

BIBLIOTECA

T  
622.3382  
NUN



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE GEOLOGIA, MINAS Y PETROLEOS

FACULTAD GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEO

"APLICACION DEL METODO IMPLICITO DE DIRECCION  
ALTERNANTE A UN MODELO DE CINCO PUNTOS"



TESIS DE GRADO

BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE

INGENIERO DE PETROLEO



DPTO. GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEOS

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE INFORMACIÓN BIBLIOTECARIO

No. DE INVENTARIO: D-67636  
VALOR: \$4.100  
CLASIFICACIÓN: 622.3382/NUN  
FECHA DE INGRESO: 12-10-86  
PROCEDENCIA:  
SOLICITADO POR: F.I.C.T.

POR:

RAFAEL NUÑEZ SATURNO

GUAYAQUIL-ECUADOR

SEPTIEMBRE, 1975

BIBLIOTECA



"APLICACION DEL METODO IMPLICITO DE DIRECCION  
ALTERNANTE A UN MODELO DE CINCO PUNTOS"

FACULTAD GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEO

DIRECTOR DE TESIS

AUTOR

ING. CARLOS J. ARNAO

RAFAEL NUÑEZ SATURNO



DPTO. GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEOS

BIBLIOTECA



FACULTAD GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEO

DECLARACION EXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad y que el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA - DEL LITORAL.

(Reglamento de Exámenes y títulos Profesionales de la ESPOL).



DPTO. GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEOS



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## AGRADECIMIENTO

A la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA  
DEL LITORAL que me ha proporcio-  
nado las facilidades para la cul-  
minación de esta profesión.

A los que durante mis años de estudio  
fueron mis profesores y que con sus  
enseñanzas me formaron moral e in-  
telectualmente.

A los profesores del Departamen-  
to de Ingeniería de Geología,  
Minas y Petróleos, que de una  
manera u otra han colaborado  
en la elaboración de esta te-  
sis.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

---

Al Ing. CARLOS J. ARNAO,  
Director de Tesis, quien  
con sus conocimientos me  
guió en forma acertada en  
el desarrollo de este traba  
bajo.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

A los compañeros del Centro de  
Computación que colaboraron  
en el desarrollo de los pro-  
gramas de Computación.

A Cecilia Pazmiño B.

---

## DEDICATORIA

*Con todo cariño:*

*a mis padres:*

RAFAEL NUNEZ Y.

GIOCONDA SATURNO M.

*los que desinteresadamente me  
han permitido durante tantos  
años formarme una profesión.*

*A mis hermanos:*

COSME Y JOSEFINA

MANUEL

PATRICIO Y ROSSANA

MARIO

JAIME

CARLOS

MONICA



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

*A mis sobrinos:*

ROSSANITA

JENNIFER

MARIUXI

JOHN

SALOMON

---

Con todo mi amor a "CHABY"  
quien siendo mi prometida  
primero y mi esposa ahora,  
con su comprensión y cariño  
me ha ayudado desde estudian  
te a seguir siempre adelante  
en mis estudios.



DPTO. GEOLOGIA  
MINAS Y PETROLEOS



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	1
RESUMEN	4
CAPITULO I	6
MODELO NUMERICO	20
A. El modelo Numérico	20
A.1. La ecuación diferencial	
B. El modelo Físico	22
B.1. Definición del modelo físico	23
C. Condiciones iniciales y de borde	25
D. Procedimiento para estudiar el comportamiento del modelo.	27
D.1. Cálculo de la presión	18
D.2. Cálculo del movimiento del frente	18
CAPITULO II	23
METODO IMPLICITO DE DIRECCION ALTERNANTE.	
A. Principio para la solución de ecuaciones diferenciales.	24
A.1. El sistema de malla	24
A.2. Las ecuaciones de flujo en diferencias finitas.	26



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL



	Pág.
B. El método Implícito	30
B.1. El ADIP aplicado a la ecuación de Laplace.	31
B.2. Chequeo de la convergencia	35
CAPITULO III	37
ESTRUCTURA Y SOLUCION DE LAS MATRICES RESULTANTES	
A. Estructura de las matrices	38
B. Solución de los sistemas de ecuaciones.	40
B.1. Aplicación del método de Thomas.	42
CAPITULO IV	44
PROGRAMA DE COMPUTADORA	
A. Proceso del programa	44
B. Diagramas de flujo	47
C. Programas	
CAPITULO V	
ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
A. Modelo con características homogéneas de su producto permeabilidad espesor.	80
B. Modelo con características heterogéneas de su producto permeabilidad - espesor.	82



BIBLIOTECA PICT  
ESPOL

	Pág.
CAPITULO VI	85
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	87
APENDICE A	88
APENDICE B	98
APENDICE C	100
APENDICE D	103
APENDICE E	106
APENDICE F	110
MONOGRAMAS	116
TABLAS	118
FIGURAS	158
BIBLIOGRAFIA	161



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## INTRODUCCION

Para todos nos es conocida la importancia que posee el petróleo, tanto en el campo energético como en el petroquímico, sus propiedades físico-químicas hacen de él un fluido muypreciado en este tiempo.

Los que estamos relacionados con la industria del petróleo y más específicamente con su explotación, conocemos que después de la Recuperación Primaria de este fluido, queda remanente dentro del yacimiento la mayor parte del volumen de petróleo que había inicialmente antes de empezar la explotación. Sabemos también que una parte de este petróleo remanente es posible recuperarlo aplicando una adecuada técnica de recuperación que recibe el nombre de Recuperación Secundaria. Esta última técnica consiste básicamente en inyección de algún fluido que puede ser agua, gas, polímeros, etc. para que estos vayan a ejercer una acción de "barrido" dentro del yacimiento, de tal manera que van a empujar el aceite que había quedado dentro del reservorio.

Con el fin de tener una más eficiente acción de barrido por parte del fluido inyectado, se han hecho estudios de desplazamiento y barrido en modelos de laboratorio. A

---

sumiendo que este comportamiento del fluido en el modelo, puede ser similar al que tendría el fluido que se inyecta en el reservorio, tendríamos una idea de la eficiencia del barrido y de esta manera podríamos estudiar la forma de mejorar la operación. Estos simuladores son de algunos tipos y entre otros tenemos: redes resistencia-capacitancia, modelos electrolíticos, rayos X, computadores analógicos, etc.

Una nueva herramienta para estudiar reservorios es la simulación numérica de yacimientos. En esta técnica de simular, primero se escriben las ecuaciones de flujo en forma de ecuaciones diferenciales parciales para cada una de las fases presentes en el reservorio, luego se expresan estas por sus aproximaciones en diferencias finitas. Una malla es colocada sobre el reservorio y a cada uno de los nodos de esta se les asigna los valores de porosidad, permeabilidad, saturación, espesor, elevación, presión. A los fluidos se les asigna valores de viscosidad, factor volumétrico, solubilidad, densidades, compresibilidades. A la roca se le asignan valores de compresibilidad. Se asigna valores de tasas de flujo en los pozos para el fluido que se produce y de esta manera podemos hacer una predicción del comportamiento de los fluí-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

dos por medio de un modelo matemático.

Los métodos para resolver las ecuaciones en diferencias finitas indicadas anteriormente, son diversos y nosotros hemos escogido el Método Implícito de Dirección - Alternante propuesto por Peaceman y Rachford en 1955. El método se lo encuentra explicado en el Capítulo II.

---

## RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una simulación matemática de la manera como fluye el fluido desplazante al ser inyectado dentro de un modelo de 5 pozos. Al modelo se le han asignado valores teóricos en su totalidad, pero pueden adoptársele valores reales de algún campo sin ningún inconveniente, siempre que se consideren las restricciones hechas.

Las ecuaciones diferenciales de flujo de fluidos se las ha desarrollado en sus aproximaciones por diferencias finitas, y estas a su vez han sido resueltas mediante el Método Implícito de Dirección alternante. Una vez que las presiones se han estabilizado en cada punto del modelo, se procede a seguir la trayectoria de cuenta puntos colocados alrededor del pozo inyector.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Las sucesivas posiciones que van teniendo estos puntos nos van indicando las posiciones del frente de barrido. El momento en que uno cualquiera de estos puntos llega al pozo productor se considera que se ha alcanzado la ruptura.

Este análisis ha sido hecho para diferentes valores de presión inicial, diferentes ratas de inyección y diferentes valores del producto permeabilidad-espesor.

Para realizar los cálculos del proceso se ha utilizado un computador IBM-1130. Esta labor acompañada de la entrada y salida de datos, la hemos hecho por medio de cuatro programas de computadora.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

---

# CAPÍTULO I

## MODELO NUMÉRICO

### A. EL MODELO NUMÉRICO<sup>(1)</sup>

Para poder presentar las características físicas que influyen en el desplazamiento de los fluídos sean estos a ceite, gas o agua, dentro de un reservorio, al emplear un modelo numérico es necesario que tomemos en conside-ración al menos dos importantes puntos.

a) Describir el proceso o cambios que van a realizarse dentro del yacimiento, por medio de una adecuada descripción de los mecanismos del reservorio, los cu-ales para su representación dentro del modelo matemático estarán dados en forma de ecuación diferencial básica.

b) Una definición precisa de las características físicas, la cual necesita que los datos obtenidos, exami-nados e interpretados presten la información suficiente para poder definir detalladamente las propiedades físicas de nuestro sistema en su totalidad.

#### A.1. LA ECUACION DIFERENCIAL<sup>(1,2)</sup>

Muchos tipos de fenómenos pueden ser simulados mate-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



máticamente por medio de modelos, cada uno de estos modelos ofrece ventaja sobre otros en cuanto a la ayuda que presta para poder realizar cierto tipo de estudio. Es así como la ecuación de flujo para fluidos ligeramente compresibles, sea esta en una, dos, o, tres dimensiones nos ofrecen muchas ventajas para estudiar el flujo de fluidos en reservorios.

Estos modelos se los puede utilizar para estudios como: problemas de un pozo (restauración de presión o caídas de presión con sistemas coordinado cartesiano o cilíndrico); calcular líneas de flujo en reservorios heterogéneos o en reservorios con cualquier arreglo de pozos; obtener modelos de flujo con razones de movilidad unitaria o hacer ajuste histórico en reservorios de aceite donde pequeños cambios de saturación han ocurrido.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

En nuestro caso haremos un estudio de modelos de flujo con una razón de movilidad igual a la unidad, por lo que una de las asunciones básicas hechas para los propósitos de este estudio es el de que una clara interfase entre el agua y el aceite es formada y un solo fluido, que puede ser agua o aceite está fluyendo respectivamente en la región predominantemente saturada de agua o pre

dominantemente saturada de aceite, dentro del reservorio.

La ecuación de flujo tridimensional para fluido ligeramente compresible, donde se desprecian los efectos de la gravedad y presión capilar, y se asume que los gradientes de presión en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son pequeños, es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \phi c \frac{\partial P}{\partial t} \quad I-1$$

Donde:

$P$  = Presión del fluido (atm)

$K_x$  = Permeabilidad en la dirección  $x$  (Darcy)

$K_y$  = Permeabilidad en la dirección  $y$  (Darcy)

$K_z$  = Permeabilidad en la dirección  $z$  (Darcy)

$\mu$  = Viscosidad (cp)

$\phi$  = Porosidad (adimensional)

$x, y, z$  = Distancia (cm.)

Para flujo en una dimensión, solo uno de los términos del lado izquierdo de la ecuación I-1 permanece, mientras que los otros dos son iguales a cero.

Para el caso de flujo bidimensional permanecen dos



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

términos del lado izquierdo de la ecuación I-1, mientras el otro es cero.

Nuestro estudio lo haremos en un modelo bidimensional, luego la ecuación diferencial básica que describirá la distribución de presión en el reservorio, para flujo monofásico a cada lado de la interfase será:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{\phi c \mu}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{I-2}$$

En la ecuación I-2 los efectos de gravedad son despreciables y los valores de permeabilidad, viscosidad, y espesor se los considera constantes.

Si extendemos la ecuación I-2 incorporando variación de la movilidad del fluido y el espesor  $h$  (cm) de la formación, tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \phi c h \frac{\partial P}{\partial t}$$



BIBLIOTECA FIC1  
ESPOL I-3

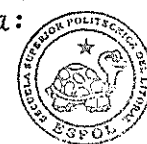
Para nuestro estudio en vista de que vamos a hacer el análisis del desplazamiento de un solo fluido; que en este caso es el agua, el cual suponemos que empuja al petróleo

leo que se halla bajo iguales condiciones físicas, como se lo expresó anteriormente, hacemos las siguientes restricciones:

- a) Que la movilidad del fluido desplazado y el fluido - desplazante, en este caso el aceite y el agua, respectivamente son iguales.
- b) Que los fluidos son incompresibles.
- c) Que la gravedad y presión capilar no afectan la forma del frente de invasión.
- d) Que la viscosidad es constante.

Luego considerando estas restricciones para la ecuación I-3, tendremos que esta se reduce a la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0$$



BIBLIOTECA FCT  
ESPOL

Que, es la ecuación de Laplace modificada para permitir el uso de coeficientes variables. De esta forma nosotros en nuestro estudio vamos a considerar variación del producto  $Kh$  en las direcciones  $x$  i  $y$ .

Si nosotros agregamos un término de inyección a la e-

ecuación I-4, vamos a tener:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{\mu q}{\Delta x \Delta y} = 0 \quad \text{I-5}$$

Donde  $q$  está dado en  $\text{cm}^3/\text{seg}$ .

La ecuación I-5 describe el flujo de régimen permanente o de estado continuo. La deducción de las ecuaciones presentadas hasta este momento en nuestro desarrollo del modelo numérico se encuentra en el Apéndice A.

## B. EL MODELO FISICO<sup>(1,3)</sup>

Basados en el hecho de que en la explotación de un yacimiento, sea este de petróleo o de gas un factor importante que incide en la recuperación final de los hidrocarburos (es decir en el volumen total a recuperarse durante la vida del reservorio), es el arreglo de pozos, teniendo en cuenta que dentro de estos arreglos el más utilizado es el de 5 pozos, especialmente cuando se trata de aplicar métodos de recuperación secundaria, o cuando se trata de hacer estudios de laboratorio como son: visualizados, res de fluido, electrolíticos, mallas RC, etc: nosotros hemos escogido el modelo de 5 puntos como el modelo físico

al cual vamos a aplicar nuestro modelo matemático.

### B.1. DEFINICION DEL MODELO FISICO

El modelo de 5 puntos no es otra cosa que un arreglo de 5 pozos, de los cuales 4 son inyectoras y uno es productor. El pozo productor se encuentra en el centro del arreglo y los cuatro inyectoras en las esquinas del cuadrado, que constituye el arreglo (Figura I-1).

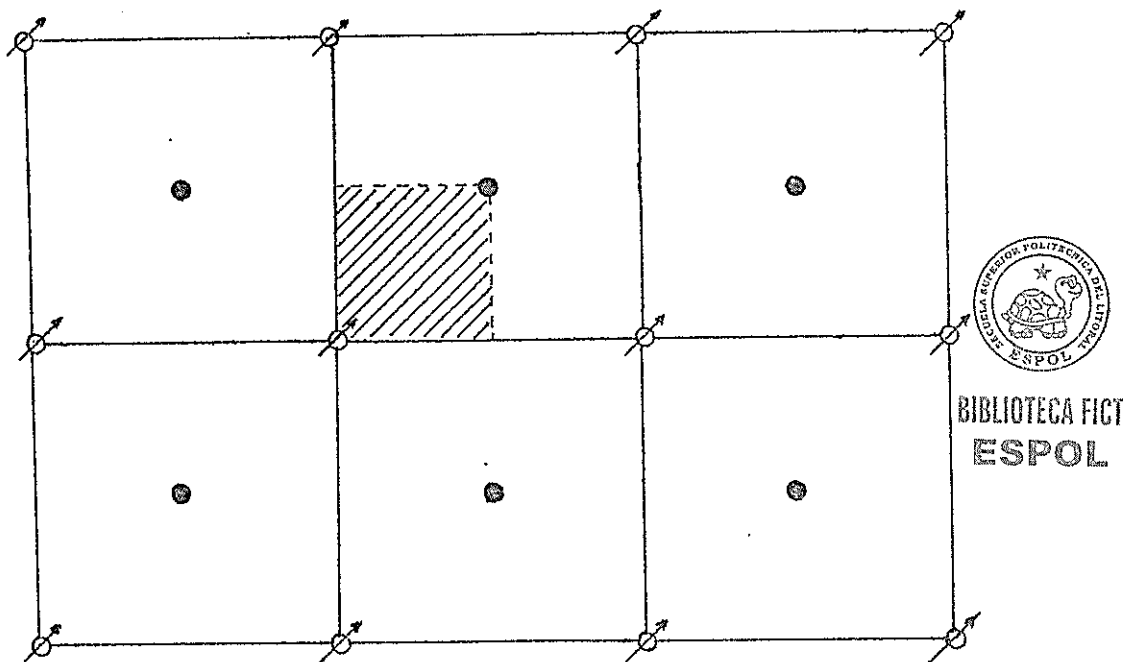


FIGURA I-1

Donde:

⊗ = Pozo inyector

● = Pozo productor

El modelo lo vemos ampliado en figura I-2

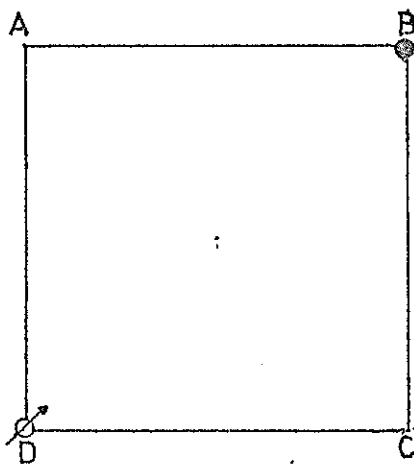


FIGURA I-2



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Aquí en este arreglo, la relación pozo inyector a pozo productor está dada por:

$$n = \frac{R P I}{R P P}$$

Donde:

RPI = Razón del pozo inyector.

RPP = Razón del pozo productor

Razón del pozo inyector es igual a uno dividido para el número de pozos productores que se encuentran influenciados por este.

Razón del pozo productor es igual a uno dividido para el número de pozos inyectores que lo influncian.

En este caso el valor de  $r$  es igual a 1.

Es en un modelo físico similar al que vemos en la figura I-2, en el que nosotros vamos a considerar características geológicas y petrofísicas que nos permitan aplicar nuestras ecuaciones de flujo.

Para nuestro estudio hemos hecho las siguientes asunciones para el modelo físico:

- a) Que las características geológicas y petrofísicas como: porosidad, permeabilidad, espesor, compresibilidad, temperatura, viscosidad, y saturaciones de los fluidos desplazante y desplazado, son homogéneas dentro del yacimiento.
- b) La cantidad de fluido que penetra en el yacimiento -



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



por un pozo inyector, es distribuido en partes iguales a los cuatro pozos productores que se hayan influenciado por este pozo. Además como se considera el medio poroso homogéneo, existirá simetría de flujo y el fluido no pasará en ningún momento de los límites del modelo que son: AB, BC, CD, y, DA en la figura I-2. Por lo tanto se asume que la permeabilidad es cero en estos límites.

c) La presión inicial es igual en todo el modelo.

Debemos indicar que para nuestro estudio de este modelo físico hemos considerado estas asunciones, pero también hemos ampliado el estudio considerando variación del producto permeabilidad-espesor, eso sí respetando las demás asunciones.

El punto b) nos permite hacer un estudio del modelo constituido por el pozo inyector y el pozo productor, sin que estos se vean influenciados por la acción de los demás pozos del arreglo. Además esta consideración nos da las condiciones de borde que necesita nuestro modelo matemático.

La consideración asumida en c) nos permite dar las condiciones iniciales a nuestro modelo y nos indica



que en el instante inicial no existe movimiento de fluído dentro del modelo.

Este estado de equilibrio será roto una vez que se empiece a inyectar fluído por el pozo inyector, pues esto hará que aumente la presión cerca de este pozo y por tanto empezará a haber desplazamiento de fluídos en la dirección de la menor presión.

### C. CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE

Será a la ecuación 1-5 que nosotros vamos a hallarle una solución y para ello es necesario dar a ésta condiciones iniciales y de borde.

Puesto que consideramos el estudio de un modelo que tiene su presión estabilizada en el instante inicial, vamos a tener que sus condiciones iniciales serán:



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$P(x, y, t) = P_i \text{ a } t = 0$$

Donde:

$P_i$  = Presión inicial.

Debido a las asunciones hechas para el modelo, las

condiciones de borde se ajustan a las del tipo Neumann y son las siguientes:

$$\frac{\partial P}{\partial x} (0, y) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} (L_1, y) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} (x, 0) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} (x, L_2) = 0$$

Donde:

$L_1$  = longitud del modelo en dirección x

$L_2$  = longitud del modelo en dirección y

En apéndice E, se tiene tipos de condiciones de borde.

#### D. PROCEDIMIENTO PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO<sup>(1)</sup>



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Para hacer un estudio del comportamiento de nuestro modelo los cálculos se los ha dividido en dos partes principales:

a) Cálculo de la presión en cada punto del modelo.

b) Cálculo del movimiento del frente de barrido.

### D.1. CALCULO DE LA PRESION

Necesitamos hallar una solución a la ecuación I-5 - que es la que constituye nuestro modelo, pero para ello nos valemos de la ecuación I-3 con un término de inyección añadido. Es decir que nosotros vamos a resolver esta última ecuación en vez de la I-5, por los motivos que damos a continuación.

La ecuación I-3 antes mencionada, nos permite obtener la distribución de presión en el reservorio en función del tiempo. Conforme transcurre este tiempo las presiones se irán estabilizando, hasta que en algún momento, en cualquier punto del reservorio estas ya no cambian con el tiempo, entonces se dice que el reservorio se encuentra estabilizado y se habla del estado "continuo" en el cual  $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ , lo que precisamente corresponde a una distribución de presión dada por I-5.

Se puede también por métodos numéricos semejantes al utilizado en este trabajo, encontrar una solución directa para la ecuación I-5.

### D.2. CALCULO DEL MOVIMIENTO DEL FRENTE

El problema se lo comienza colocando un número arbi-



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

trario de puntos en un pequeño círculo alrededor del pozo de inyección, luego el movimiento de cada punto es computado en forma de pasos durante todo el proceso del proyecto. En esta forma podemos obtener la localización del frente para un nivel de tiempo, uniendo todos los puntos correspondientes a ese nivel.

