLUVIA"
40 CLE
50 REM "ASIGNACION DE CONSTANTES"
60 Y=20
70 DX=10
80 KP=.28
90 REM "LECTURA DEL ARCHIVO DE DATOS DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA E INICIAL
100 PRINT "CUAL DISCO?"; INPUT C*
110 OPEN "I", #1, C*+"LLUVIA"
120 INPUT #1, K, TF, CI, W, TFW
130 FOR L=1 TO K
140 INPUT #1, ZI(L), ZF(L); NEXT L
150 CLOSE #1
160 WW=W
170 REM "INTRODUCCION DE PARAMETROS PROPIOS DEL METODO"
180 PRINT "DT, ST, DTMP, TETA"
190 INPUT A1, ST, DTPR, TETA
200 LPRINT CHR$(15); WIDTH "LPT1:"; 132
210 REM "IMPRESION DE TITULOS Y CONDICIONES INICIALES"
220 LPRINT "LLUVIA-METODO IMPLICITO"
230 LPRINT "COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S="; ST; " DT="; A1; " TETA="; TETA
240 T=0; W=WW
250 LPRINT " "
260 LPRINT TAB(55); "SECCION"
270 LPRINT "TIEMPO";
280 FOR I=1 TO X
290 LPRINT TAB(I*6+3); I;
300 NEXT I
310 LPRINT " "
320 LPRINT USING "####"; T; LPRINT " ";
330 FOR I=1 TO X
340 H(I)=CI
350 LPRINT USING "###.###"; H(I);
360 NEXT I
370 LPRINT
380 REM "FORMACION DE LA MATRIZ BANDEADA"
390 A=2*DX*DX*ST/A1/KP; TETA1=1-TETA; W=W*DX*DX/KP*2
400 L=0
410 T=T+A1
420 IF T>TF THEN 190
430 IF T>TFW THEN W=0
440 L=L+A1; A2=ZI(L); A3=ZF(L)
450 FOR I=2 TO Y-1
460 H1=H(I)+H(I-1); H3=H(I)+H(I+1); H1T=H1*TETA1; H3T=H3*TETA1
470 H1=H1*TETA; H3=H3*TETA
480 IF I=2 THEN 500
490 Q(I-1, 1)=H1
500 Q(I-1, 2)=- (H1+H3)-A
510 IF I=X-1 THEN 530
520 Q(I-1, 3)=H3
530 Q(I-1, 4)=-H1T*H(I-1)+ (H1T+H3T-A)*H(I)-H3T*H(I+1)-W
540 IF I=2 THEN 570
550 IF I=X-1 THEN 590
560 GOTO 600
570 Q(I-1, 4)=Q(I-1, 4)-H1*A2
580 GOTO 600
590 Q(I-1, 4)=Q(I-1, 4)-H3*A3
600 NEXT I

```

```

610 H(1)=A2
620 H(X)=A2
630 GOSUB 770
640 FOR I=2 TO X-1
650   H(I)=G(I-1,2)
660 NEXT I
670 REM "IMPRESION DE RESULTADOS"
680 IF INT(T/DIF)*DTPP-T<0 THEN 740
690   LPRINT USING "###": T;LPRINT " ";
700   FOR I=1 TO X
710     LPRINT USING "###.##":H(I);
720   NEXT I
730   LPRINT
740 GOTO 610
750 END
760 REM "SUBROUTINA DE INVERSION DE LA MATRIZ BANDEADA"
770 FOR X = 2 TO X-2
780   CC=-Q(I,1)/Q(I-1,2)
790   Q(I,2)=Q(I,2)+CC*Q(I-1,3)
800   Q(I,4)=Q(I,4)+CC*Q(I-1,4)
810 NEXT I
820 Q(X-2,2)=Q(X-2,4)/Q(X-2,2)
830 FOR I=X-3 TO 1 STEP -1
840   Q(I,2)=(Q(I,4)-Q(I+1,2)*Q(I,3))/Q(I,2)
850 NEXT I
860 RETURN

```

PROGRAMA 2