Por experiencias se ha encontrado que con más o menos 50 puntos se puede tener una correcta localización del frente, en casi todos los problemas.

Cuando la presión se ha estabilizado en el modelo y se tiene una distribución de la presión, podemos calcular los componentes de la velocidad en los sentidos  $x$  e  $y$ , en cada punto de intercepción de la malla que se ha superpuesto al modelo cuando se calculaban las presiones. Las fórmulas que utilizamos en el cálculo de las velocidades es la ley de Darcy:

$$v_x = \frac{K_x}{\phi \mu S_{od}} \frac{\Delta P_x}{\Delta x} \quad 1-6$$

$$v_y = \frac{K_y}{\phi \mu S_{od}} \frac{\Delta P_y}{\Delta y} \quad 1-7$$

Donde:

$v$  = velocidad real<sup>(6)</sup> (cm/seg)



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

$K$ = permeabilidad (Darcy)	$\phi$ = Porosidad
$\mu$ = viscosidad (cp)	$S_{od}$ = Saturación de aceite desplazable.
$\Delta P$ = cambio de presión (atm)	
$\Delta x$ o $\Delta y$ = cambio de longitud (cm)	

De entre las velocidades computadas se utiliza la máxima velocidad, para determinar un intervalo de tiempo que permita a cualquier punto desplazarse una especificada distancia máxima durante ese paso.

De esta manera se garantiza que el gradiente de velocidad local, no va a afectar la precisión del procedimiento trazado.

La forma de determinar la velocidad a la que algún punto se está moviendo, en cualquiera de las celdas de la malla, es por medio de una doble interpolación entre las velocidades en las cuatro esquinas de la celda. Esta interpolación la llevamos a efecto de la siguiente manera:

Conocemos que la velocidad en un plano bidimensional está dada por sus componentes en  $x$  i  $y$  de la forma:

$$v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}$$

Luego si tenemos cuatro velocidades localizadas en las esquinas de una de las celdas de la malla, como se ve en la Figura I-3:

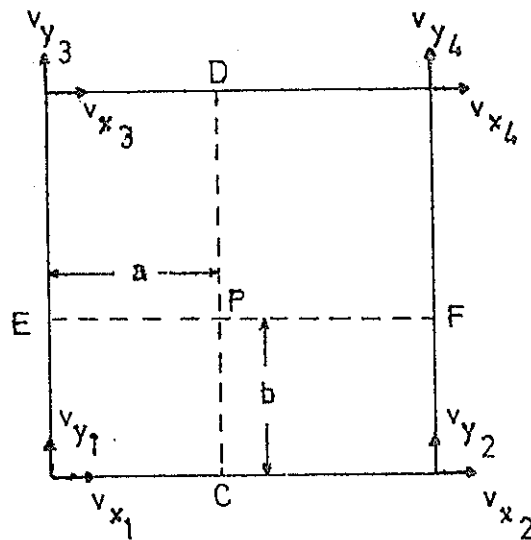


FIGURA I-3

Podemos determinar la velocidad de un punto P dentro de la celda al interpolar estas velocidades en las esquinas, basándonos en la fórmula de interpolación lineal:

$$v = \alpha v_b - (1 - \alpha)v_a \quad 1-9$$

Donde:

$v$  = velocidad en P

$v_a, v_b$  = velocidades entre las que va a interpolarse.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DEL ECUADOR  
ESPOL

$$\alpha = \frac{\text{distancia de } P \text{ a la posición de } v_a}{\text{distancia entre } v_a \text{ y } v_b}$$

Para un punto cualquiera  $P$  localizado dentro de la celda a un porcentaje de distancia  $a$  y  $b$  en sentidos  $x$  e  $y$  respectivamente, tendremos interpolando las velocidades de dos en dos:

Para velocidades en  $x$ :

$$v_{x_c} = av_{x_2} + (1 - a)v_{x_1}$$

Luego:

$$v_{x_D} = av_{x_4} + (1 - a)v_{x_3}$$

$$v_{x_P} = bv_{x_D} + (1 - b)v_{x_c}$$

Las velocidades en  $y$ :

$$v_{y_E} = bv_{y_3} + (1 - b)v_{y_1}$$

Luego:

$$v_{y_F} = bv_{y_4} + (1 - b)v_{y_2}$$

$$v_{y_P} = av_{y_F} + (1 - a)v_{y_E}$$

A continuación se obtiene las nuevas coordenadas del

I-10



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

I-11



punto, multiplicando los componentes de la velocidad por el intervalo de tiempo y sumando este producto a las coordenadas que tenían en el nivel de tiempo anterior. Esto se consigue con las fórmulas:

$$x_{t+1} = x_t + v_{x,t} \Delta t \quad \text{I-12}$$

$$y_{t+1} = y_t + v_{y,t} \Delta t \quad \text{I-13}$$

Cada punto es movido a su nueva posición y esta es comparada con las coordenadas del pozo de producción. Si cualquier punto penetra dentro de un radio especificado alrededor de cualquier pozo de producción, se considera que se ha llegado a la ruptura. En este momento el cálculo del avance del frente.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## CAPITULO II

### METODO IMPLICITO DE DIRECCION ALTERNANTE

#### A. PRINCIPIOS PARA LA SOLUCION DE ECUACIONES DIFERENCIALES

Las ecuaciones diferenciales como la I-3 o como la I-5 cuyos coeficientes son variables, son ecuaciones de tipo no lineal y no pueden ser resueltas por métodos analíticos conocidos, excepto para casos muy especiales.

Para resolver modelos matemáticos que no son otra cosa que ecuaciones matemáticas, existen dos técnicas disponibles:

##### a) Métodos Convencionales

Consisten en usar suposiciones simplificadoras de las ecuaciones de flujo o reemplazarlas por otras ecuaciones más sencillas y resolverlas luego por medio de métodos analíticos.

Así para las ecuaciones de flujo se puede asumir que los coeficientes son constantes y se simplifica su resolución.

##### b) Métodos Numéricos

Consisten en aproximar las ecuaciones de flujo por di



BIBLIOTECA FICT

ESPOL

ferencias finitas y luego resolver estas ecuaciones de diferencias usando cualquiera de las técnicas para solución de este tipo de ecuaciones.

Estas técnicas de solución de ecuaciones de diferencias son variados, pero se trata siempre de escoger un método que nos ahorre tiempo de computación, nos proporcione resultados más precisos y nos garantice estabilidad<sup>(5)</sup> de la solución bajo las condiciones que demos a la ecuación.

#### A.1. EL SISTEMA DE MALLA

En los trabajos de reservorio se acostumbra a utilizar uno de los dos tipos de mallas siguientes: los de bloque centrado, en los cuales el punto se lo considera en el centro del bloque; y los de punto (no de bloque) en cada unión de las líneas del entrejado. Una explicación sobre estos tipos de mallas las tenemos en el Apéndice D.

Además de que la superposición de la malla en el reservorio, nos permite obtener un esqueleto de referencia para definir características físicas en cada punto del yacimiento, nos hace posible escribir la ecuación

de flujo para cada nodo que se encuentra dentro del reservorio, y de esta manera obtenemos un sistema de ecuaciones que al ser resueltos por métodos que veremos posteriormente. La solución de este sistema de ecuaciones nos dá valores puntuales para la presión, lo que significa que en vez de hallar una solución continua, hemos encontrado una solución discreta, ya que los valores de presión estarán dados en el nodo o en el centro de la celda, dependiendo del tipo de malla. Un ejemplo de malla sobre un reservorio lo tenemos en Fig. II-1.

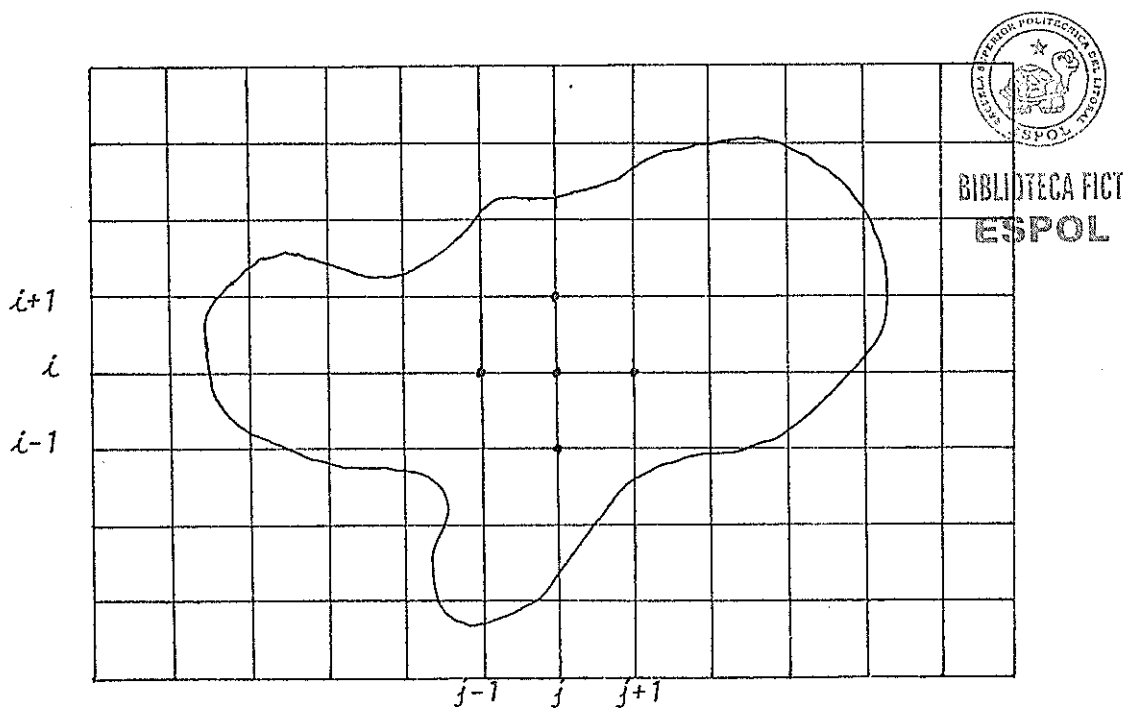


FIGURA II-1

pudiendo cambiárselos según las necesidades de precisión y las técnicas de solución y computación nos permitan. Valores grandes de  $\Delta x$  o  $\Delta y$  aumentan el error de truncación, mientras que valores muy pequeños para  $\Delta t$  aumentan el tiempo de cálculo.

Para nuestro estudio hemos supuesto al modelo físico un tipo de malla con el de la Fig. N y M el número de intervalos en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente. Estos intervalos tienen una longitud  $\Delta x = \Delta y$ .

#### A.2. LAS ECUACIONES DE FLUJO EN DIFERENCIAS FINITAS

Consideremos la ecuación de difusividad en dos dimensiones 1-2 (en unidades de campo):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{\phi \mu c}{6.328} \frac{\partial P}{\partial t}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

La igualdad 1-2 es una ecuación diferencial de tipo parabólico<sup>(4)</sup> (una explicación sobre tipos de ecuaciones diferenciales la tenemos en apéndice B). Si en esta ecuación consideramos variación del producto permeabilidad - espesor y le agregamos un término de inyección, tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kh \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Kh \frac{\partial P}{\partial y}) - \frac{\mu q}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{II-1}$$

Según se ve en apéndice C, las derivadas pueden ser reemplazadas por su aproximación en diferencias finitas. Es así como para un punto  $i, j$  (Figura II-2), tendremos que:

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kh \frac{\partial P}{\partial x}) = \frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j})}{\Delta x} - \frac{(Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (Kh \frac{\partial P}{\partial y}) = \frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j})}{\Delta x} - \frac{(Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{\Delta y}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n}{\Delta t}$$

En estas expresiones  $n$  y  $n+1$  representan dos niveles sucesivos de tiempo cuya diferencia es  $\Delta t$ , y los subíndices  $i + 1/2$ ,  $i - 1/2$ ,  $j + 1/2$ ,  $j - 1/2$  nos indican posición entre los nodos.

Donde:

□ = Permeabilidad-espesor en sentido  $x$ .

○ = Permeabilidad-espesor en sentido  $y$ .

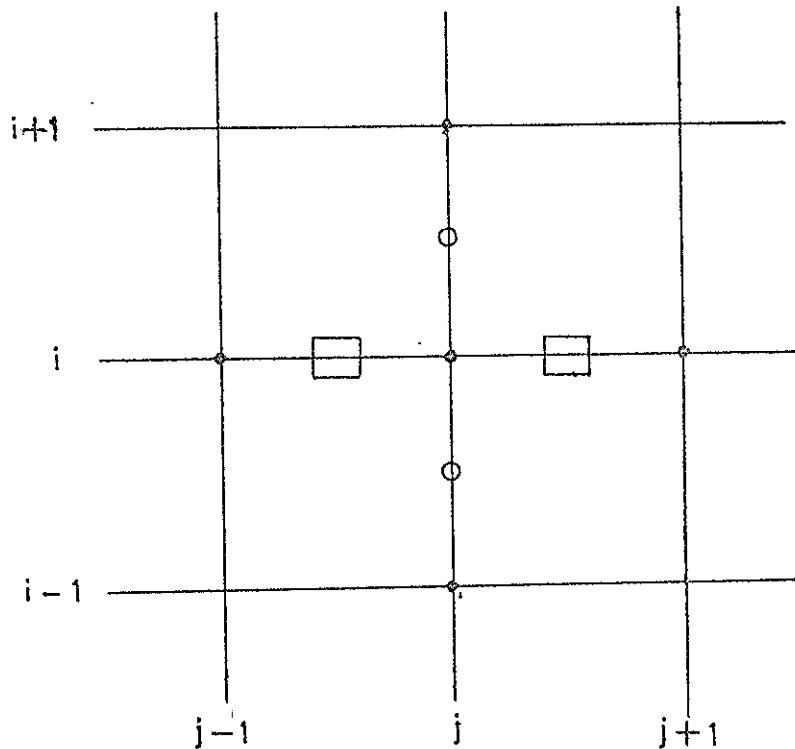


FIGURA II-2

BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Reemplazando las derivadas por sus aproximaciones en diferencias dentro de la ecuación II-1, tendremos:

$$\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j})}{\Delta x} - \frac{(Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{\Delta x} +$$

$$\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j})}{\Delta y} - \frac{(Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{\Delta y}$$

$$\frac{\mu q_{i,j}}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n)}{6.328 \Delta t} \quad \text{II-2}$$

Entonces:

Donde:

$i$  = número de la fila

$j$  = número de la columna

$\Delta x$  = distancia entre dos nodos en una fila

$\Delta y$  = distancia entre dos nodos en una columna

De esta manera las ecuaciones de diferencias se las define con respecto al espacio coordinado solo en los puntos  $(x_i, y_i)$ ; llamando:

$$x_j = j \Delta x \quad 0 < j < N$$

$$y_i = i \Delta y \quad 0 < i < M$$

$N$  = Número de intervalos de espacio en  $x$ .

$M$  = Número de intervalos de espacio en  $y$ .



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Y el tiempo lo definimos solo en los valores discretos dados por:

$$t_m = \sum_{n=0}^m \Delta t_n$$

Donde:

$t_n$  = intervalos de tiempo

Los valores que demos a  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$  son arbitrarios



$$\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} +$$

$$\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} -$$

$$\frac{\mu q_{i,j}}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n}{\Delta t} \quad \text{II-3}$$

La ecuación I-5 en su forma de aproximación por diferencias finitas, tendrá la forma de II-3, con su segundo miembro, igual a cero.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## B. EL METODO IMPLICITO

Los métodos implícitos de dirección alternante (ADIP) han recibido extensas discusiones y usos en la industria del petróleo<sup>(1,5)</sup>. Estos métodos son los que más se utilizan cuando se desea resolver ecuaciones de simulación para flujo de fluidos, pero debemos indicar que la generalidad en su utilización no hace que ellos sean más económicos para todos los tipos de problemas. El método más eficiente en el presente para regiones rectangulares es u no propuesto por Peaceman y Rachford<sup>(7)</sup> en 1.955.

Se han hecho estudios numéricos y estas parecen indicar que se lo puede utilizar con ventajas bajo condiciones muy generales de borde, pero no se podría decir que aquí tenga la misma superioridad que posee sobre los otros métodos alternantes como la tiene en regiones rectangulares<sup>(4)</sup>.

### B.1. EL ADIP APLICADO A LA ECUACION DE LAPLACE<sup>(1)</sup>

Como se vió en el capítulo I, nuestro modelo matemático lo constituye la ecuación I-5, la cual es una forma modificada de la ecuación de Laplace.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

La ecuación de Laplace es resuelta por el ADIP en una forma iterativa, en la que los viejos valores de presión son reemplazados por nuevos valores más refinados sucesivamente. Esto se realiza hasta que converja a la solución para algún valor de exactitud deseado. Ha sido demostrado que este procedimiento requiere más o menos  $2 \ln N/N$  operaciones numéricas como mucho para resolver la ecuación de Laplace. Siendo  $N^2$  el número de puntos en el modelo.

Básicamente el ADIP es un proceso de dos pasos que requiere dos ecuaciones a diferencia de la una usual.

Cuando se utiliza el ADIP para resolver la ecuación de Laplace, cada paso de iteración es considerado como un paso de tiempo de un correspondiente estado inestable.

Es decir que el ADIP resuelve la ecuación de estado continuo, como si se tratara de un problema de estado i nestable en cada paso de tiempo.

Luego si consideramos la ecuación II-1

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kh \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Kh \frac{\partial P}{\partial y}) - \frac{\mu q}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{\partial P}{\partial t}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

El ADIP requerirá como primer paso que una de las derivadas las reemplacemos por su aproximación en diferencias finitas expresada en función de valores desconocidos de presión, que se hallan a un tiempo  $n+1$  mientras que la otra derivada es reemplazada por su aproximación en diferencias finitas expresada en función de los valores de presión conocidos que se hallan en un tiempo  $n$ .

El segundo paso es desarrollado en una forma similar, pero esta vez reemplazados los valores desconocidos de presión que se hallan ahora a un tiempo  $n+2$  en la deri-

vada cuyos valores se suponían conocidos en el primer -  
paso, es decir cambiando las posiciones de las derivadas  
con respecto a los valores conocidos y desconocidos de  
presión.

Luego, para resolver nuestro modelo matemático haremos  
uso de la ecuación II-3, a dos niveles diferentes de  
tiempo. Así tenemos:

$$\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} \quad \begin{matrix} n+1 \\ + \end{matrix}$$

$$\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} \quad \begin{matrix} n \\ + \end{matrix}$$

$$\frac{\mu q_{i,j}^n}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n)}{6.328 \Delta t}$$



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL  
II-4

y

$$\frac{(Kh)_{i+1/2,j} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j} (P_{i,j} - P_{i-1,j})}{(\Delta y)^2} \quad \begin{matrix} n+2 \\ + \end{matrix}$$

$$\frac{(Kh)_{i,j+1/2} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2} (P_{i,j} - P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} \quad \begin{matrix} n+1 \\ - \end{matrix}$$

$$\frac{\mu q_{i,j}^{n+1}}{1.127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi \mu c h (P_{i,j}^{n+2} - P_{i,j}^{n+1})}{6.328 \Delta t}$$

II-5

Si tenemos que  $\Delta x = \Delta y$ , multiplicando ambas ecuaciones en sus dos miembros por  $\Delta x^2$ , y consideramos  $\frac{\phi \mu c h}{6.328} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} = \gamma$  trasponiendo los términos del segundo miembro al primero, tendremos:

$$\left| (Kh)_{i,j+1/2} P_{i,j+1} - \left[ (Kh)_{i,j+1/2} + (Kh)_{i,j-1/2} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i,j-1/2} P_{i,j-1} \right|^{n+1} +$$

$$\left| (Kh)_{i+1/2,j} P_{i+1,j} - \left[ (Kh)_{i+1/2,j} + (Kh)_{i-1/2,j} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i-1/2,j} P_{i-1,j} \right|^n -$$

$$\frac{q_{i,j}^n}{1.127} = 0 \quad \text{II-6}$$

$$\left| (Kh)_{i+1/2,j} P_{i+1,j} - \left[ (Kh)_{i+1/2,j} + (Kh)_{i-1/2,j} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i-1/2,j} P_{i-1,j} \right|^{n+2}$$

$$\left| (Kh)_{i,j+1/2} P_{i,j+1} - \left[ (Kh)_{i,j+1/2} + (Kh)_{i,j-1/2} \right] \gamma P_{i,j} + (Kh)_{i,j-1/2} P_{i,j-1} \right|^{n+1} -$$

$$\frac{q_{i,j}^{n+1}}{1.127} = 0 \quad \text{II-7}$$



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

El factor  $\gamma$  es llamado parámetro de interacción (factor para acelerar la convergencia)<sup>7</sup>.

Bajo ciertas condiciones las formas en diferencias finitas sean estas expresadas explícita o implícitamente, son

convergentes. El término convergente nos sirve para dar a entender que la solución exacta de la ecuación en diferencia finita (en ausencia de error de redondeo) tiende a la solución de la ecuación diferencial parcial cuando los incrementos en espacio y tiempo tienden a cero.

Para obtener mayor rapidez de convergencia es necesario usar un ciclo de valores de  $\gamma$ .

Para la ecuación de Laplace en una región cuadrada, la óptima<sup>(8)</sup> convergencia ocurre cuando  $\gamma$  está dado por la secuencia de valores:

$$\gamma = 4 \operatorname{Sen}^2 \frac{K \Pi}{2 n} \quad (K = 1, 2, 3, \dots, N-1)$$

Donde:

$n$  es el número de incrementos en que se ha dividido el lado del cuadrado.

## B. 2. CHEQUEO DE LA CONVERGENCIA

Un chequeo en el progreso del cálculo de la presión puede ser obtenido resolviendo la ecuación II-8 para cada punto en el modelo después de cada interacción.



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

$$(Kh)_{i,j+1/2}(P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (Kh)_{i,j-1/2}(P_{i,j} - P_{i,j-1}) +$$

$$(Kh)_{i+1/2,j}(P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (Kh)_{i-1/2,j}(P_{i,j} - P_{i-1,j}) -$$

$$q_{i,j} = \delta$$

II-8

Donde el valor de  $\delta$  es elevado al cuadrado y acumulado para todos los puntos de la malla. Como la solución correcta requiere que  $\delta$  sea cero para cada punto en la malla, el procedimiento nos dará una manera conveniente de almacenar el progreso de los cálculos. La computación puede considerársela completa cuando el cambio en la magnitud de este número se convierte en insignificante.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

CAPITULO III  
ESTRUCTURA Y SOLUCION DE LAS MATRICES  
RESULTANTES

Para resolver la distribución de presión en el modelo vamos a seguir el procedimiento siguiente<sup>(1)</sup>.

a) La ecuación II-6 se la escribirá fila por fila en cada punto en el modelo. De esto nos va a resultar un conjunto de ecuaciones simultáneas, las cuales pueden ser arregladas dentro de una matriz tridiagonal, la cual a su vez puede ser resuelta por alguna técnica de eliminación.

b) Similarmente, luego de haberse completado el cálculo de la presión para todas las filas del modelo, la ecuación II-7 se la escribe columna por columna para cada punto en el modelo. El conjunto de ecuaciones simultáneas resultantes será resuelto para nuevos valores de presión a través del modelo, como en el paso previo. Los valores de presión calculados en el primer paso se convierten en valores conocidos para el segundo paso y viceversa.

Estos dos pasos anteriormente explicados, completan un paso de iteración; y su secuencia de operaciones es repe



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



tida durante el tiempo necesario para alcanzar la convergencia.

#### A. ESTRUCTURA DE LAS MATRICES

Escribimos la ecuación II-6 en la forma:

$$(A_j P_{i,j-1} + B_j P_{i,j} + C_j P_{i,j+1})^{n+1} = D_j \quad \text{III-1}$$

Donde:

$$A_j = (Kh)_{i,j-1/2}$$

$$B_j = - (Kh)_{i,j-1/2} + (Kh)_{i,j+1/2} + \gamma$$

$$C_j = (Kh)_{i,j+1/2}$$

$$D_j = q_{i,j}^n - \left| (Kh)_{i-1/2,j} P_{i-1,j} - \gamma \right| (Kh)_{i-1/2,j} + (Kh)_{i+1/2,j} P_{i,j} + (Kh)_{i+1/2,j} P_{i+1,j} \Big| ^n$$

Luego reemplazando la ecuación III-1 para los  $n+1$  puntos a lo largo de una fila tendremos un conjunto de ecuaciones simultáneas; así para cualquier fila "i" el sistema será:

$$\begin{aligned} A_1 P_{i,0} + B_1 P_{i,1} + C_1 P_{i,2} &= D_1 \\ A_2 P_{i,1} + B_2 P_{i,2} + C_2 P_{i,3} &= D_2 \\ &\vdots \\ A_{n+1} P_{i,n} + B_{n+1} P_{i,n+1} + C_{n+1} P_{i,n+2} &= D_{n+1} \end{aligned} \quad \text{III-2}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

En el cual los términos  $A_1 P_{i,0}$  y  $C_{n+1} P_{i,n+1}$  son siempre cero (debido a las condiciones de borde).

Luego el sistema de ecuaciones III-2 se reduce a:

$$\begin{aligned} B_1 P_{i,1} + C_1 P_{i,2} &= D_1 \\ A_2 P_{i,1} + B_2 P_{i,2} + C_2 P_{i,3} &= D_2 \\ &\vdots \\ A_{n+1} P_{i,n} + B_{n+1} P_{i,n+1} &= D_{n+1} \end{aligned} \quad \text{III-3}$$

Igualmente escribimos la ecuación II-7 en la forma:

$$(A_i P_{i-1,j} + B_i P_{i,j} + C_i P_{i+1,j})^{n+2} = D_i \quad \text{III-4}$$

Donde:

$$A_i = (Kh)_{i-1/2,j}$$

$$B_i = - (Kh)_{i-1/2,j} + (Kh)_{i+1/2,j} \cdot \gamma$$

$$C_i = (Kh)_{i+1/2,j}$$

$$D_i = q_{i,j}^{n+1} - \left[ (Kh)_{i,j-1/2} P_{i,j-1} - (Kh)_{i,j-1/2} + (Kh)_{i,j+1/2} - j P_{i,j} + (Kh)_{i,j+1/2} P_{i,j+1} \right]^{n+1}$$

Si desarrollamos la ecuación III-4 para los  $M+1$  pun



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

tos a lo largo de una columna, tendremos así mismo otro conjunto de ecuaciones simultáneas; entonces para cualquier columna "j" el sistema será:

$$\begin{aligned}
 A_1 P_{0,j} + B_1 P_{1,j} + C_1 P_{2,j} &= D_1 \\
 A_2 P_{1,j} + B_2 P_{2,j} + C_2 P_{3,j} &= D_2 \\
 &\vdots \\
 A_{m+1} P_{m,j} + B_{m+1} P_{m+1,j} + C_{m+1} P_{m+2,j} &= D_{m+1}
 \end{aligned}
 \tag{III-5}$$

En el cual los términos  $A_1 P_{0,j}$  y  $C_{m+1} P_{m+2,j}$  son siempre cero (debido a las condiciones de borde).

Luego el sistema de ecuaciones III-5 se reduce a:

$$\begin{aligned}
 B_1 P_{1,j} + C_1 P_{2,j} &= D_1 \\
 A_2 P_{1,j} + B_2 P_{2,j} + C_2 P_{3,j} &= D_2 \\
 &\vdots \\
 A_{m+1} P_{m,j} + B_{m+1} P_{m+1,j} &= D_{m+1}
 \end{aligned}
 \tag{III-6}$$



BIBLIOTECA FICTI  
ESPOL

III-6

## B. SOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ECUACIONES

Los sistemas de ecuaciones<sup>(9)</sup> que resultan de las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales parciales,

puede ser resuelto por una variedad de métodos que pueden ser clasificados como directos o iterativos. Los métodos directos son más eficientes que los iterativos cuando el número de ecuaciones es relativamente pequeño. En la mayoría de los casos el uso de un método directo, necesitará que se escriba la matriz de los coeficientes y esto puede representar un gran trabajo si se lo hace manualmente. Un programa de computadora puede ser escrito para que genere las matrices de los coeficientes y constantes usando la ecuación general en diferencias finitas. Una vez que tenemos disponible la matriz de los coeficientes, el método de eliminación de Gauss puede ser utilizado para obtener una solución.

Si el sistema es tridiagonal, no es necesario generar todos los valores en la matriz de los coeficientes y se puede utilizar una variación del método de eliminación de Gauss, al cual se lo denomina método de ~~eliminación~~ de Thomas.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Al aplicarse el método de eliminación de Gauss, para resolver un sistema de  $n$  ecuaciones con  $n$  valores desconocidos, este requerirá aproximadamente  $n^3/3$  multiplicaciones además de otras operaciones aritméticas.

Por otra parte si el sistema de ecuaciones es tridiagonal, usando el método de Thomas para resolver igual número de ecuaciones, requerirá como máximo  $5n$  multiplicaciones y  $3n$  sumas. Para este caso de tener un sistema tridiagonal, un método iterativo necesitará más tiempo de multiplicación y de sumas que el método de Thomas.

### B.1. APLICACION DEL METODO DE THOMAS

El sistema de ecuaciones III-3 puede ser resuelto usando las siguientes relaciones del método de Thomas:

$$P_{i,n+1} = g_{n+1}$$

$$P_{i,j} = g_j - \frac{C_j P_{i,j+1}}{w_j} \quad (1 < j < n)$$

Donde:

$$w_1 = B_1$$

$$w_j = B_j - \frac{A_j C_{j-1}}{w_{j-1}} \quad (2 < j < n+1)$$

$$g_1 = \frac{D_1}{w_1}$$

$$g_j = \frac{D_j - A_j g_{j-1}}{w_j} \quad (2 < j < n+1)$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

De la misma manera, el sistema de ecuaciones III-6 puede ser resuelto, usando:

$$P_{m+1,j} = g_{m+1}$$

$$P_{i,j} = g_i - \frac{C_i P_{i+1,j}}{w_i} \quad (1 < i < m)$$

Donde:

$$w_1 = B_1$$

$$w_i = B_i - \frac{A_i C_{i-1}}{w_{i-1}} \quad (2 < i < m+1)$$

$$g_1 = \frac{D_1}{w_1}$$

$$g_i = \frac{D_i - A_i g_{i-1}}{w_i} \quad (2 < i < m+1)$$

Las relaciones usadas en las soluciones de los sistemas tridiagonal es III-3 y III-6 se las encuentra de mostradas en el Apéndice F.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## CAPITULO IV

### PROGRAMA DE COMPUTADORA

#### A. PROCESO DEL PROGRAMA

El programa de computadora que nos ha servido para realizar primeramente los cálculos de las presiones y luego la determinación de las distintas posiciones del frente, los hemos dividido en cuatro subprogramas, debido a razones técnicas, y los hemos denominado: Programa N° 1, Programa N° 2, Programa N° 3, Programa N° 4.

#### PROGRAMA N° 1

Este programa nos permite grabar en un disco magnético los datos de permeabilidad - espesor y de ratas de flujo, en las direcciones  $x$  e  $y$ , para cada nodo de la malla. Los datos proporcionados al programa son:

$N$  = Número de intervalos en dirección  $x$ .

$M$  = Número de intervalos en dirección  $y$ .

$K_{HH}$  = Permeabilidad-espesor en dirección  $x$ .

$K_{HV}$  = Permeabilidad-espesor en dirección  $y$ .

$Q$  = Rata de flujo en dirección  $x$

$Q$  = Rata de flujo en dirección  $y$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## PROGRAMA N° 2

Este programa, nos permite hacer un cálculo de las presiones sucesivamente hasta alcanzar el estado continuo. Utiliza como datos los valores grabados por el programa anterior y:

$N$  = Número de intervalos en dirección  $x$ .

$M$  = Número de intervalos en dirección  $y$ .

$DX$  = Longitud de los intervalos en la dirección  $x$ .

$DY$  = Longitud de los intervalos en la dirección  $y$ .

$VIS$  = Viscosidad del fluido desplazante.

Los valores de presión calculados para cada nodo en el momento de alcanzar el estado continuo son grabados en un disco magnético.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## PROGRAMA N° 3

Este programa nos permite escribir las características del modelo (incluidos los datos de permeabilidad-espesor grabados por el primer programa) y además los valores de presión calculados para cada nodo en el momento de alcanzar el estado continuo grabados por el Programa N° 2.

Utiliza además de los datos de permeabilidad-espesor



y de presiones estabilizadas, los valores:

$N$  = Número de intervalos en dirección  $x$ .

$M$  = Número de intervalos en dirección  $y$ .

$\Delta LTX$  = Longitud de los intervalos, tanto en dirección  $x$  como en dirección  $y$ .

$VIS$  = Viscosidad del fluido desplazante

$POR$  = Porosidad de la formación

$SOD$  = Saturación de aceite desplazable

$Q$  = Ratas de flujo

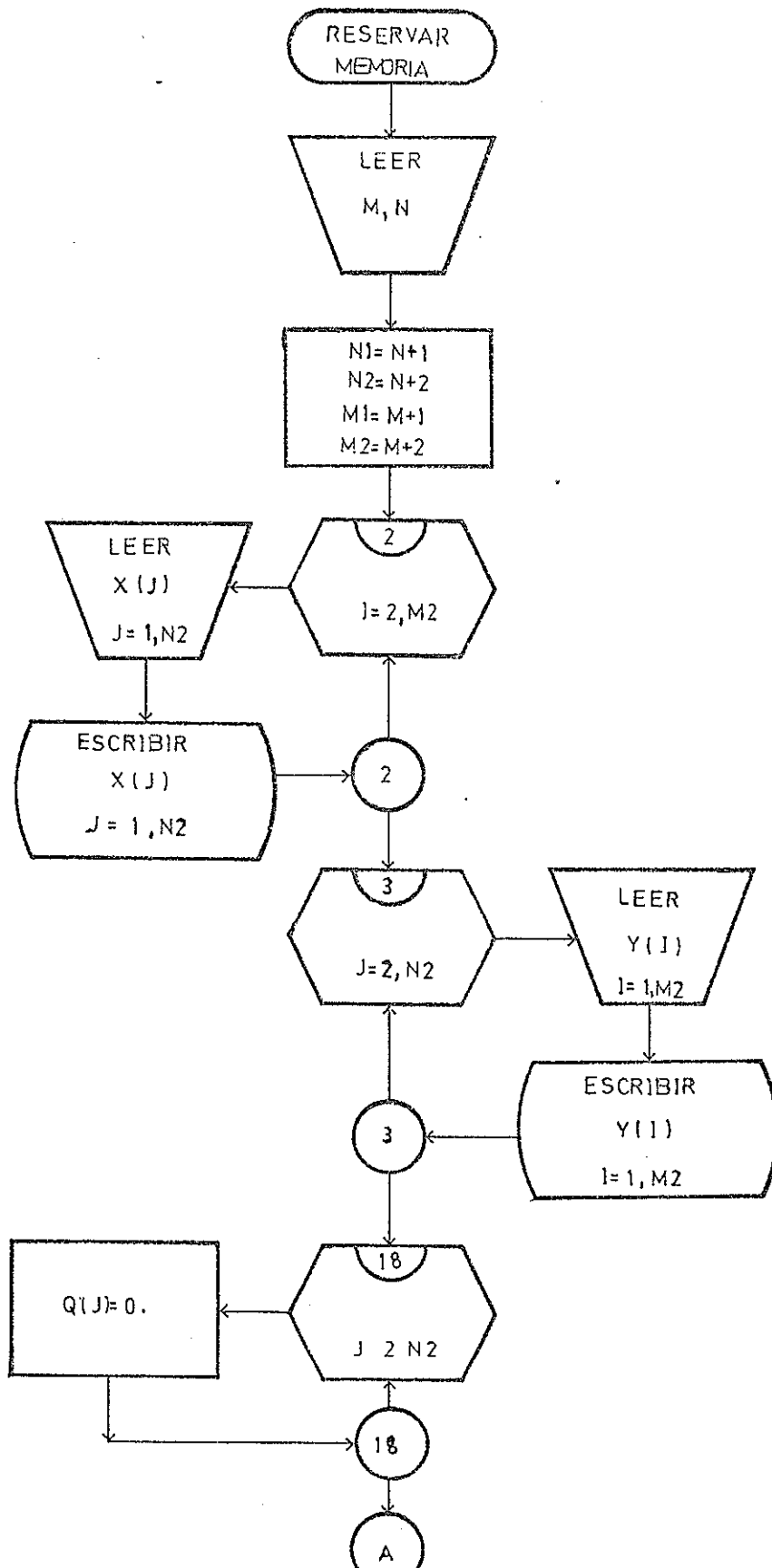
$H$  = Espesor de la formación

#### PROGRAMA N°4

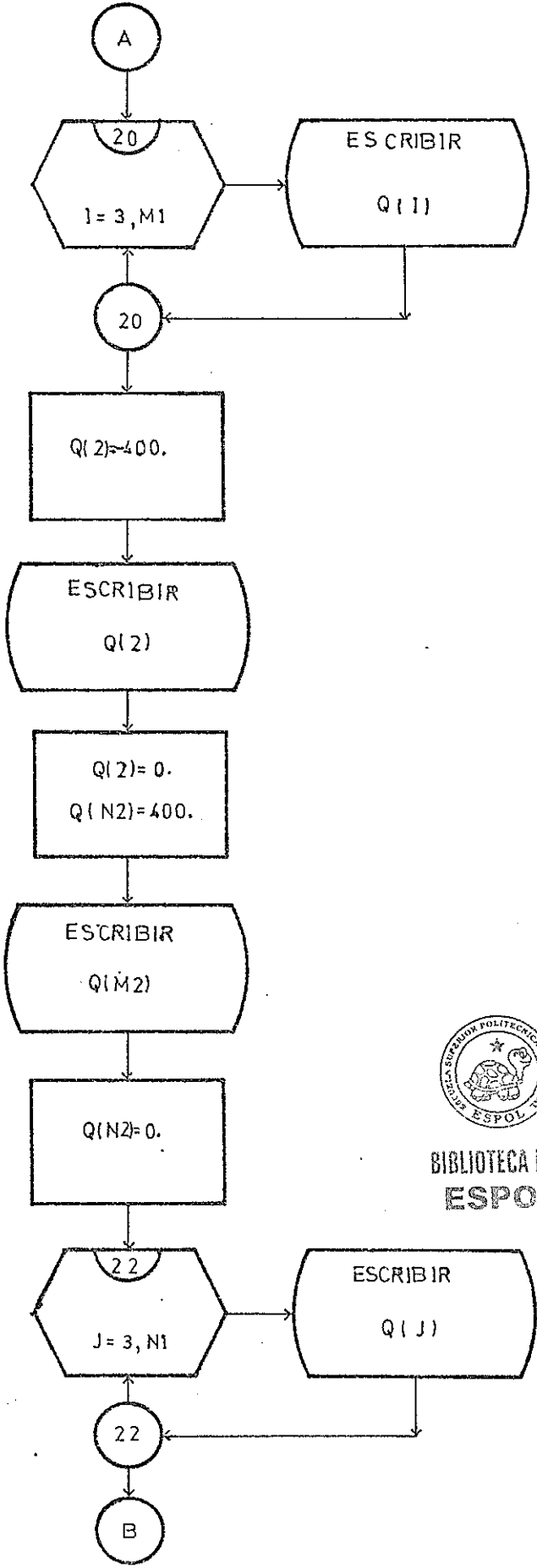
Este programa nos permite calcular las diferentes posiciones del frente de invasión hasta el momento en que se produce la ruptura. Utiliza los mismos datos que el Programa N° 3.