```

10 REM "BAJADA"
20 DIM H(21), ZI(500), ZF(500), N(20), DT(20), Q(20, 4)
30 CLS
40 REM "ASIGNACION DE CONSTANTES"
50 X=20
60 DX=10
70 KP=.28
80 REM "LECTURA DEL ARCHIVO DE DATOS DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA E INICIAL"
90 PRINT "CUAL DISCO": INPUT C#
100 OPEN "I", #1, C#+"BAJADA"
110 INPUT #1, K, TF, CI
120 FOR L=1 TO K
130 INPUT #1, ZF(L): NEXT L
140 CLOSE #1
150 W=0
160 WN=W
170 REM "INTRODUCCION DE PARAMETROS DEL METODO"
180 PRINT "DT, ST, DTIMP, TETA": INPUT A1, ST, DTPR, TETA
190 PRINT CHR$(15); WIDTH "LPT1:", 132
200 REM "IMPRESION DE TITULOS Y CONDICIONES INICIALES"
210 LPRINT "BAJADA-METODO IMPLICITO"
220 LPRINT "COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S="; ST; " DT="; A1; " TETA="; TETA
230 T=0: W=WN
240 LPRINT " "
250 LPRINT TAB(55); "SECCION"
260 LPRINT "TIEMPO";
270 FOR I=0 TO X
280 LPRINT TAB(I*6+9); I;
290 NEXT I
300 LPRINT " "
310 LPRINT USING "####"; T;: LPRINT " ";
320 FOR I=0 TO X
330 H(I)=CI
340 LPRINT USING "###.##"; H(I);
350 NEXT I
360 LPRINT
370 REM "FORMACION DE LA MATRIZ BANDEADA"
380 A=2*DX*DX*ST/A1/KP: TETA1=1-TETA: W=DX*DX/KP*2
390 K3=5*DX/KP/A1: K4=10*2*ST*DX/A1/KP: K5=DX*2/5
400 L=0
410 T=T+A1
420 IF INKEY#=CHR$(27) THEN STOP
430 IF T>TF THEN 180
440 L=L-A1: A3=ZF(L)
450 Q(0, 1)=-K3-H(0): Q(0, 2)=H(0): Q(0, 4)=-K3*H(0)
460 Q(1, 1)=K5*H(0): Q(1, 2)=-K5*H(0)-(H(2)+H(1))-K4: Q(1, 3)=H(1)+H(2)
470 Q(1, 4)=-K4*H(0)
480 FOR I=2 TO X-1
490 H1=H(I)+H(I-1): H3=H(I)+H(I+1): H1T=H1*TETA1: H3T=H3*TETA1
500 H1=H1TETA1: H3=H3TETA1
510 Q(I, 1)=H1
520 Q(I, 2)=-H1+H3-A
530 IF I=X-1 THEN 550
540 Q(I, 3)=H3
550 Q(I, 4)=-H1T*H(I-1)+(H1T+H3T-A)*H(I)-H3T*H(I+1)-W
560 IF I=X-1 THEN 580
570 GOTO 590
580 Q(I, 4)=Q(I, 4)-H3*A3
590 NEXT I
600 H(X)=A3

```