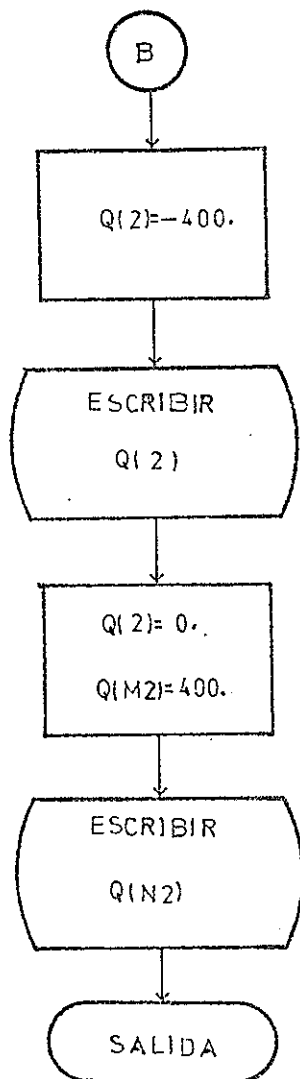
BIBLIOTECA FIC1  
ESPOL



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

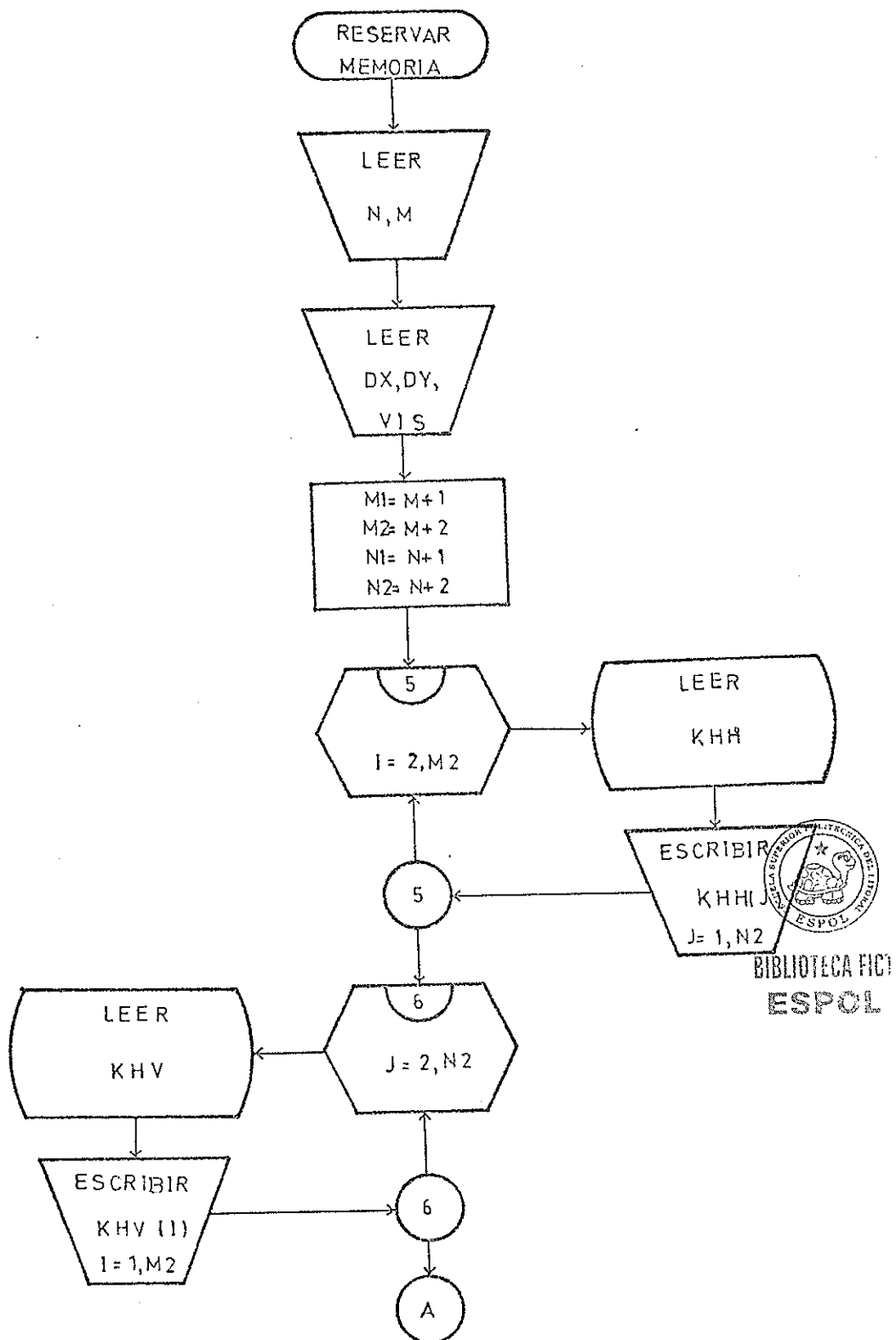


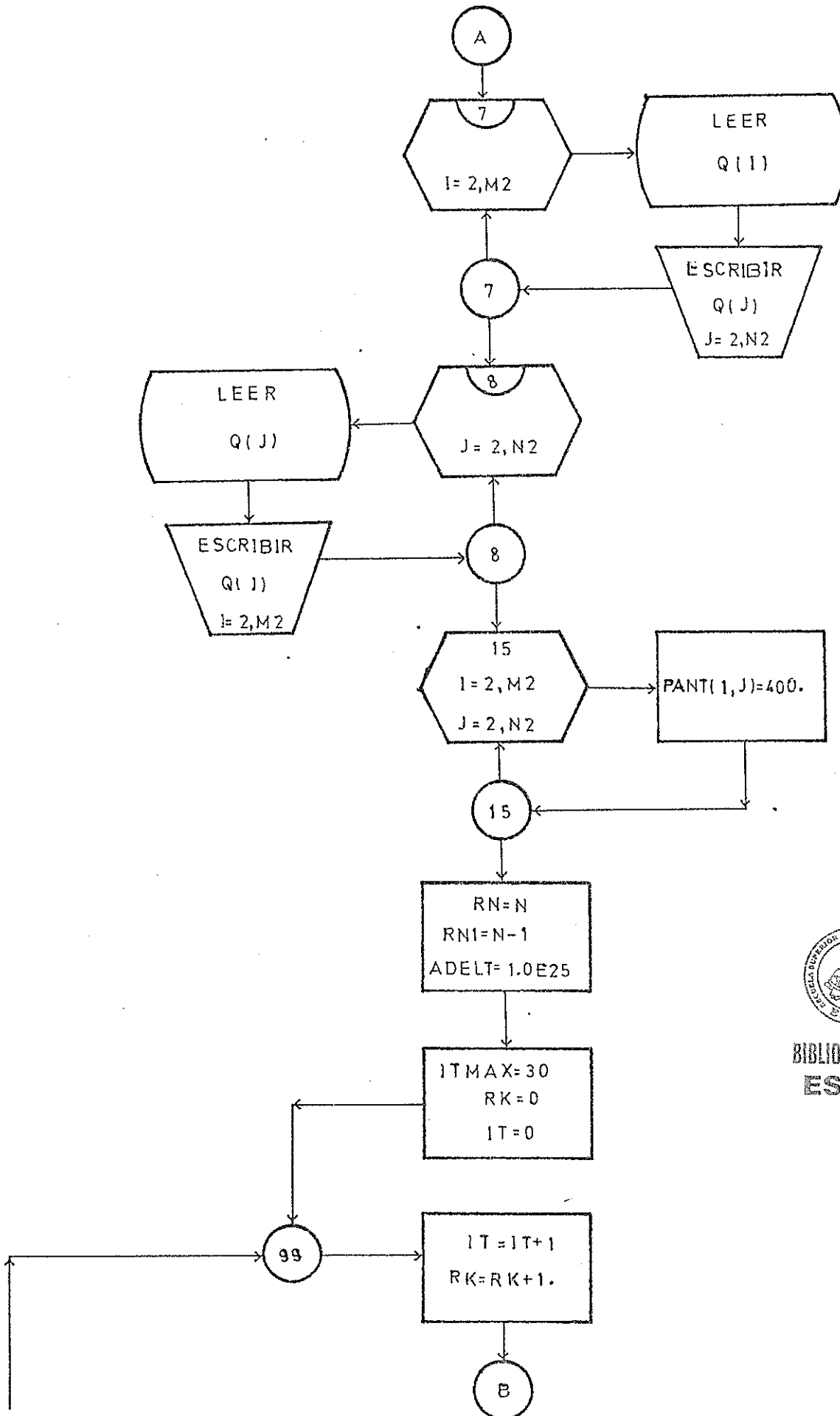
BIBLIOTECA FIC1  
ESPOL



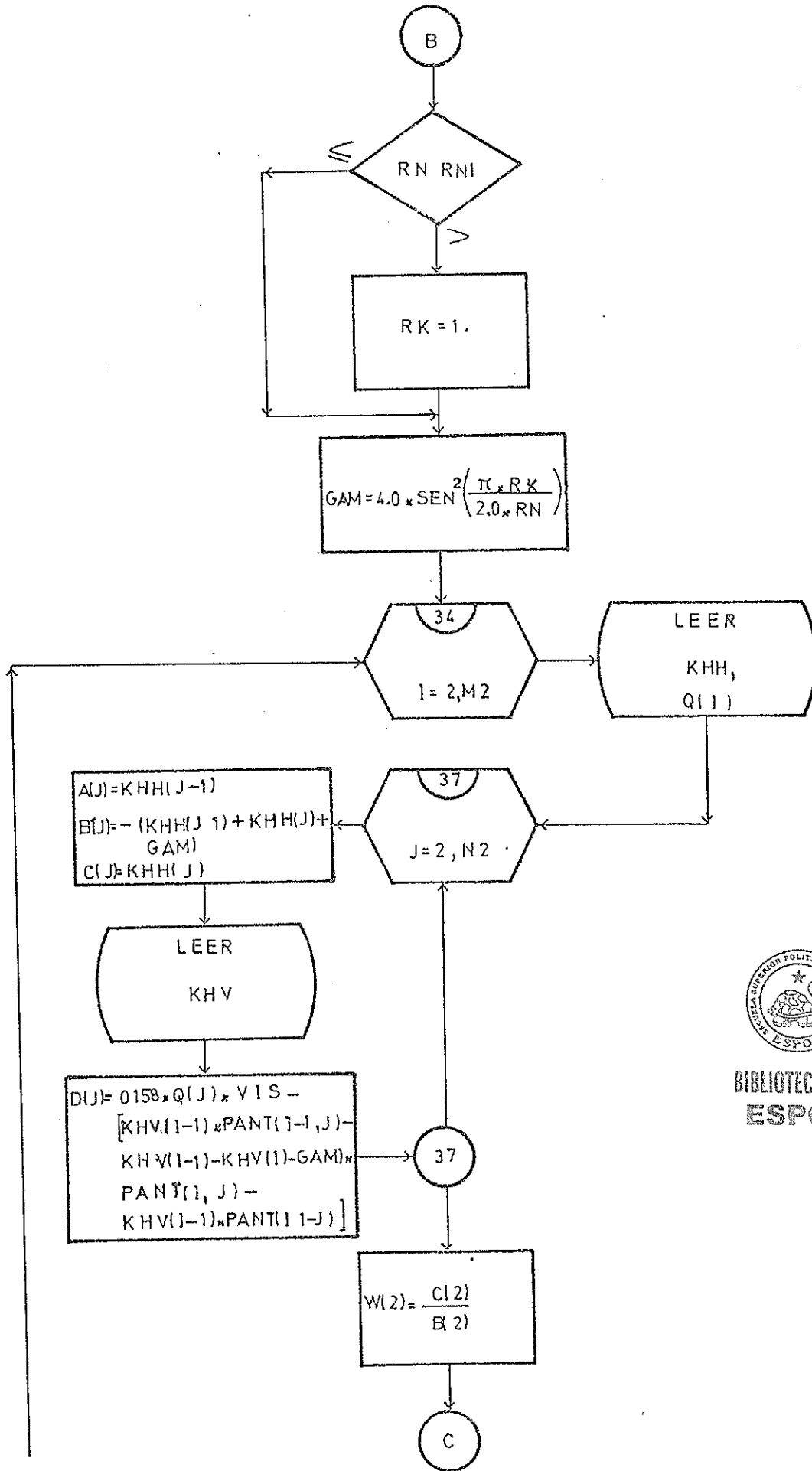
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

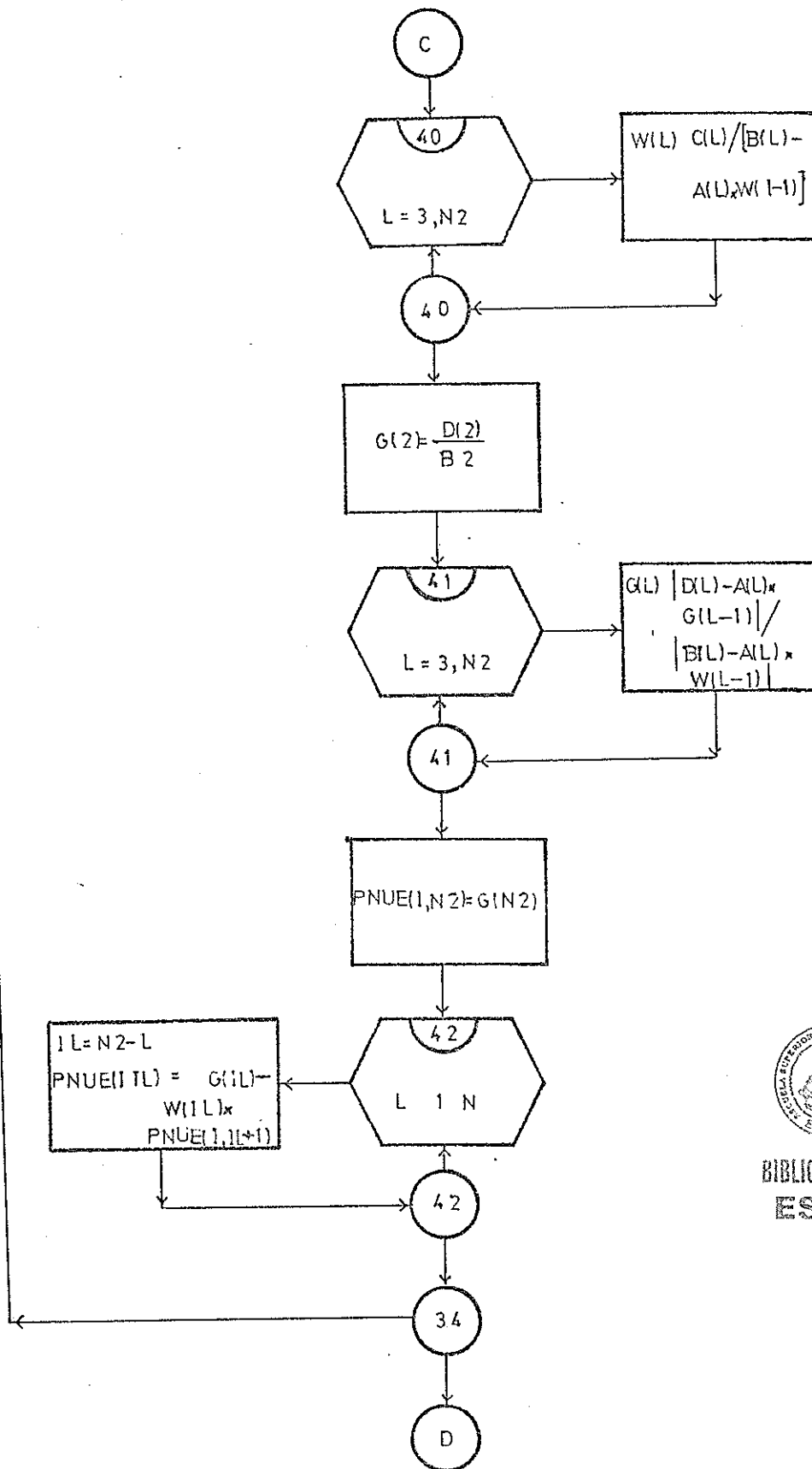
## PROGRAMA N°2





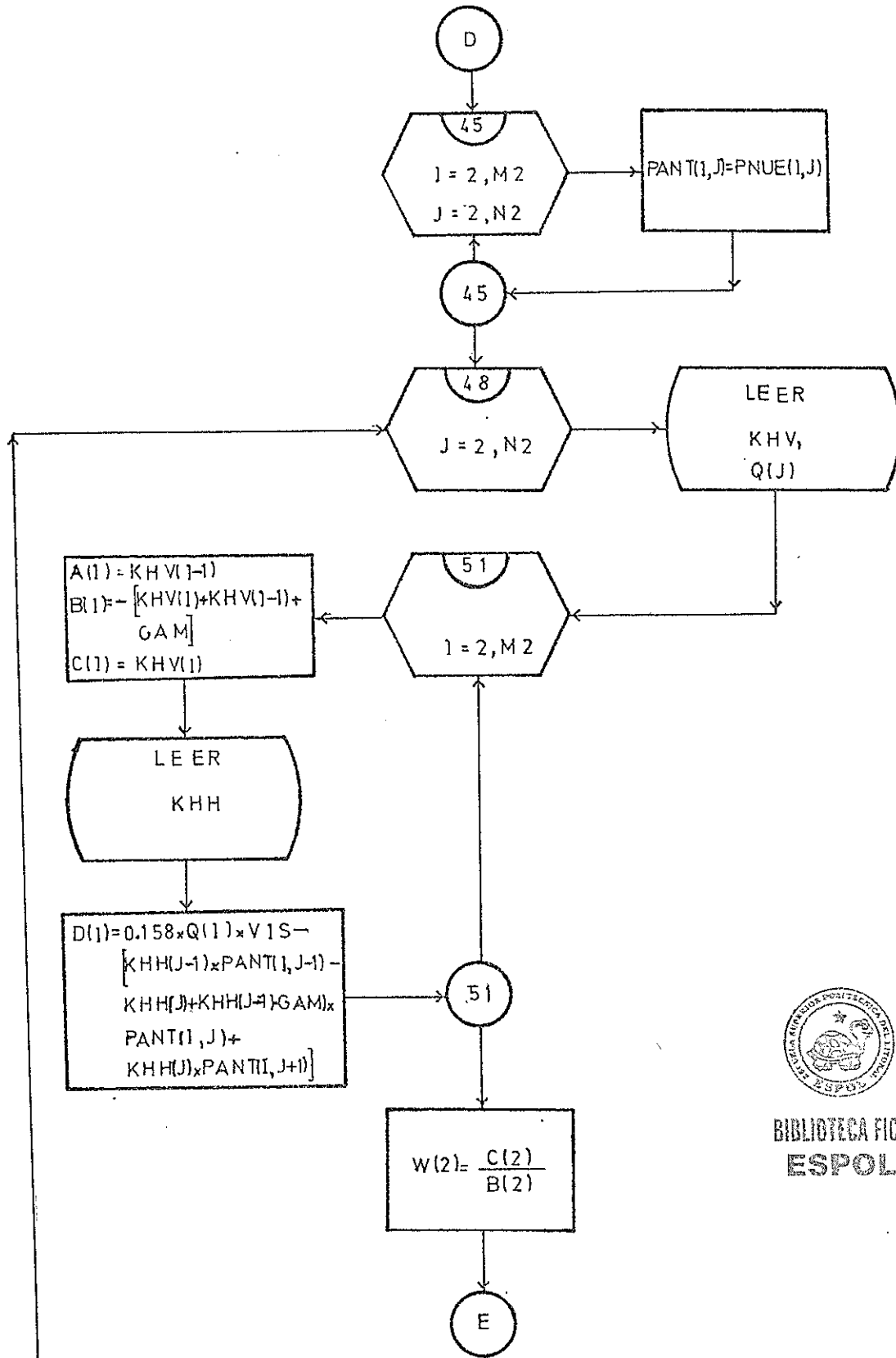
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL





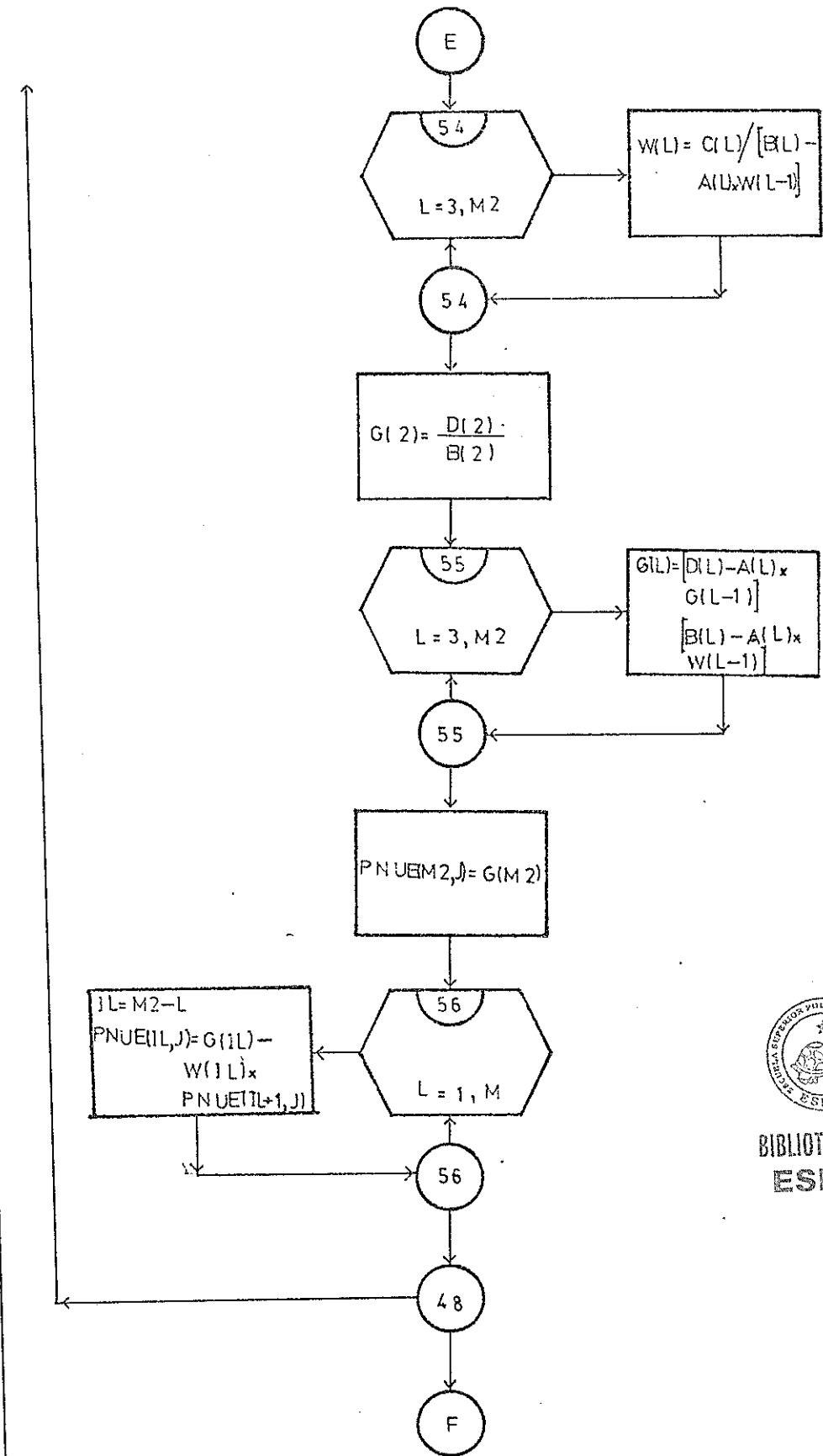
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



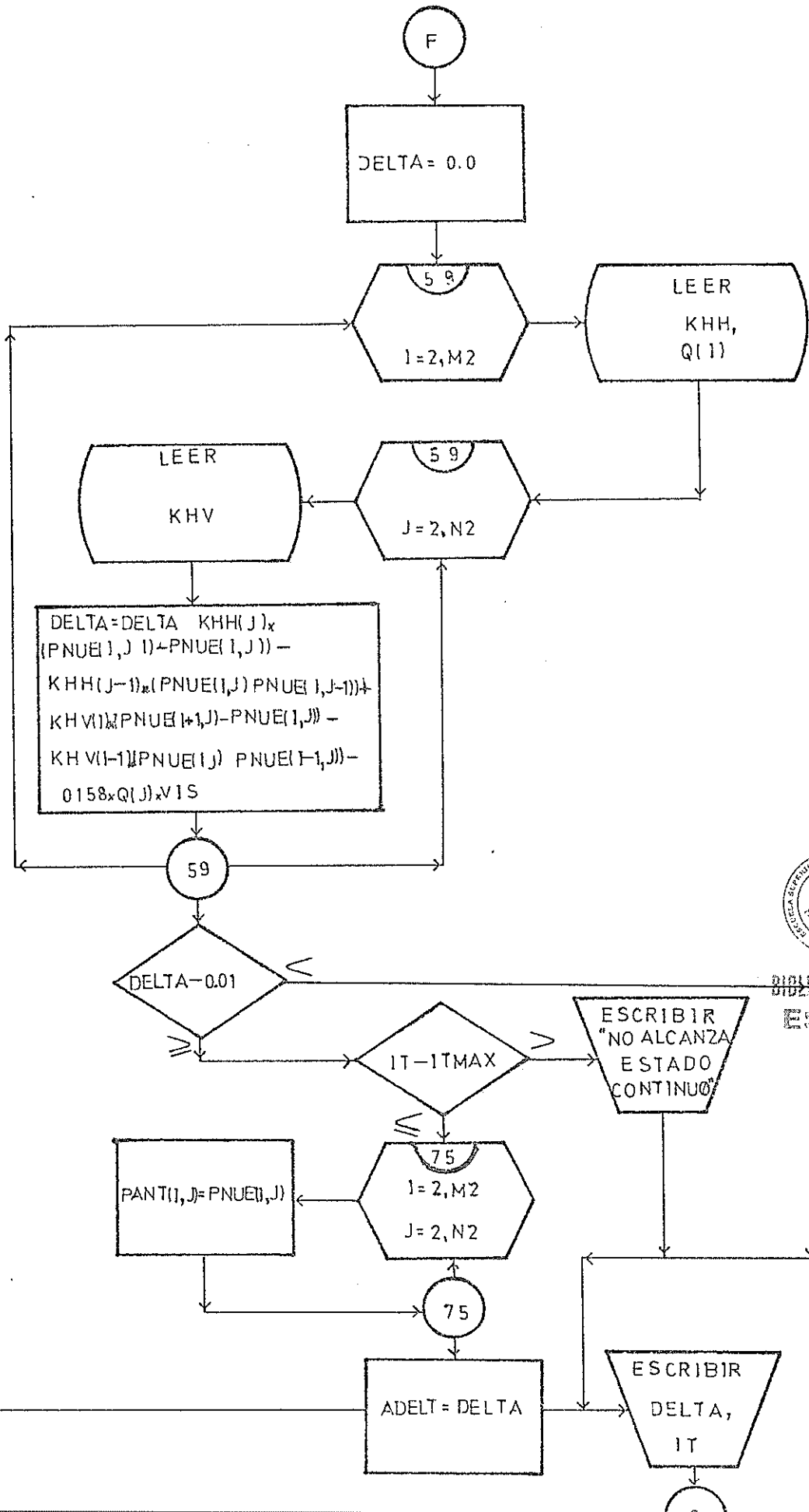


BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

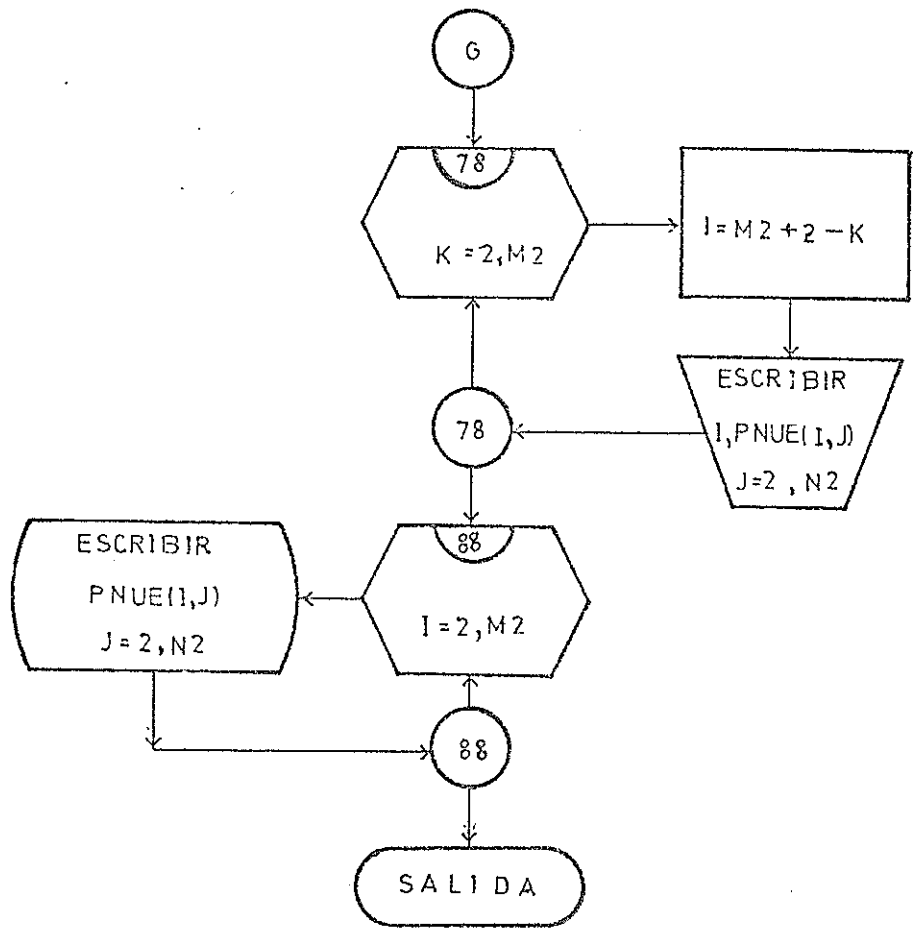
99



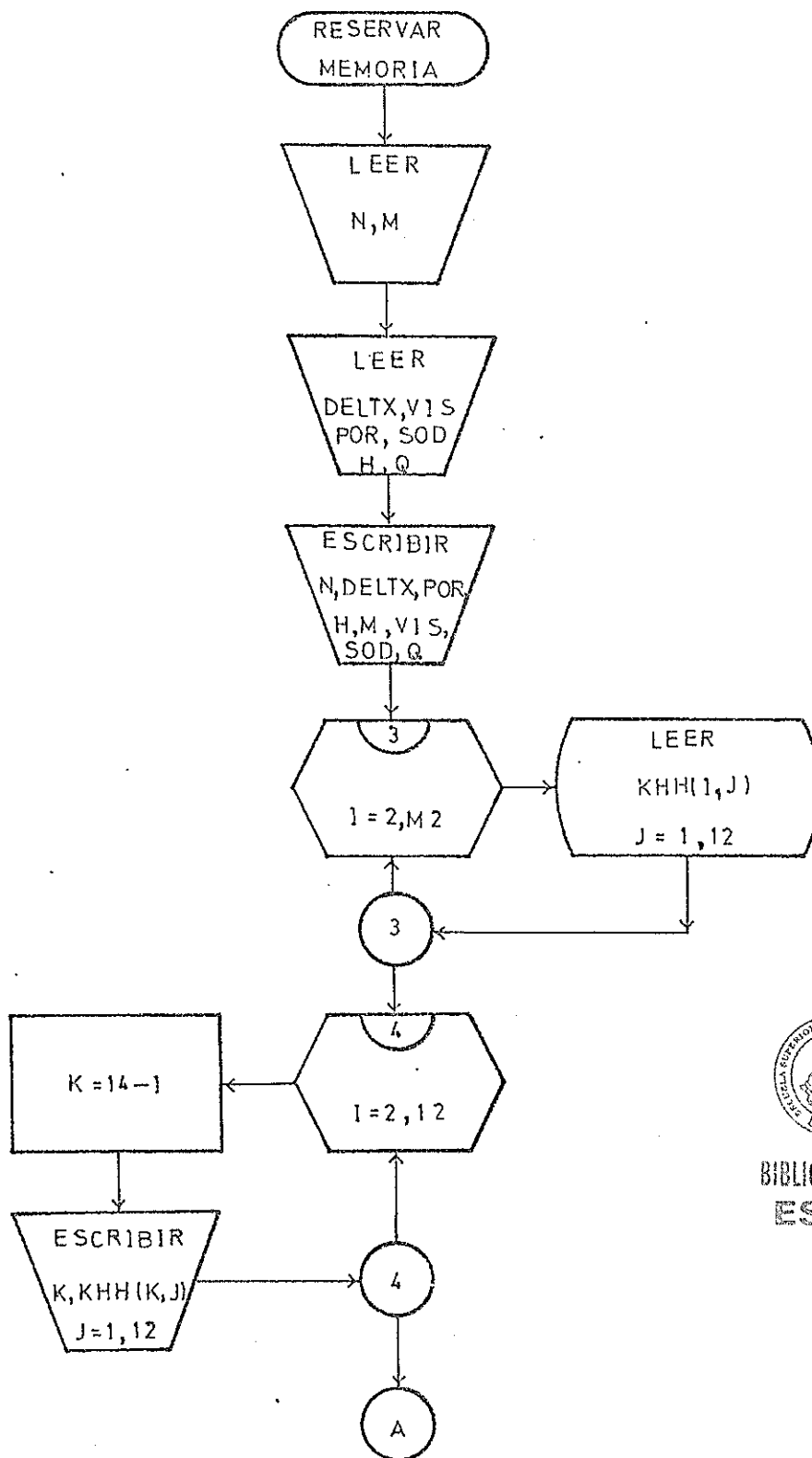
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



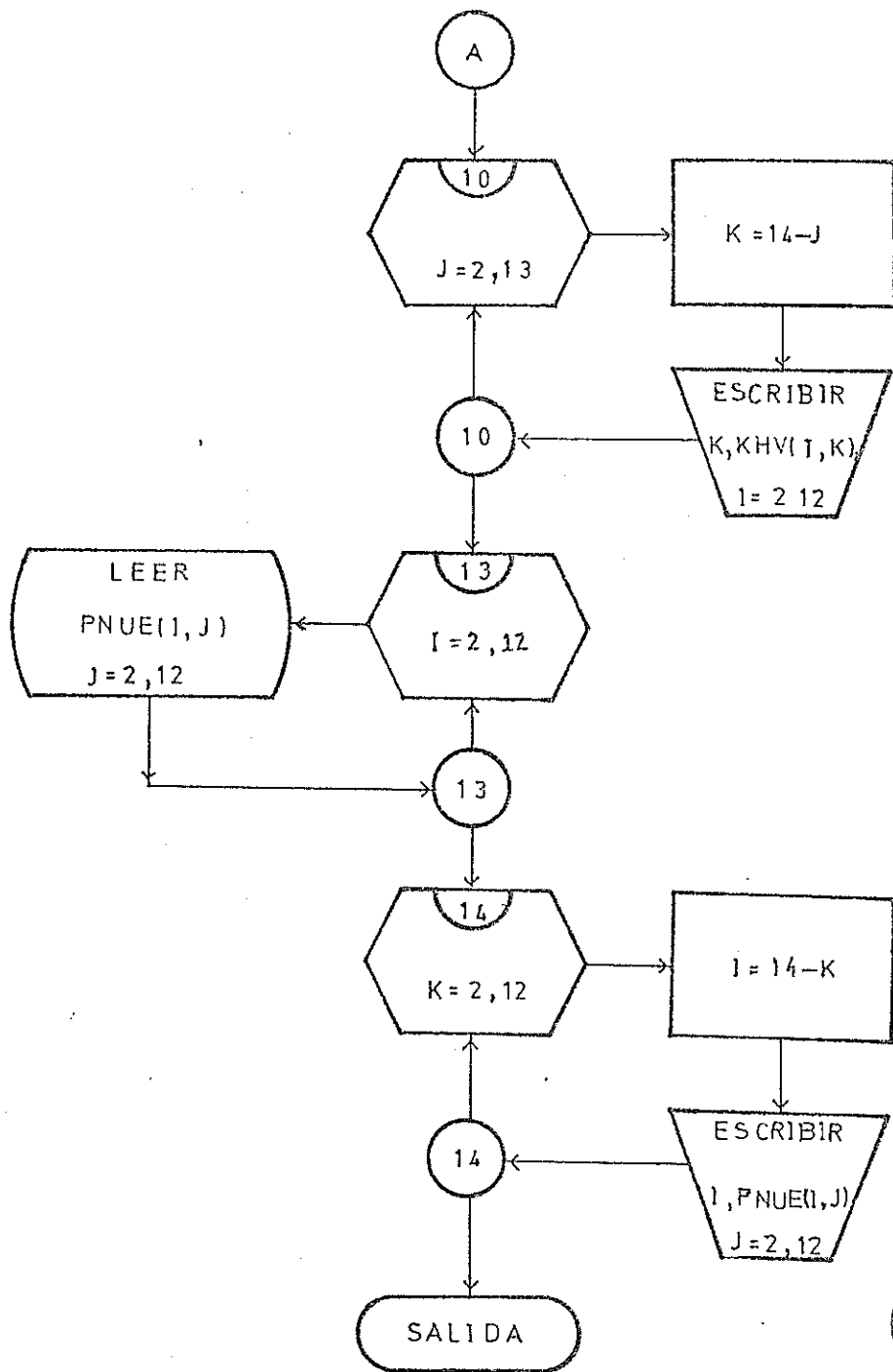
BIBLIOTECA FIC:  
ESPOL



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

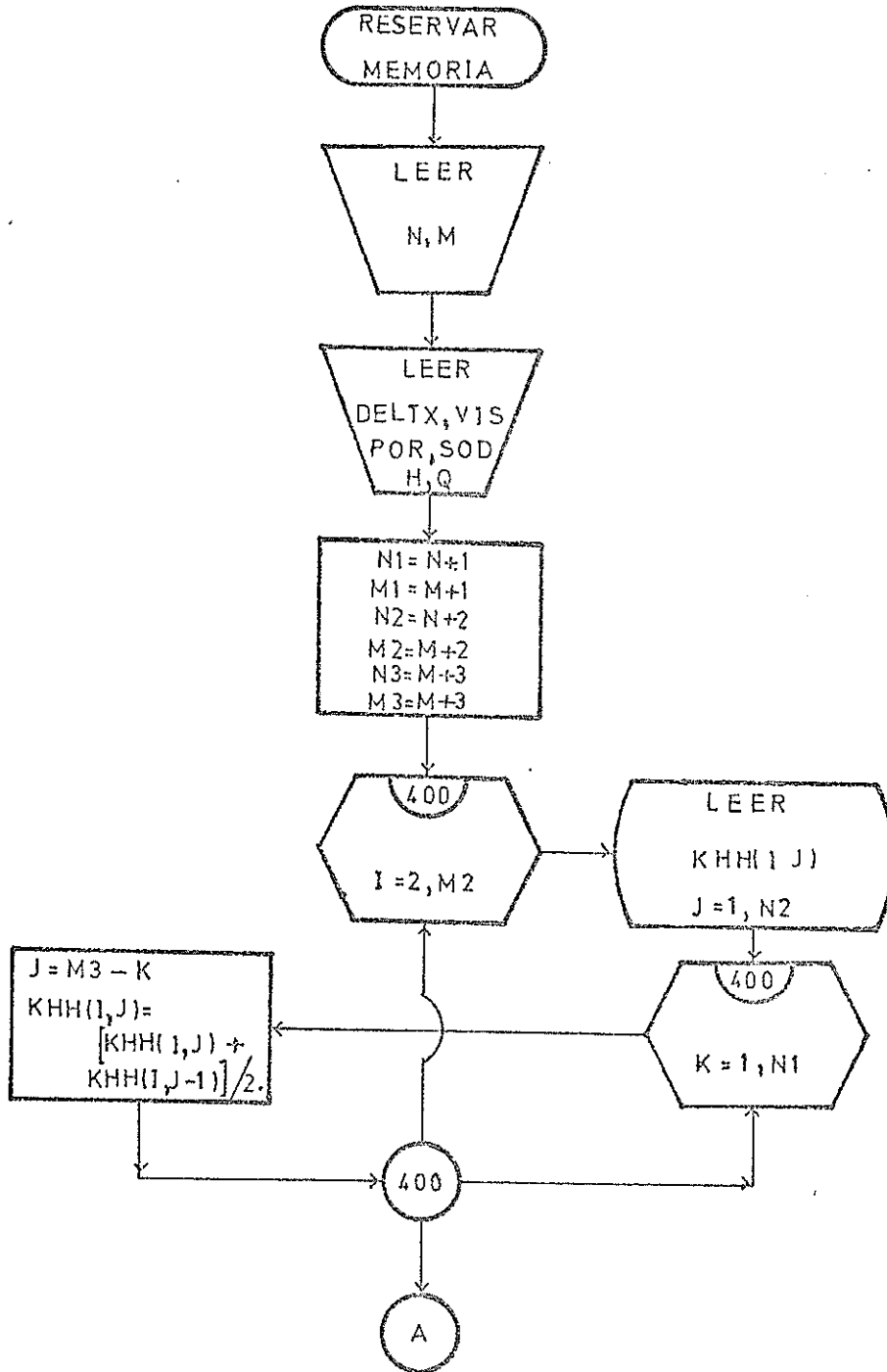


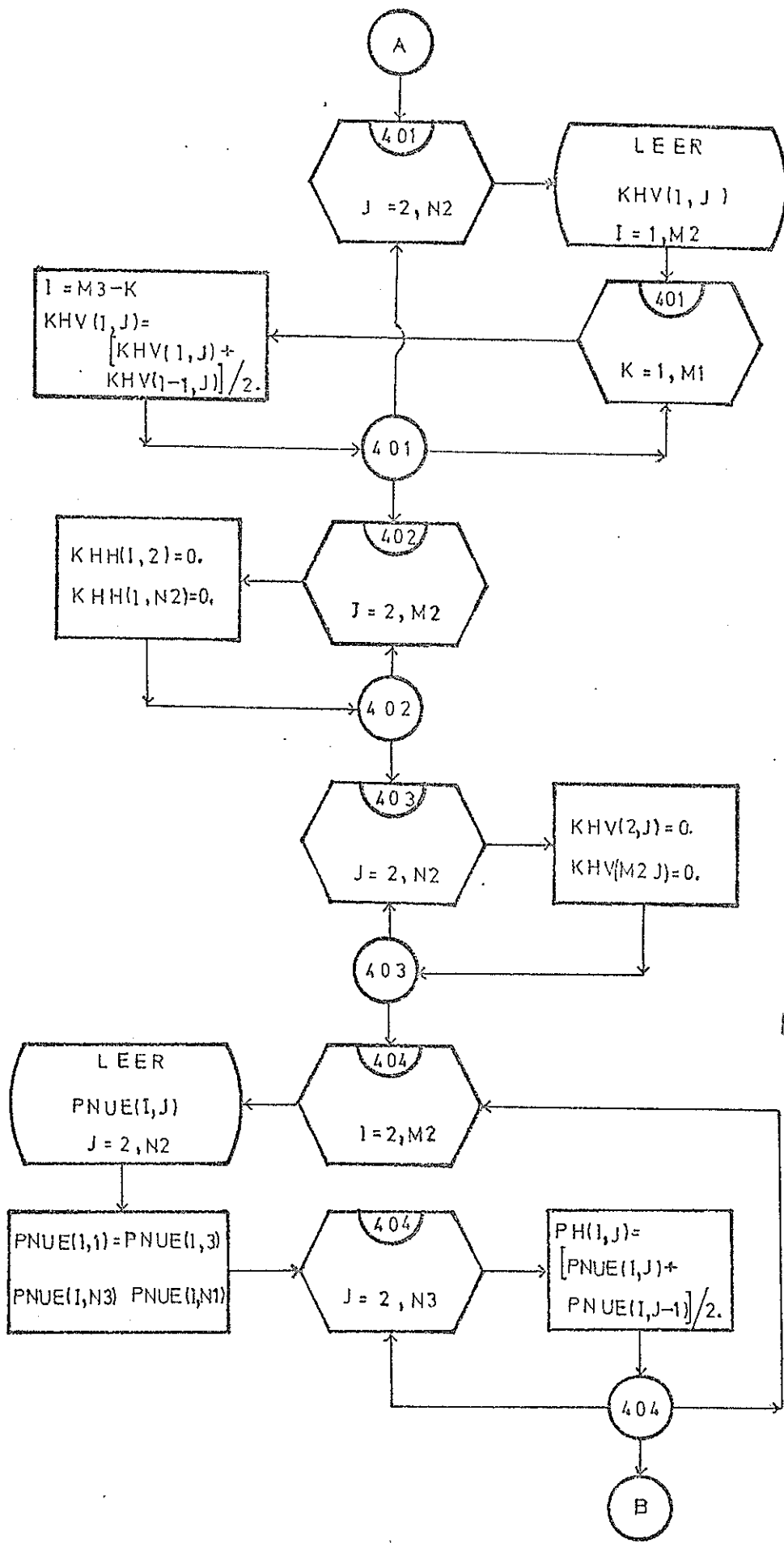
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



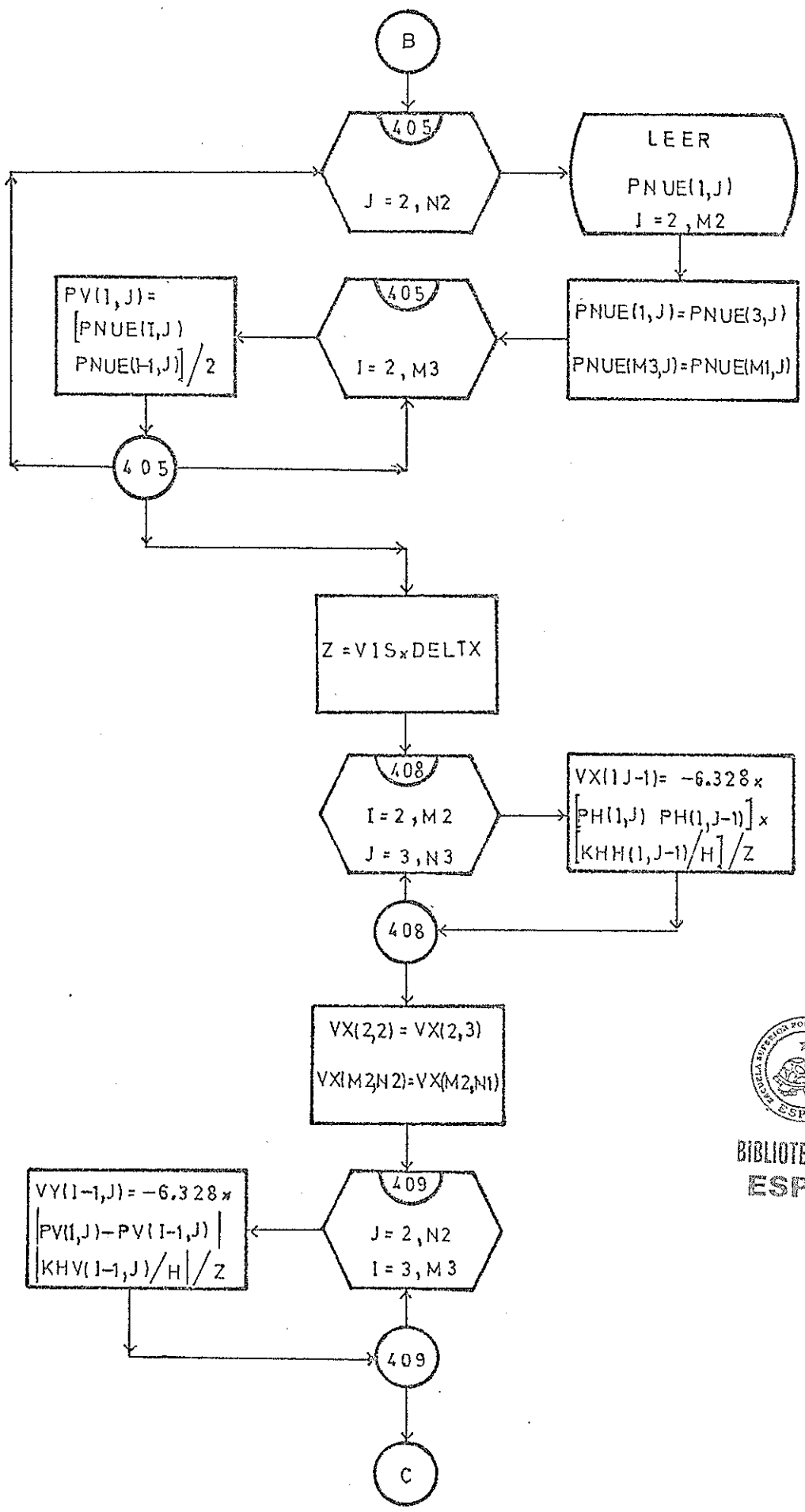
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