```

610 GOSUB 750
620 FOR I=0 TO X-1
630   H(I)=D(I,2)
640 NEXT I
650 REM "IMPRESION DE RESULTADOS"
660 IF INT(T/DTPR)/DTPR-T<0 THEN 720
670   LPRINT USING "####"; T;LPRINT " ";
680   FOR I=0 TO X
690     LPRINT USING "##.##";H(I);
700   NEXT I
710   LPRINT
720 GOTO 410
730 END
740 REM "INVERSION DE LA MATRIZ BANDEADA"
750 CC=-Q(1,1)/Q(0,1);Q(1,2)=Q(1,2)+CC*Q(0,2);Q(1,4)=Q(1,4)+CC*Q(0,4)
760 FOR I = 2 TO X-1
770   CC=-Q(1,1)/Q(I-1,2)
780   Q(I,2)=Q(I,2)+CC*Q(I-1,3)
790   Q(I,4)=Q(I,4)+CC*Q(I-1,4)
800 NEXT I
810 Q(X-1,2)=Q(X-1,4)/Q(X-1,2)
820 FOR I=X-2 TO 1 STEP -1
830   Q(I,2)=(Q(I,4)-Q(I+1,2)*Q(I,3))/Q(I,2)
840 NEXT I
850 Q(0,2)=(Q(0,4)-Q(1,2)*Q(0,2))/Q(0,1)
860 RETURN

```

CAPITULO V. CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

Después de haber comparado los resultados obtenidos analíticamente con los medidos, nos damos cuenta que hay una concordancia bastante aceptable; con la única salvedad para los valores de los parámetros K (coeficiente de permeabilidad) y S (coeficiente de almacenamiento), siendo este último el de mayor discordancia. En base a todo esto y, a la similitud de la configuración del perfil medido con el calculado, podemos concluir que el método funciona con bastante confiabilidad, siempre y cuando calibremos los valores de K y S mediante pruebas de calibración con el modelo mismo, con resultados fáciles de obtener y de corroborar. Recomendamos calibrar, primero el valor de la permeabilidad K; mediante una prueba de flujo establecido, en la cual lleguemos a los valores del régimen establecido por medio del método numérico, para así despejar y obtener el valor de K. Después se hará una o varias pruebas para calibrar el valor del coeficiente de almacenamiento S, de tal forma que los resultados analíticos coincidan con los medidos. Debe aclararse que este valor de S, que para nuestro caso fue de 0.021, no es el que se presenta en las pruebas de campo, y cae fuera de los valores de S comunes para acuíferos libres que están entre 0.1 y 0.3. Lo anterior implica, que al parecer, el método amortigua.

Es importante hacer notar que el número de Reynolds para estar en régimen laminar según Juárez Badillo debe ser menor que 1; sin embargo según Custodio, puede ser incluso menor a 10, lo que le proporciona mayor rango. En nuestro caso el número de Reynolds más crítico que obtuvimos fue:

$$R = \frac{v D}{\nu} = \frac{0.12 \times 0.4}{0.01} = 4.8$$

y se calculó con un diámetro de las partículas más grandes, de 0.4 cm y para el primer intervalo de cálculo de la Bajada, donde tenemos que la altura piezométrica, cae de 10.94 a 2.31 cm. En los siguientes inter-

valos, el número de Reynolds disminuye bastante, además aunado a que la configuración medida y la calculada tienen la misma forma, deducimos que estamos en flujo laminar y que el problema no es aquí, sino como ya habíamos dicho, en que el método amortigua.

Ademas de la calibración de los anteriores valores, podemos experimentar cambiando los valores de θ y Δt , sin embargo se ha visto que estos valores no afectan en demasía. Lo que sí es importante tener en cuenta, es que el valor de θ sea mayor a 0 para no caer en el caso explícito, que es muy inferior al implícito en lo que a tolerancia de Δt respecta.

BIBLIOGRAFIA

"Mecánica de Suelos" Tomo III
Juárez Badillo - Rico Rodríguez
Editorial Limusa, México

"Hidráulica General" Volumen I
Gilberro Sotelo Avila
Editorial Limusa, México

"Solución de la Ecuación Diferencial para Flujo en Medios Porosos"
María del Rosío Ruiz Urbano
México

"Geohydrology"
Roger J. M. De Wiest
John Wiley & Sons, Inc, New York

"Hidrología Subterránea"
Emilio Custodio - Manuel Ramón Llanos
Ediciones Omega S. A., Barcelona

"Apuntes de Métodos Numéricos"
Rafael Iriarte - Hugo Borrás - Rossynela Duran
Facultad de Ingeniería, México