PROGRAMA N<sup>o</sup>4

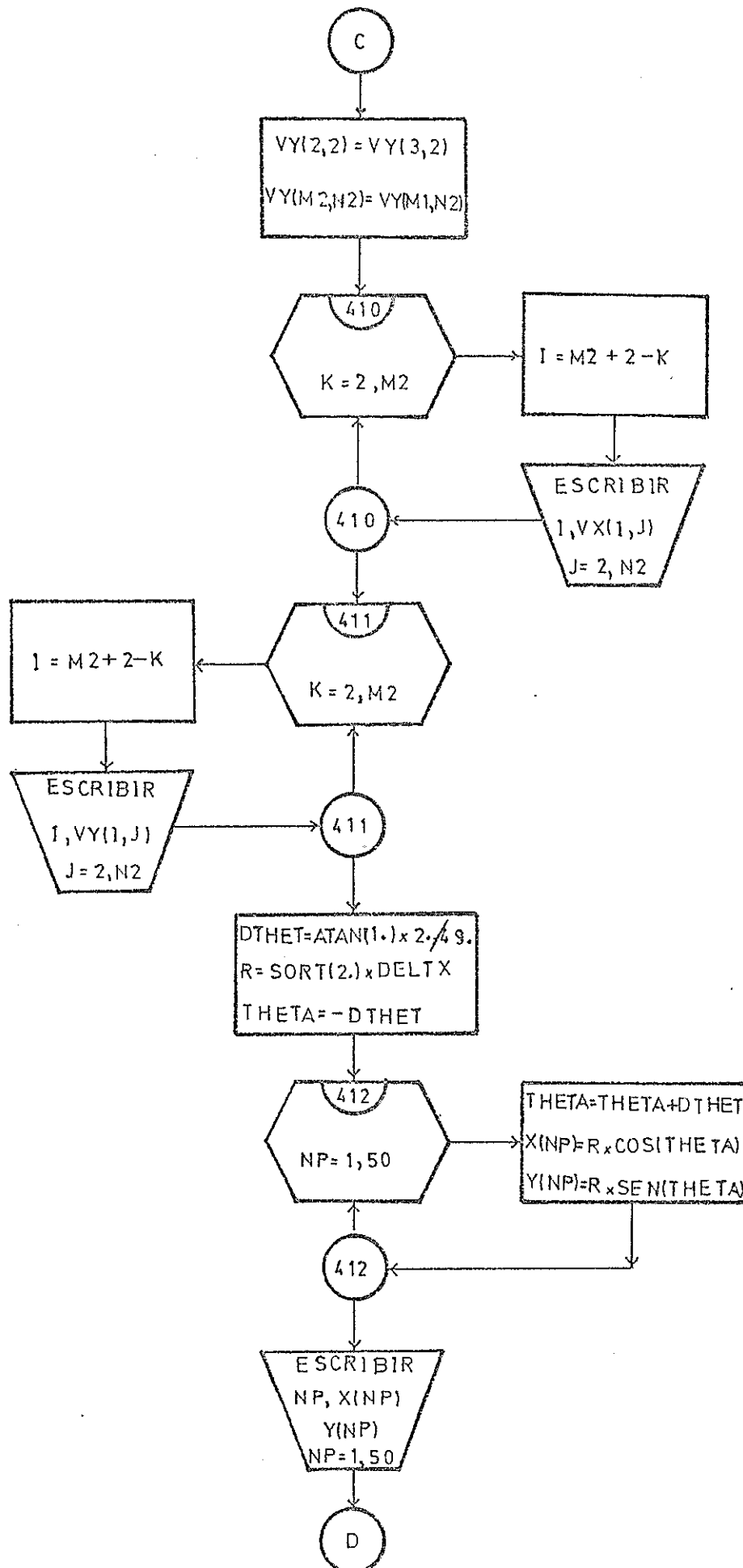








BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



BIBLIOTECA FICTA  
ESPOL

D

TIEMP DELTX<sup>2</sup>  
 N x M x H / Q  
 PRT TIEMP / 10.

16

ICONT = 0  
 T = 0.0  
 ICONT = ICONT + 1

413  
 NP = 1,50

JP = X(NP) / DELTX - 2  
 IP = Y(NP) / DELTX - 2

RJP = JP  
 $A(1) = \frac{[X(NP) - (RJP - 2)] \times DELTX}{DELTX}$

RIP = IP  
 $A(2) = \frac{[Y(NP) - (RIP - 2)] \times DELTX}{DELTX}$

$V1 = VX(IP, JP) \times (1 - A1) + VX(IP, JP + 1) \times A1$   
 $V2 = VX(IP + 1, JP) \times (1 - A1) + VX(IP + 1, JP + 1) \times A1$   
 $VXP(NP) = V1 \times (1 - A2) + V2 \times A2$

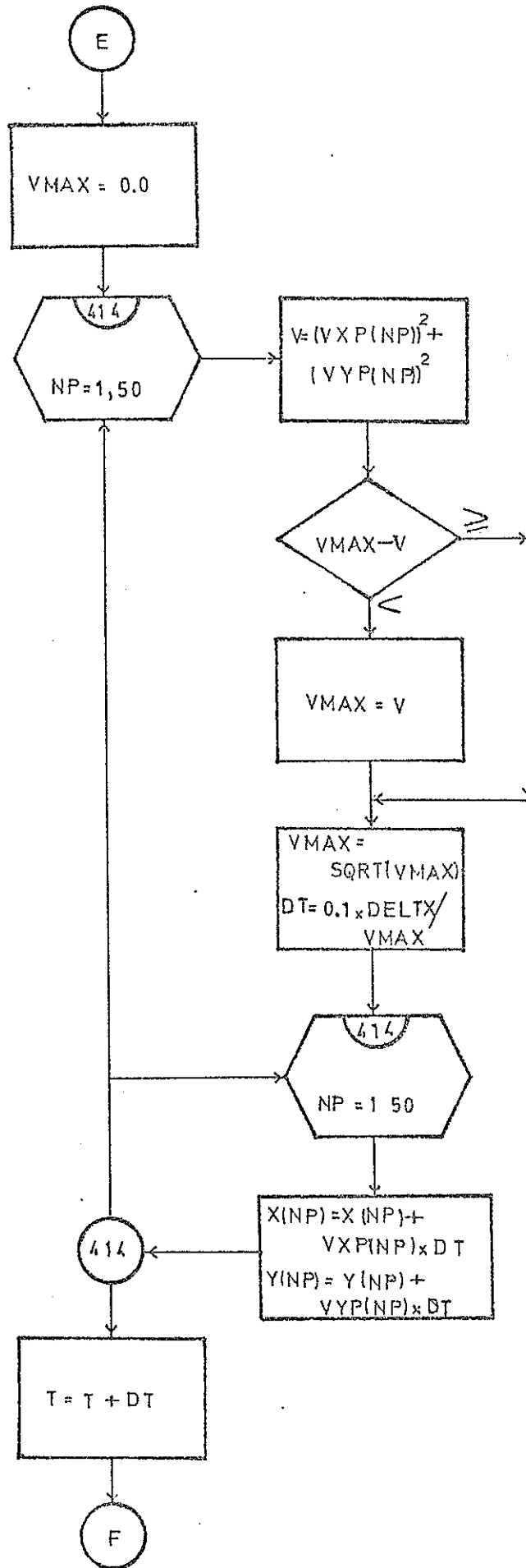
$V1 = VY(IP, JP) \times (1 - A2) + VY(IP + 1, JP) \times A2$   
 $V2 = VY(IP, JP + 1) \times (1 - A1) + VY(IP + 1, JP + 1) \times A1$   
 $VYP(NP) = V1 \times (1 - A1) + V2 \times A1$

413

E

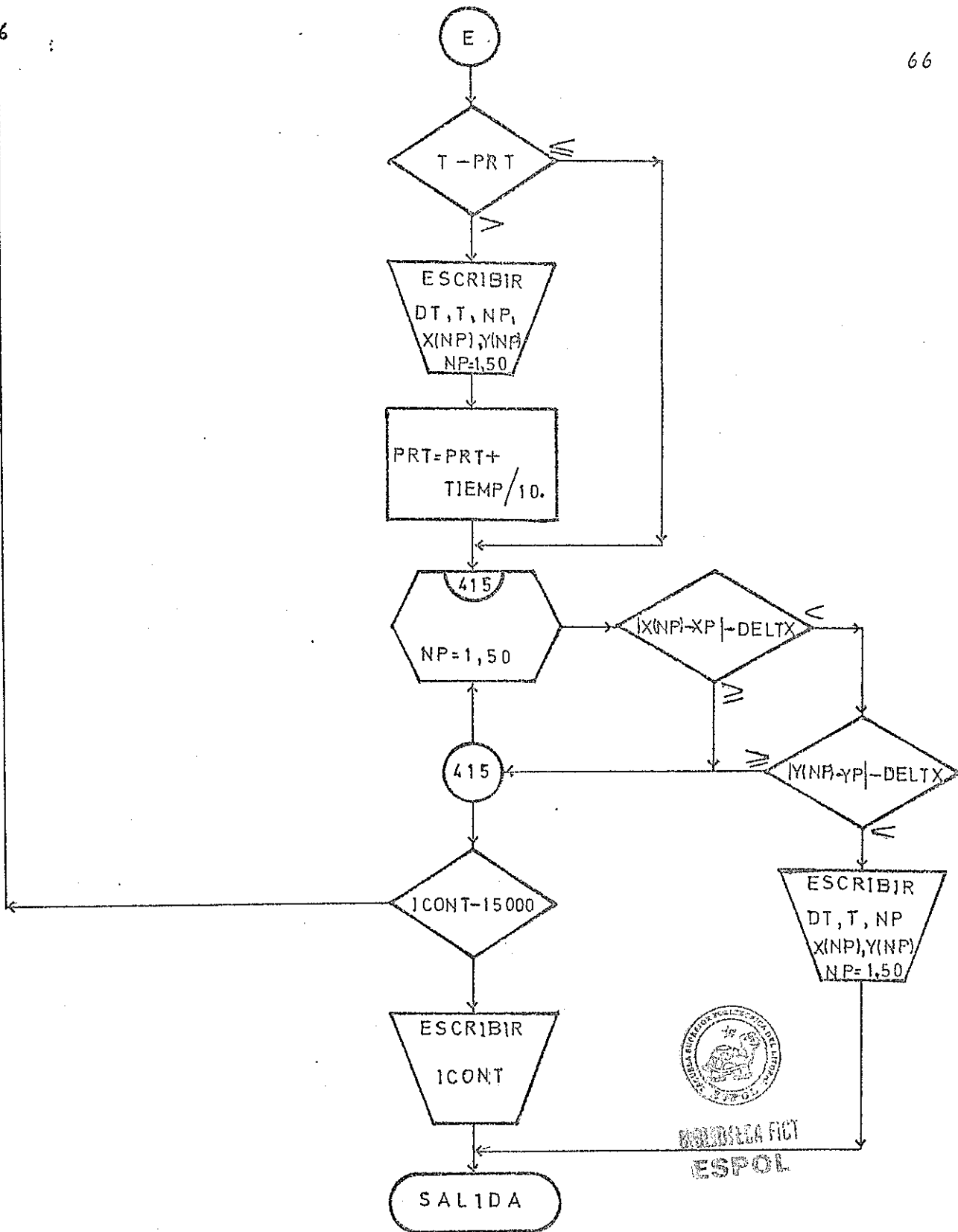


BIBLIOTECA FIC  
 ESPOL



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

6



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE COLOMBIA  
BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

LOG DRIVE CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE  
0000 0001 0000  
V2 M10 ACTUAL 8K CONFIG 8K  
// DUP

\*DELETE FIC01  
CART ID 0001 DR ADDR 3880 DR CNT 0060  
\*DELETE FIC02  
CART ID 0001 DR ADDR 3880 DR CNT 0060  
\*DELETE FIC03  
CART ID 0001 DR ADDR 3880 DR CNT 0060  
\*DELETE FIC04  
C 26 NAME NOT FOUND IN LET/FLET

\*STOREDATA WS UA FIC01 0006  
CART ID 0001 DR ADDR 3880 DR CNT 0060  
\*STOREDATA WS UA FIC02 0006  
CART ID 0001 DR ADDR 3C10 DR CNT 0060  
\*STOREDATA WS UA FIC03 0006  
CART ID 0001 DR ADDR 3C70 DR CNT 0060  
\*STOREDATA WS UA FIC04 0006  
CART ID 0001 DR ADDR 3C00 DR CNT 0060

// FOR  
\*ONE WORD INTEGERS  
\*LIST SOURCE PROGRAM  
\*EXTENDED PRECISION  
\*IOCS(DISK,CARD,1120 PRINTER)

C RAFAEL NUNEZ SATURNO INGENIERIA DE SISTEMAS  
C ESTE PROGRAMA GRABA LOS DATOS DE PERMEABILIDAD-ESPESOR Y RATAS  
C DE FLUJO EN CADA NODO EN LAS DIRECCIONES X E Y  
C VECTOR X IGUAL A PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X  
C VECTOR Y IGUAL A PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y  
C O IGUAL A FLUJOS EN LOS NODOS  
C FILE 111=KHH  
C FILE 222=KHY  
C FILE 333=O ALMACENADOS EN LA DIRECCION X  
C FILE 444=O ALMACENADOS EN LA DIRECCION Y

DIMENSION Y(22),V(22),C(22)  
DEFINE FILE 111(22,66,U,KHY)  
DEFINE FILE 222(22,66,U,KLY)  
DEFINE FILE 333(22,66,U,IOX),444(22,66,U,IOY)  
READ(2,5)V,N /  
5 ENDVS-(215)



PAGE 7

```

N1=N+1
N2=N+2
M1=M+1
M2=M+2
DO 2 I=2,M2
  READ(2,1)(X(J),J=1,N2)
  1 FORMAT(12F5.2)
  2 WRITE(1,1)(X(J),J=1,N2)
  DO 3 J=2,N2
    READ(2,1)(V(I),I=1,M2)
    3 WRITE(2,2)(Y(I),I=1,M2)
  DO 18 J=2,N2
    18 Z(J)=0.0
  DO 20 I=2,M1
    20 WRITE(3,3)IQ
    Z(I)=-400.
    WRITE(3,3)IQ
    Q(I)=0.0
    Q(N2)=400.
    WRITE(3,3)M2IQ
    Q(N2)=0.
  DO 22 J=2,M1
    22 WRITE(4,4)JQ
    Q(I)=-400.
    WRITE(4,4)IQ
    Q(I)=0.
    Q(M2)=400.
    WRITE(4,4)M2IQ
  CALL EXIT
END

```

FEATURES SUPPORTED  
 ONE WORD INTEGERS  
 EXTENDED PRECISION  
 ICCS

CORE REQUIREMENTS FOR  
 COMMON C VARIABLES 240 PROGRAM 332  
 END OF COMPILATION



```

// JOB
LOG DRIVE : CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE
0000 0004 0004 0000
V2 M10 ACTUAL RK CONFIG RK
// FOR
* ONE WORD INTEGERS
* LIST SOURCE PROGRAM
* EXTENDED PRECISION
* INCS(DISK,CARD,1132 PRINTER)
C RAFAEL NUMEZ SATURNO INGENIERIA DE PETROLFOS
C
C ESTE PROGRAMA CALCULA LAS NUEVAS PRESIONES EN CADA PUNTO DEL
C MODELO,HASTA QUE ESTE ALCANZA EL ESTADO CONTINUO,Y UNA VEZ
C ALCANZADO ESTE,MOS ESCRIBE LOS VALORES DE ESTAS PRESIONES
C ESTABILIZADAS
C FILE 555=DEFESIONES
C
REAL X(4),(22),X(4),(22)
DIMENSION DANT(22,22),DNUF(22,22),G(22),W(22),G(22),A(22),B(22),
IC(22),O(22)
CERTE FILE 111(22,66,U),K(4)
DANTE FILE 222(22,66,U),X(4)
DNEINE FILE 222(22,66,U),I(4),444(22,66,U),I(4)
DNEINE FILE 555(22,66,U),I(4)
READ(2,10)IN,M
101 EADVAT(213)
200 READ(2,10)DX,DY,VIS
102 EADVAT(210,4)
M1EN+1
M2EN+2
M1EN+1
M2EN+2
C CHEQUEAR DATOS DE DISCO

```



```

5 I=2,M2
READ(111)IKH
5 WRITE(2,201)(KH(I),J=1,M2)
201 FORMAT(1P2F,1)
WRITE(2,202)
FORMAT(/,/,/)
202
203 J=2,M2
READ(222)JKHV
6 WRITE(2,201)(KHV(I),I=1,M2)
WRITE(2,202)
204 I=2,M2
READ(222)JIC
7 WRITE(2,210)(G(J),J=2,M2)
WRITE(2,202)
205 J=2,M2
READ(444)JIC
8 WRITE(2,210)(Q(I),I=2,M2)
210 FORMAT(1P,1F10,2)

```



```

C
C  PRECISION INICIAL
DO 15 I=2,M2
DO 15 J=2,N2
15 PANT(I,J)=400.0
RN=N
RN1=RN-1
ADCLT=1.0E25
ITMAY=20
RK=0.
IT=0
99 IT=IT+1
RK=RK-1.
IF(RK-RN1)31,31,30
30 RK=1.
31 GAM=4.0*(SIN(RK*3.141593/(2.0*RN))**2)
C
C  METODO IMPLICITO EN DIRECCION X
C
C 34 I=2,M2
READ(111)IKHH
READ(233)IQ
C
C  ELEMENTOS DE MATRIZ TRIDIAGONAL
C
DO 37 J=2,N2
A(J)=KHV(J-1)
B(J)=-{KHH(J-1)+KHH(J)+GAM}
C(J)=KHH(J)
READ(222)JKHV
37 D(J)=R(J)*VIS*Q.158-(KHV(I-1)*PANT(I-1,J)-(KHV(I-1)+
KHV(I)-GAM)*PANT(I,J)+KVV(I)*PANT(I+1,J))
C
C  ALGORITMO DE THOMAS
C
W(2)=C(2)/B(2)
DO 40 L=3,N2
40 W(L)=C(L)/(B(L)-A(L)*W(L-1))
G(2)=D(2)/B(2)
DO 41 L=3,N2
41 G(L)=(D(L)-A(L)*G(L-1))/(B(L)-A(L)*W(L-1))
PNUE(I,N2)=G(N2)
DO 42 L=1,N
IL=N2-L
42 PNUE(I,IL)=G(IL)-W(IL)*PNUE(I,IL+1)
34 CONTINUE
C
C  METODO IMPLICITO EN DIRECCION Y
C
C  HACEO PANT=PNUE
DO 45 I=2,M2
DO 45 J=2,N2
45 PANT(I,J)=PNUE(I,J)
DO 48 J=2,N2
READ(222)JKHV
READ(444)JIQ

```



BIBLIOTECA FICTI  
ESPOL

PAGE 3

ELEMENTOS DE MATRIZ TRIANGONAL

```

51 DO 51 J=2,M2
    A(I)=K*V(I-1)
    B(I)=-V*W(I)+K*V(I-1)+G*V
    C(I)=K*V(I)
    READ(I,I) KHH
    READ(I,I) KHV
    B(I)=G(I)*V(I)*KHH+(J-1)*PANT(I,J-1)-(KHH(J)+
    1K*W(J-1)-G*V)*PANT(I,J)+K*H(J)*PANT(I,J-1)
  
```

ALGORITMO DE THOMAS

```

54 W(2)=C(2)/R(2)
    DO 54 L=3,M2
    W(L)=C(L)/(R(L)-A(L)*W(L-1))
    G(2)=D(2)/R(2)
    DO 55 L=3,M2
    G(L)=(D(L)-A(L)*G(L-1))/(R(L)-A(L)*W(L-1))
    DNUE(V2,J)=G(M2)
    DO 56 L=1,M
    IL=V2-L
    56 DNUE(IL,J)=G(IL)-W(IL)*DNUE(IL+1,J)
48 CONTINUE
    DELTA=0.0
    DO 59 I=2,M2
    READ(I,I) KHH
    READ(I,I) KHV
    DO 59 J=2,N2
    READ(I,22) JKHV
    59 DELTA=DELTA+(K*H(J)*DNUE(I,J+1)-K*H(J-1)*DNUE(I,J)-
    1DNUE(I,J-1)+K*V(I))*(DNUE(I+1,J)-DNUE(I,J))-K*H(I-1)*(DNUE(I,J)-
    2DNUE(I-1,J))-G(J)*V(I)*K*V(I)*K*2
  
```

QUEBRA DE ESTADO CONTINUO

```

62 IF(DELTA<0.01)70,82,62
64 WRITE(2,205)
205 FORMAT(1X,INGO ALCAN7A: ESTADO CONTINUO)
60 TO 70
71 DO 75 I=2,M2
    DO 75 J=2,M2
    PANT(I,J)=DNUE(I,J)
    ADELTA=DELTA
    60 TO 90
70 WRITE(2,202)
    WRITE(2,645) DELTA
    645 FORMAT(1X,2F15.7)
    WRITE(2,208) IT
    208 FORMAT(1X,INUMERO DE ITERACIONES=I,IX,/,IX,PPRESIONES(LPC),/,/)
    DO 78 K=2,M2
    I=V2+2-K
    78 WRITE(2,204)I,(DNUE(I,J),J=2,N2)
    204 FORMAT(/,1X,14,11E10.2)
    DO 88 I=2,M2
    88 WRITE(555)I,(DNUE(I,J),J=2,N2)
    CALL EXIT
    END
  
```



BIBLIOTECA FIC  
ITESPOL

PAGE 4

FEATURES SUPPORTED  
ONE WORD INTEGERS  
EXTENDED PRECISION  
JOCS

CODE REQUIREMENTS FOR  
COMMON C VARIABLES 3600 PROGRAM 1532

END OF COMPILATION



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

```

// JOB
LOG DRIVE   CART SPEC   CART AVAIL   PHY DRIVE
0000        0001        0000        0000
V2 W10      ACTUAL   RK   CONFIG   RK
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
*EXTENDED PRECISION
*IOCS(DISK,CARD,1132 PRINTER)
C
C   RAFAEL NUNEZ SATURNO      INGENIERIA DE PETROLEOS
C
C   ESTE PROGRAMA ESCRIBE LOS DATOS DE PERMEABILIDAD-ESPESOR Y LAS
C   PRECISIONES CALCULADAS EN CADA NODO EN EL MOMENTO DE ALCANZAR EL
C   ESTADO CONTINUO
C
REAL KHH(12,12),KHV(12,12),PNUE(12,12)
DEFINE FILE 11(22,55,U,K4X),222(22,66,U,KHY)
DEFINE FILE 555(22,66,U,IP)
READ(2,30)N,M
301 FORMAT(2I3)
READ(2,302)DFLT,X,VIS,POR,SOD,H,Q
302 FORMAT(6F10.3)
WRITE(3,1)
1 FORMAT(1H)
WRITE(3,2)
2 FORMAT(24X,'DERIVABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X ENTRE LOS NODOS EN
MILIDARCIS-PIFS',
2//,T16,'1',T25,'2',T34,'3',T43,'4',T52,'5',T61,'6',T70,'7',T79,
3,'8',T88,'9',T97,'10',T106,'11',T115,'12',/)
DO 3 I=2,12
3 READ(11,I)(KHH(I,J),J=1,12)
DO 4 I=2,12
K=14-I
4 WRITE(3,5)K,(KHH(K,J),J=1,12)
5 FORMAT(4X,I2,8X,11(F4,2,5X),F4,2,/)
WRITE(3,6)
6 FORMAT(//25X,'PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y ENTRE LOS NODOS EN
MILIDARCIS-PIFS',
2//,T16,'1',T26,'2',T36,'3',T46,'4',T56,'5',T66,'6',T76,'7',T86,
3,'8',T96,'9',T106,'11',T116,'12',/)
DO 9 J=2,12
9 READ(22,J)(KHV(J,I),I=1,12)
DO 10 J=2,13
K=14-J
10 WRITE(3,11)K,(KHV(I,K),I=2,12)
11 FORMAT(4X,I2,8X,10(F4,2,5X),F4,2,/)
WRITE(3,1)
WRITE(3,12)

```



INTEPE  
INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDIOS PETROLEROS

```

12 FORMAT(//,,'27X',D RE S I O N E S F N L O S N O D O S
1 F N L P C I,/,T11,'2',T21,'3',T31,'4',T41,'5',T51,'6',T61,
2 '7',T71,'8',T81,'9',T91,'10',T101,'11',T111,'12',/)
DO 13 I=2,12
13 READ(555,I)(PNUF(I,J),J=2,12) _
DO 14 K=2,12
I=14-K
14 WRITE(3,206)I,(PNUF(I,J),J=2,12)
206 FORMAT(//,'1X,I4,11F10.3)
CALL EXIT
END

```

FEATURES SUPPORTED  
ONE WORD INTEGERS  
EXTENDED PRECISION  
IOCS

CORE REQUIREMENTS FOR  
COMMON 0 VARIABLES 1344 PROGRAM 722  
END OF COMPILATION

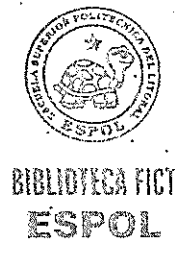


BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

```

PAGE
// JOB
LOG DRIVE CART SPEC CART AVAIL PHY DRIVE
0000 0004 0000
V2 M10 ACTUAL RK CONFIG 'RK
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*EXTENDED PRECISION
*LIST SOURCE PROGRAM
*JOCS(DISK,CARD,1192 DD(INTER)
C RAFAEL MUNEZ SATURNO INGENIERIA DE PETROLEOS
C ESTE PROGRAMA CALCULA Y ESCRIBE LAS DIFERENTES POSICIONES DEL
C FRENTE DE INVASION,HASTA QUE ESTE ALCANZA LA RUPTURA
REAL KMH(12,12),KHY(12,12)
DIMENSION DV(12,12),PV(12,12),VX(13,13),VY(13,13),PNUE(13,13)
EQUIVALENCE (PVUE(1,1),VX(1,1))
DEFINE FILE 111(22,66,U,KHX)
DEFINE FILE 222(22,66,U,KHY)
DEFINE FILE 555(22,66,U,IP)
READ(2,201)N,M
301 FORMAT(2I4)
READ(2,302)DELTA,VIS,POB,SOD,H,Q
402 FORMAT(5E10,2)
C CALCULO DE PERMEABILIDADES EN LOS NODOS
N1=N+1
M1=M+1
N2=N+2
M2=M+2
N2=N2+1
M2=M2+1
DO 400 I=2,M2
READ(1,111)(KMH(I,J),J=1,N2)
DO 400 K=1,M1
J=M2-K
400 KMH(I,J)=(KMH(I,J)+KMH(I,J-1))/2.0
READ(2,222,II)(KHY(I,J),I=1,M2)
DO 400 K=1,M1
I=M2-K
401 KHY(I,J)=(KHY(I,J)+KHY(I-1,J))/2.0
C HACER DE PERMEABILIDADES CERO EN LOS BORDES
DO 400 I=2,M2
KMH(1,I)=0.0
402 KMH(I,M2)=0.0
DO 400 J=2,M2
KHY(I,J)=0.0
403 KMH(M2,I)=0.0

```



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

```

CALCULO DIFERENCIAS ENTRE LOS NODOS
C
C
404 I=2,M2
READ(555,I)(PNUF(I,J),J=2,M2)
DNUF(I,I)=PNUF(I,I)
DNUF(I,M2)=PNUF(I,M1)
405 J=2,M2
406 I,J)=(DNUF(I,J)+PNUF(I,J-1))/2.0
READ(555,I)(DNUF(I,J),I=2,M2)
DNUF(I,J)=DNUF(I,J)
DNUF(M2,J)=DNUF(M1,J)
405 I=2,M2
406 PV(I,J)=(DNUF(I,J)+DNUF(I-1,J))/2.0

CALCULO VX Y VY
C
C
7=V15*PQR*SQN*DELTA
408 I=2,M2
409 J=2,M2
405 VY(I,J-1)=-6.328*(PH(I,J)-PH(I,J-1))*(KHH(I,J-1)/H)/Z
VY(2,2)=VY(2,1)
VY(M2,M2)=VY(2,M1)
409 J=2,M2
408 I=2,M2
409 VY(I-1,J)=-6.328*(PV(I,J)-PV(I-1,J))*(KHV(I-1,J)/H)/Z
VY(2,2)=VY(2,1)
VY(M2,M2)=VY(M1,M2)

WRITE(2,510)
FORCAT(1,2,XY,VELOCIDADES EN SENTIDO X EN PCUR/OIA/PCUA),///
1,XY,2,XY,3,XY,4,XY,5,XY,6,XY,7,XY,8,XY,9,XY,10,XY,11,XY,12,XY,///
2,10,3,XY,4,XY,5,XY,6,XY,7,XY,8,XY,9,XY,10,XY,11,XY,12,XY,///
409 K=2,M2
WRITE(2,502)I,(VX(I,J),J=2,M2)
503 FORCAT(1,3,IFL0,5,7)
WRITE(2,501)
FORCAT(1,3,7,7)
WRITE(2,511)
FORCAT(3,XY,VELOCIDADES EN SENTIDO Y EN PCUR/OIA/PCUA),///
1,XY,2,XY,3,XY,4,XY,5,XY,6,XY,7,XY,8,XY,9,XY,10,XY,11,XY,12,XY,///
2,10,3,XY,4,XY,5,XY,6,XY,7,XY,8,XY,9,XY,10,XY,11,XY,12,XY,///
409 K=2,M2
WRITE(2,503)I,(VY(I,J),J=2,M2)
C
C
DAME CINCIENTA PUNTOS ALREDEDOR DEL POZO
C
C
DELTA=ATAN(1.0)*2.0/49.0
RESORT(2.0)*DELTA
THETA=0THET
407 NP=1,50
THETA=THETA+THET
V(NP)=COS(THETA)
V(NP)=SIN(THETA)
407 WRITE(2,600)NP,Y(NP),Y(NP),NP=1+50
FORCAT(1,1,7,4,XY,POSICION INICIAL DEL FRENTE),///41X,13,PX,F8.3,8Y,F8.3)
409 IV(DIES),1,XY,IV(DIES),1,XY,IV(DIES),1,XY,IV(DIES),1,XY,IV(DIES),1,XY,

```



```

XO=M*DELTX
YO=M*DELTY
TIME=DOOR*500*(DELTX**2)*M**H/H/O
DOT=TIMEP/10.0
C
C ENCONTRAR POSICION DE CADA PUNTO (EN CUAL CUADRADO)
C
ICONT=0
T=0.0
16 ICONT=ICONT+1
   DO 413 NP=1,50
     JP=X(NP)/DELTX+2
     IP=Y(NP)/DELTY+2
C
C INTRODOLAR PARA ENCONTRAR VELOCIDADES EN CADA PUNTO
C
   RJP=JP
   AP=(Y(NP)-(RJP-2.0)*DELTY)/DELTX
   RIP=IP
   AP=(Y(NP)-(RIP-2.0)*DELTY)/DELTX
   VI=VX(IP,JP)*(1.0-A1)+VX(IP,JP+1)*A1
   V2=VX(IP+1,JP)*(1.0-A1)+VX(IP+1,JP+1)*A1
   VVP(NP)=V1*(1.0-A2)+V2*A2
   VI=VY(IP,JP)*(1.0-A2)+VY(IP+1,JP)*A2
   V2=VY(IP,JP+1)*(1.0-A2)+VY(IP+1,JP+1)*A2
   VVP(NP)=V1*(1.0-A1)+V2*A1
   413 CONTINUE
C
C ENCONTRAR MAGNITUD DE LA VELOCIDAD MAXIMA
C
   VMAX=0.0
   DO 414 NP=1,50
     VE=(VVP(NP)**2+VVP(NP)**2)
     IF(VMAX-V)10,11,11
10  VMAX=V
11  CONTINUE
   VM=V*SQRT(VMAX)
C
C CALCULAR OT QUE PERMITE AL PUNTO MOVERSE 1/10 DE DELTX
C
   OT=0.1*DELTX/VMAY
   DO 414 NP=1,50
     X(NP)=X(NP)+VXP(NP)*OT
     Y(NP)=Y(NP)+VYP(NP)*OT
414  ICONT=ICONT+1
     T=TIME+OT
13  WRITE(2,504)OT,T,(NP,X(NP),Y(NP),NP=1,50)
504  FORMAT(11,/,47V,' NUEVA POSICION DEL FRONT'///,41X,' INCREMENTO EN
     1EL TIEMPO=1,56,21X,' DIAS',/41X,' TIEMPO ACUMULADO=1,57,21X,' DIAS',
     2,/,41Y,' PUNTO',3Y,' X(DIES)',10X,' Y(DIES)',/,41Y,13,3X,FR,3,3X,
     350,3)
     DOT=DOT+TIMEP/10.0
13  CONTINUE
C
C CHEQUEO PARA LA RUPURA
C
   DO 415 NP=1,50
     IF(ABS(Y(NP)-YO)-DELTY)19,415,415

```



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL



PAGE 4

```

19 IFIARS(Y(NP)-YD)-DELTX)14,415,415
14 WRITE(3,520)DT,(NP,X(NP),Y(NP),NP=1,50)
520 FORMAT(11,40X,'POSICION EN LA RUPTURA'///41X,'INCREMENTO EN FL TI
1EMPO=1,66,3,1X,'OIASI'///41X,'TIEMPO ACUMULADO=1,67,3,1X,'DIAS'///
241Y,'PUNTO1,8X,'Y(PIFS)'1,10X,'Y(PIFS)'///(41X,13,8X,F8.3,8X,F8.3))
GO TO 506
415 CONTINUE
1E11CONT=15000116,16,17
17 WRITE(3,505)ICONT
505 FORMAT(///,5X,'ICONT=1,15)
506 CALL EXIT
END

```

FEATURES SUPPORTED:  
ONE WORD INTEGERS  
EXTENDED PRECISION  
IACS

CORE REQUIREMENTS FOR  
COMMON 0 VARIABLES 3466 PROGRAM 1908  
END OF COMPIATION



## CAPITULO V

### ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Con el objeto de observar el comportamiento del modelo numérico al efectuar cambios en los valores de ciertos parámetros, hemos hecho variar el producto permeabilidad-espesor y las ratas de flujo.

Presentamos los resultados de tres estudios realizados en el mismo modelo numérico, pero que se diferencian entre sí, por los valores asignados ya sea al producto permeabilidad-espesor o ya sea a las ratas de flujo. En dos de estos estudios se consideró que el modelo posee características homogéneas, mientras que en el tercero los valores asignados al producto permeabilidad-espesor son heterogéneos.

Se debe indicar que en los tres estudios hechos, el valor del espesor ( $h$ ) siempre ha sido el mismo en todo el modelo, a pesar de que se cambian los valores del producto permeabilidad-espesor, lo que nos indica que solo fue el valor de la permeabilidad ( $K$ ) el que sufrió variaciones.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Es decir que en los tres estudios realizados se han

considerado las restricciones hechas en la parte B del Capítulo I, pero considerando los cambios indicados anteriormente.

A. MODELO CON CARACTERISTICAS HOMOGENEAS DE SU PRODUCTO PERMEABILIDAD-ESPESOR.

Los estudios hechos al modelo numérico cuando se le asignó a éste características homogéneas de su producto permeabilidad-espesor, nos han dado resultados semejantes a los que se obtendrían cuando se hace estudios por medio de cualquier otro tipo de simulador, sean estos: modelos potenciométricos, modelos electrolíticos, modelos de rayos X, etc. Esta similitud de resultados se puede apreciar si se observa el Gráfico 1 (en el apéndice) y se lo compara con cualquier gráfico obtenido de los resultados de algún otro tipo de simulador al que se le hayan asignado iguales características.

Si sabemos que el tiempo de rompimiento en el caso de un barrido ideal está dado por la fórmula:

$$t_n = \frac{\text{Volumen poroso de aceite (ft)}}{\text{Rata de inyección (ft}^3\text{/día)}}$$

Donde:



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\text{Volumen poroso de aceite} = Ah (1 - S_{wi})$$

$$\text{Rata de inyección} = q_{wi}$$

Luego:

$$t_n = \frac{A h \phi S_o}{q_{wi}} \quad V-2$$

Entonces:

a) Tendremos que para un estudio hecho en el modelo con una rata de inyección de  $250 \text{ ft}^3/\text{día}$ , y con los valores de:

$$A = 10000 \text{ ft}^2$$

$$h = 10 \text{ ft}$$

$$\phi = 0.2$$

$$S_o = 0.5$$

el tiempo teórico de ruptura será:

$$t_n = \frac{10000 \times 10 \times 0.2 \times 0.5 \text{ ft}^3}{250 \text{ ft}^3/\text{día}}$$

$$t_n = 40 \text{ días}$$

comparando este valor con el tiempo de ruptura real del modelo que es 33.452 días, vamos a tener:

$$t_{n\text{teórico}} > t_{n\text{real}}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

b) De igual manera para el estudio hecho sobre el mismo modelo, pero con una rata de inyección de 400  $\text{ft}^3/\text{día}$ , el tiempo teórico de ruptura será:

$$t_n = \frac{10000 \times 10 \times 0.2 \times 0.5 \text{ ft}^3}{400 \text{ ft}^3/\text{día}}$$

$$t_n = 25 \text{ días}$$

Comparando este valor con el tiempo de ruptura real del modelo que es 20.908 días, tendremos:

$$t_{n_{\text{teórico}}} > t_{n_{\text{real}}}$$

En estos dos estudios hemos tenido resultados similares, con la diferencia de que la ruptura se alcanza mucho más rápido con una mayor rata de inyección, como es lógico.

Sabiendo que la eficiencia areal de barrida es la fracción del área horizontal del yacimiento, donde ha ocurrido el proceso de recuperación, medimos con precisión el área barrida hasta el momento de la ruptura en el gráfico 1, y obtuvimos un valor de 84.445.

B. MODELO CON CARACTERISTICAS HETEROGENEAS DE SU PRODUCTO PERMEABILIDAD - ESPESOR.

Los resultados que hemos obtenido en el estudio del modelo numérico cuando a este le fueron asignado valores heterogéneos para su producto permeabilidad-espesor, se encuentran representados en el Gráfico 2. La irregularidad de las curvas que nos representan el frente de invasión, nos indican que el desplazamiento está de acuerdo con las características asignadas al modelo.

El tiempo de ruptura que se obtiene por medio de la fórmula V-2, para este modelo con una rata de inyección de  $400 \text{ ft}^3/\text{día}$  y los valores:

$$A = 10000 \text{ ft}^2$$

$$h = 10 \text{ ft}$$

$$\phi = 0.2$$

$$S_0 = 0.5$$

$$t_r = \frac{10000 \times 10 \times 0.2 \times 0.5 \text{ ft}^3}{400 \text{ ft}^3/\text{día}}$$

$$t_r = 25 \text{ días}$$

Comparando con el valor del tiempo de ruptura real del modelo que es: 17.430 días, nos indica que:



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$t_{\text{teórico}} > t_{\text{real}}$$

Debe indicarse que en este caso se ha considerado un modelo más permeable que los dos anteriores, a pesar de su heterogeneidad respecto al producto permeabilidad-espesor, lo que hizo que el rompimiento se realice más rápido.

La eficiencia areal de barrido que se ha obtenido de planimetrar el área barrida hasta el momento de la ruptura en el Gráfico 2 es 65.93, lo que nos indica que las heterogeneidades redujeron el valor de esta eficiencia.



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

## CAPITULO VI CONCLUSIONES

La simulación numérica que se ha realizado en este trabajo, se la ha basado en datos teóricos, aunque sin ningún problema se lo podría llevar a cabo con datos reales de un yacimiento, pero respetando las consideraciones asumidas en la sección B del capítulo I.

Para la realización de este estudio hemos hecho uso de las Ecuaciones de Flujo, las Diferencias Finitas, el Método Implícito de Dirección Alternante, el Algoritmo de Thomas, y una Computadora IBM-1130 por medio del lenguaje Fortran IV. Además de que se utilizó cincuenta puntos para hacerlos viajar desde el pozo inyector hasta el pozo productor. Todo este proceso está escrito en lenguaje Fortran en cuatro programas, los cuales ya fueron analizados en el Capítulo IV.



Debe indicarse que no se ha escogido un modelo de mayores dimensiones y no se ha hecho variar ~~5000~~ parámetros debido a que el tiempo de computación es bastante grande, especialmente en lo referente a la estabilización de la presión, pues solo para este pequeño mode-



lo toma unos 25 a 30 minutos.

Los programas han sido hechos de tal manera que se puede aumentar la precisión de los resultados al aumentar el número de nodos de la malla y disminuir los valores de  $\Delta x$  y  $\Delta y$ . También pueden variarse las dimensiones del modelo pues esto está previsto en los programas

En lo referente al Método Implícito de Dirección alternante diremos que se obtuvo convergencia a la 11<sup>a</sup> iteración para el modelo homogéneo y a la 13<sup>a</sup> iteración para el modelo heterogéneo.

En lo que respecta a los resultados, debemos concluir que han sido satisfactorios, según los cálculos teóricos, como lo demuestran las comparaciones hechas en el capítulo V en lo referente al tiempo de ruptura y a la eficiencia areal de barrido.

Se concluye que el método usado en este estudio - trabaja muy bien en los casos que se los ha ~~aplicado~~, sin embargo con el uso de la Computadora IBM 1130 es muy difícil aplicarlo a problemas prácticos de campo por la capacidad de la memoria de la máquina y el tiempo de computación que se requeriría.



BIBLIOTECA HIST.  
ESPOL

## RECOMENDACIONES

1. Hacer un estudio del modelo matemático asignándole a sus dimensiones y características valores reales, eso si respetando las limitaciones hechas para el modelo.
2. Comprobar los resultados obtenidos por medio de la simulación matemática con los resultados que se obtengan de un análisis por cualquier otro tipo de simulador, para un modelo semejante a este.
3. Aumentar la precisión de los resultados suponiendo una malla con mayor número de nodos, pero con menores  $\Delta x$  i  $\Delta y$ , de tal forma que la ruptura se produzca a una distancia lo menor posible del pozo productor.
4. Extender el presente trabajo a un yacimiento completo con varios pozos productores e inyectores.
5. Hacer un estudio de factores de convergencia, ya que estos juegan un papel muy importante en este método.



BIBLIOTECA FICTICIA  
ESPOL

## APENDICE A

### DEDUCCION DE LAS ECUACIONES DE FLUJO

La ecuación matemática que nos describe el movimiento de los fluidos, puede detenerse a partir de los siguientes principios físicos:

1. Ley de la conservación de la masa.
2. Ley de Darcy.
3. Ecuación de estado del fluido

La ley de la conservación de la masa se la expresa por la ecuación de la continuidad. Para escribir la ecuación de continuidad vamos a considerar un fluido que fluye a través de un elemento de volumen (Fig. A-1).

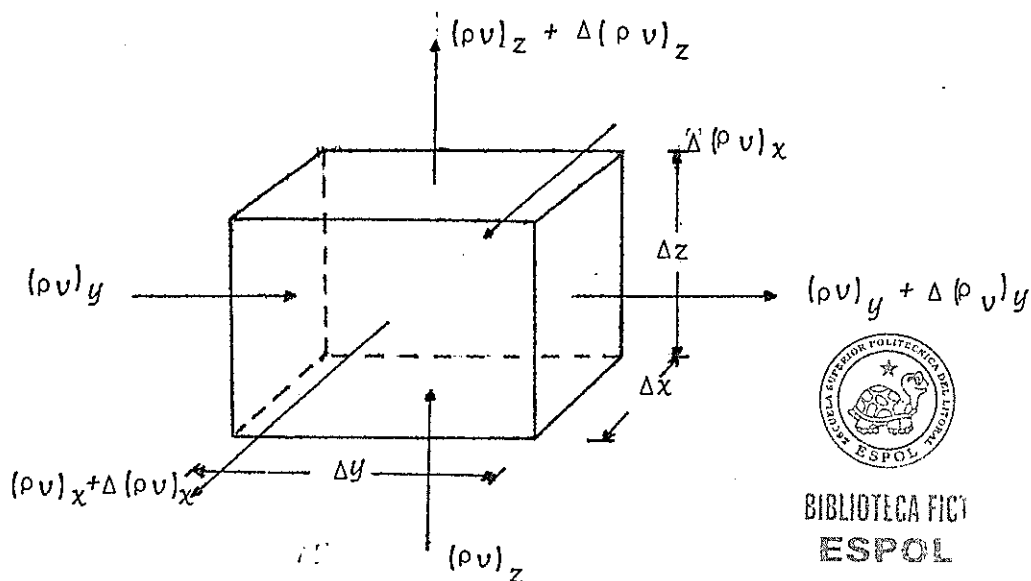


FIGURA A-1

Esta ecuación establece que:

$$\begin{array}{rcl} \text{Masa de fluido} & & \text{Variación} \\ \text{que entra} & - & \text{de masa} \\ & & \text{que sale} \end{array} = \text{A-1}$$

Entonces, si estas tasas de flujo másico son volumétricas se puede expresar:

$$\text{Masa de fluido que entra} = (\rho v)_x \Delta y \Delta z \Delta t + (\rho v)_y \Delta x \Delta z \Delta t + (\rho v)_z \Delta x \Delta y \Delta t$$

$$\begin{aligned} \text{Masa de fluido que sale} &= (\rho v)_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z \Delta t + (\rho v)_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z \Delta t + \\ &(\rho v)_{z+\Delta z} \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned}$$

$$\text{Variación de masa} = \Delta x \Delta y \Delta z (\phi \rho S)_{t+\Delta t} - (\phi \rho S)_t$$

Reemplazando estas expresiones en A-1, y desarrollando tenemos:

$$-\Delta t \Delta y \Delta z \Delta (\rho v)_x + \Delta x \Delta z \Delta (\rho v)_y + \Delta x \Delta y \Delta (\rho v)_z = \Delta x \Delta y \Delta z (\phi \rho S)_{t+\Delta t} - (\phi \rho S)_t$$

Dividiendo todo para  $\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$ :

$$-\frac{\Delta (\rho v)_x}{\Delta x} + \frac{\Delta (\rho v)_y}{\Delta y} + \frac{\Delta (\rho v)_z}{\Delta z} = \frac{(\phi \rho S)_{t+\Delta t} - (\phi \rho S)_t}{\Delta t}$$



ESPOL

Pasando al límite cuando:  $x, y, z, t$  tienden a cero podemos escribir:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho v)_x + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v)_y + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v)_z = - \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho S) \quad A-2$$

En donde los términos son:

$v$  = velocidad del fluido

$\rho$  = densidad del fluido

$x, y, z$  = direcciones según los ejes coordenados

$\phi$  = porosidad

$S$  = saturación del fluido

$t$  = tiempo

Según la ley de Darcy:

$$v_x = - \frac{K_r K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad A-3$$

$$v_y = - \frac{K_r K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad A-4$$

$$v_z = - \frac{K_r K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad A-5$$

Donde:

$v$  = velocidad del fluido (cm/seg.)



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

- $K_r$  = Permeabilidad relativa del fluido  
 $K_x, K_y, K_z$  = Permeabilidad en las direcciones  $x, y, z$  (Darcy)  
 $\mu$  = Viscosidad del fluido (cp)  
 $P$  = Presión que actúa sobre el fluido (atm)

Reemplazando estas expresiones en A-2

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho K_r K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho K_r K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho K_r K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho S) \quad A-6$$

Si consideramos  $S=1$  para flujo monofásico y también  $K_r = 1$ , entonces tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho K_z}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial t} (\phi \rho) \quad A-7$$

De la ecuación de estado tenemos que a temperatura constante:

$$c = - \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T$$

A-8

Donde:

- $c$  = compresibilidad  
 $v$  = volumen  
 $P$  = presión



BIBLIOTECA FICV  
ESPOL

$t$  = temperatura

Esto se puede expresar en función de la densidad.

$$C = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \quad A-9$$

De donde:

$$\partial \rho = \rho C \partial P$$

Dividiendo ambos miembros para  $U$ ; tendremos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial U} = \rho C \frac{\partial P}{\partial U} \quad A-10$$

Derivando en la expresión A-7 considerando viscosidad, permeabilidad y porosidad constantes, y ordenando luego:

$$\frac{\rho K_x}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\rho K_y}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\rho K_z}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{1}{\mu} K_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + K_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} + K_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} = \phi \frac{\partial \rho}{\partial t}$$



Usando A-10 en el segundo término del primer miembro de esta última igualdad:

$$\frac{\rho K_x}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\rho K_y}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\rho K_z}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\rho C}{\mu} K_x \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + K_y \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 + K_z \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 = \phi \rho C \frac{\partial P}{\partial t}$$

Asumiendo que los gradientes de presión suficientemente pequeños como para que sus cuadrados sean despreciados y que igualmente la compresibilidad es pequeña tendremos:

$$\frac{\partial K_x}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\rho K_y}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\rho K_z}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \phi \rho c \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-11$$

Simplificando términos semejantes, asumiendo que:  $K_x = K_y = K_z = K$ , y trasponiendo nos queda:

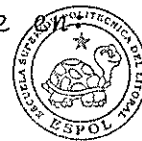
$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{\phi \mu c}{K} \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-12$$

La A-12 consideramos variación de movilidad, tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \phi c \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-13$$

Para flujo bidimensional el tercer término del primer miembro de A-13 es cero, luego esta se convierte en

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \phi c \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-14$$



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

Si multiplicamos todo A-14 por  $h$ , donde este es el espesor y consideramos que este varía con la posición sobre



el plano  $x-y$ , es decir  $h(x,y)$ , vamos a tener:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \phi ch \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-15$$

Puesto que estos términos en A-15 no son otra cosa que velocidades, y como:

$$v = \frac{q}{A} = - \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad A-16$$

Donde:

$q$  = rata de inyección o producción ( $\text{cm}^3/\text{seg}$ )

$A$  = Area perpendicular al flujo =  $h \Delta y (\text{cm}^2)$

Entonces reemplazando  $A$  en la ecuación A-16.

$$\frac{q}{h \Delta y} = - \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

Dividiendo ambos miembros para  $\Delta x$  y trasponiendo

$$\frac{q}{\Delta x \Delta y} = - \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta x} \right)$$



BIBLIOTECA  
ESPOL

La A-17 llevada al límite cuando  $x$  tiende a cero nos dá una expresión similar al primer término del lado izquierdo de A-15. Igualmente tendríamos para el caso de

que fuera en sentido y la expresión.

Luego si añadimos a A-15 un término de inyección tendremos que hacerlo según A-17, y entonces:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{q}{\Delta x \Delta y} = \phi c h \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-18$$

En el caso de un fluido incompresible, la ecuación A-18 tendrá su segundo miembro igual a cero, y tendremos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{q}{\Delta x \Delta y} = 0 \quad A-19$$

Que es la ecuación de Laplace modificada para permitir la variación del producto movilidad-espesor, y con un término de inyección añadido.

La ecuación A-18 está expresada en las unidades siguientes:

$q$  en  $\text{cm}^3/\text{seg}$ ;  $x, y, h$  en  $\text{cm}$ ;  $P$  en  $\text{atm}$ ;  $K$  en Darcys; en centipoise;  $c$  en  $\text{atm}^{-1}$  en porcentaje.

La misma ecuación A-18, expresada en unidades de campo es:



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Kh}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \frac{q}{1,127 \Delta x \Delta y} = \frac{\phi ch}{1.127 \times 5.615} \frac{\partial P}{\partial t} \quad A-20$$

Donde:

$q$  está dado en Bbl/día;  $K$  en Darcy;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $h$  en pies;  
 $P$  en lbs/pulg<sup>2</sup> absolutas (psia); en  $t$  en días;  $\mu$  en cen-  
 tipoise;  $c$  en psia<sup>-1</sup>;  $\phi$  en porcentaje.



BIBLIOTECA FIC  
 ESPOL

## APENDICE B

### TIPOS DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARCIALES

Las ecuaciones diferenciales parciales son de tipo no lineal cuando los coeficientes de las derivadas son funciones de las variables independientes y dependientes. En este caso es difícil su clasificación.

Una ecuación diferencial parcial general, tiene la forma:

$$A(x,y)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B(x,y)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C(x,y)\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x,y,u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}) \quad B-1$$

Si  $f = 0$  la ecuación puede ser reducida por medio de una transformación de variables a uno de los siguientes tipos: elíptica, parabólica o hiperbólica, dependiendo de si:  $B^2 - 4AC$  es menor, igual o mayor que cero.

Como simples ejemplos de tipos de ecuaciones diferenciales parciales tenemos:

$$\text{Ecuación de Laplace: } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{elíptica})$$

$$\text{Ecuación de difusividad: } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{parabólica})$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Ecuación de la onda:  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$  (hiperbólica)



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

---

APENDICE C  
 APROXIMACION DE DERIVADAS POR DIFERENCIAS  
 FINITAS

Consideremos una función  $u(x)$ , la cual junto con su derivada son funciones continuas de  $x$  (Figura C1). Si expandimos la función usando la serie de Taylor, tendremos:

$$u(x+\Delta x) = u(x) + \Delta x u'(x) \Big|_x + \frac{(\Delta x)^2}{2} u''(x) \Big|_x + \frac{(\Delta x)^3}{6} u'''(x) \Big|_x + \dots \text{C-1}$$

o también:

$$u(x-\Delta x) = u(x) - \Delta x u'(x) \Big|_x + \frac{(\Delta x)^2}{2} u''(x) \Big|_x - \frac{(\Delta x)^3}{6} u'''(x) \Big|_x + \dots \text{C-2}$$

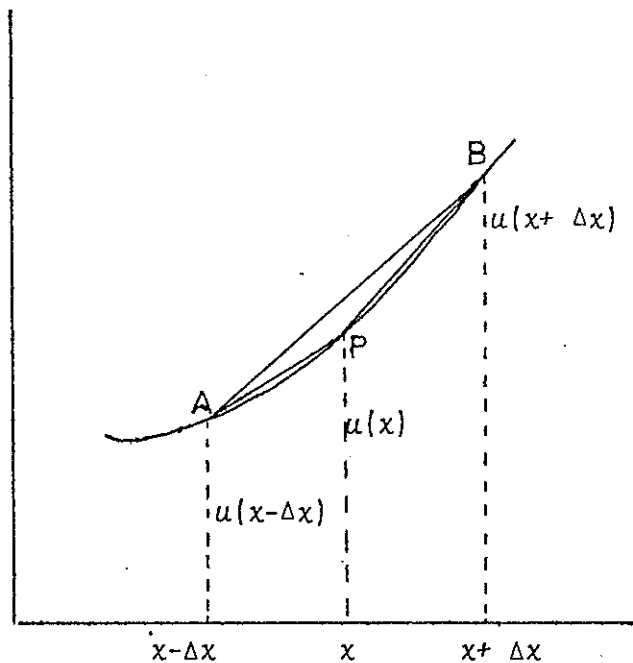


FIGURA C-1



BIBLIOTECA FICT  
 ESPOL

Despejando  $u'(x)$  en C-1:

$$u'(x) \Big|_x = \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} + \frac{\sigma(\Delta x)^2}{\Delta x}$$

$$u'(x) \Big|_x = \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} + \sigma(\Delta x) \quad \text{C-3}$$

Donde  $\sigma(\Delta x)^2$  nos indica términos que contienen segunda y mayores potencias de  $\Delta x$  y nos dá el error de trunca ción.

La igualdad C-3 es la aproximación de la primera de rivada por medio de una diferencia progresiva.

Igualmente de C-2:

$$u'(x) \Big|_x = \frac{u(x) - u(x - \Delta x)}{\Delta x} + \sigma(\Delta x) \quad \text{C-4}$$

La igualdad C-4 es la aproximación de  $u'(x)$  por una diferencia regresiva.

Si restamos C-2 de C-1, tendremos:

$$u(x + \Delta x) - u(x - \Delta x) = 2\Delta x u'(x) \Big|_x + \sigma(\Delta x)$$

Despejando  $u'(x)$ :



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

$$u'(x) \Big|_x = \frac{u(x + \Delta x) - u(x - \Delta x)}{2 \Delta x} + \sigma (\Delta x)^2 \quad C-5$$

La igualdad C-5 es la aproximación de  $u'(x)$  por una diferencia central. Aquí se comete un error de truncación del orden de  $(\Delta x)^2$ .

Si se suman C-1 y C-2, tendremos:

$$u(x+\Delta x) + u(x-\Delta x) = 2u(x) + (\Delta x)^2 u''(x) \Big|_x + \sigma (\Delta x)^4$$

Despejando  $u''(x)$ :

$$u''(x) \Big|_x = \frac{u(x+\Delta x) - 2u(x) + u(x-\Delta x)}{(\Delta x)^2} + \sigma (\Delta x)^2 \quad C-6$$

La igualdad C-6 es la aproximación de la segunda derivada por medio de una diferencia central. Esta se puede descomponer en la forma:

$$u''(x) \Big|_x = \frac{\frac{u(x+\Delta x) - u(x)}{\Delta x} - \frac{u(x) - u(x-\Delta x)}{\Delta x}}{\Delta x} + \sigma (\Delta x)^2 \quad C-7$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



APENDICE D  
SISTEMA DE MALLAS (10)

Dos tipos de malla son comunmente utilizados en los trabajos de reservorio:

- a) En un tipo de malla tenemos al rectángulo dividido en bloques interiores y el punto  $(x_j, y_i)$  se considera - que se encuentra en el centro del bloque  $(i, j)$  (Figura D1). Así vamos a tener bloques en la dirección  $x$  e 1 bloque en la dirección  $y$ .

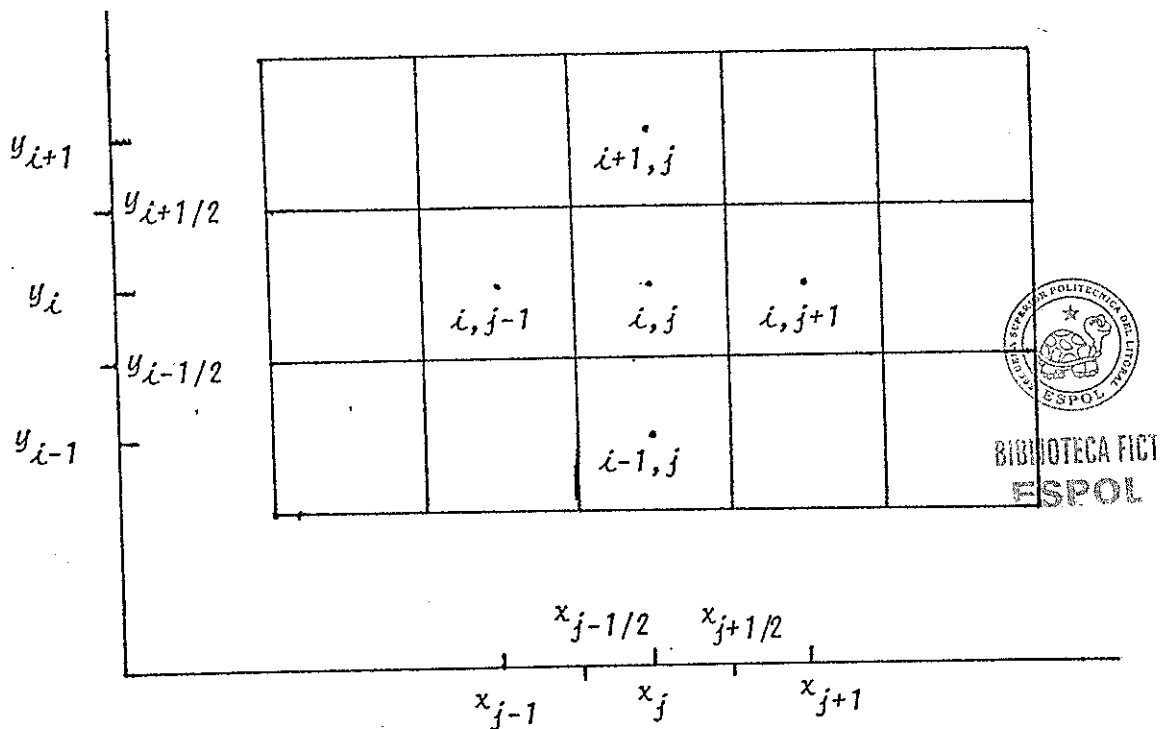


FIGURA D-1

En este sistema la coordenada  $x_{j-1/2}$  nos indica el lado izquierdo del bloque y  $x_{j+1/2}$  nos indica el lado derecho del bloque, así mismo  $y_{i-1/2}$  nos indica el lado inferior del bloque  $i$  y  $y_{i+1/2}$  nos indica el lado superior del mismo.

Este tipo de malla se la conoce con el nombre de malla de bloque centrado.

Aquí la malla se especifica por la secuencia.

$$x_{1/2}, x_{3/2}, x_{5/2}, \dots, x_{j+1/2} \quad \text{y} \quad y_{1/2}, y_{3/2}, y_{5/2}, \dots, y_{i+1/2}$$

Además:

$$x_j = \frac{1}{2} (x_{j-1/2} + x_{j+1/2})$$

$$y_i = \frac{1}{2} (y_{i-1/2} + y_{i+1/2})$$



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

- b) En el otro tipo de malla el rectángulo está ~~dividido~~ - por la malla, pero el punto  $(x_j, y_i)$ , también llamado punto  $(i, j)$  es ahora considerado en la intersección de cada línea de la malla. Así vamos a tener  $j+1$  intersecciones en la dirección  $x$  e  $i+1$  intersecciones en la dirección  $y$  (Figura D2).

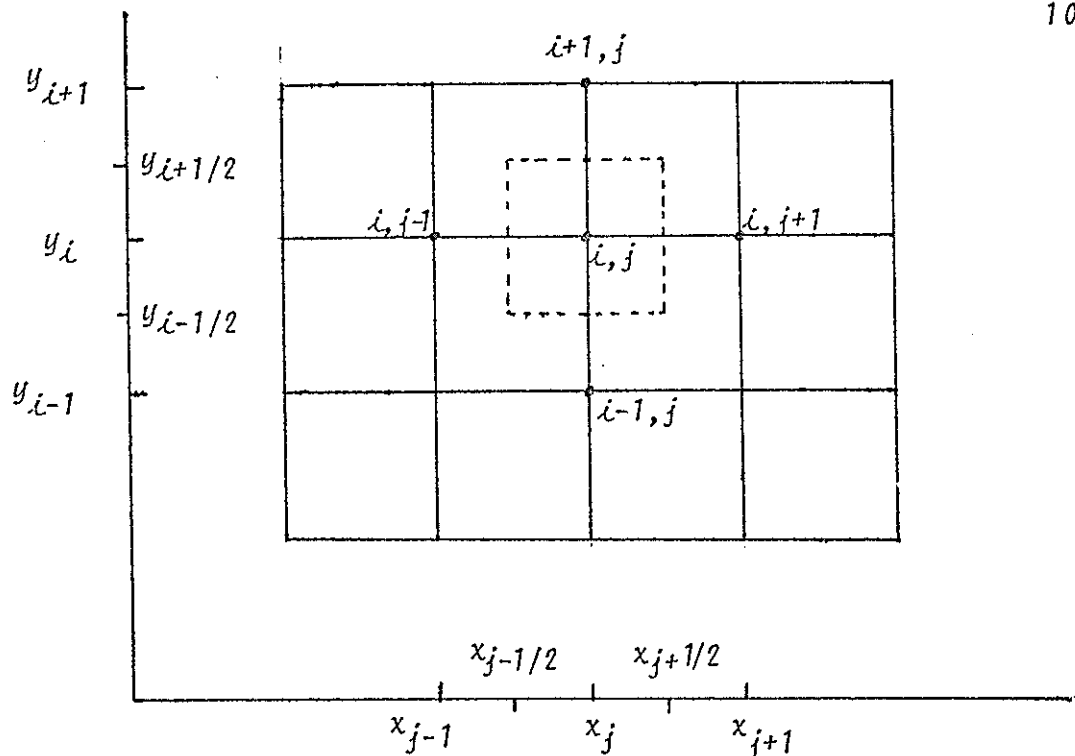


FIGURA D-2

No se le ha dado un nombre particular a este tipo de malla, pero se la puede nombrar como malla de rejilla. Se puede mantener todavía la noción de bloque centrado, pero en este caso el punto no se halla exactamente en el centro del bloque.

Aquí la malla se especifica por la secuencia:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{j+1} \quad i \quad y_1, y_2, y_3, \dots, y_{i+1}$$

Además:

$$x_{j+1/2} = \frac{1}{2} (x_j + x_{j+1})$$

$$y_{i+1/2} = \frac{1}{2} (y_i + y_{i+1})$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

APENDICE "E"  
CONDICIONES DE BORDE (8,9)

La solución de una ecuación diferencial parcial implícita la obtención de valores numéricos para las variables dependientes dentro de una región  $R$ , en los límites de la cual los valores de la función o de sus derivadas o ambos a la vez son especificados de alguna manera.

En el caso más simple de valores de la variable dependiente están dados en los bordes, así por Ej.: el valor de la presión en cada límite de una región rectangular puede ser especificado.

El caso siguiente es donde los valores de las derivadas son especificados en los límites de la región considerada. Así por Ej.: la derivada normal de presión en los bordes puede asignársela con cero (el reservorio cerrado no no existe flujo en los bordes).



Otra condición de borde puede incluir a las dos anteriores combinadas, así como complicantes características.

Si nosotros asumimos que  $u = u(x, y, t)$ , que satis-

face la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{E-1}$$

En una región  $R$  que tiene un borde  $C$ , estando  $R$  y  $C$  en el plano  $xy$ . Hasta aquí se asume que  $u$  especificada como una función  $g$  de tiempo y posición en  $C$ . Sin embargo este no es el único tipo de condición de borde. Se podría utilizar las derivadas  $u_n$  y  $u_s$  para especificar la condición o quizás se podría utilizar  $u_n$ ,  $u_s$  y  $u$ .

Aquí:

$u_s$  = derivada tangencial al borde.

$u_n$  = derivada normal al borde.

Es decir que nosotros tendríamos en  $C$  (figura E1):

Condición de Dirichlet:  $u = g$

Condición de Neumann:  $\alpha u_n + \beta u_s = g$

Tercera condición:  $\alpha u_n + \beta u_s + \gamma u = g$



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

En el caso de una región rectangular sin flujo en sus bordes o sea con límite cerrado, se puede expresar matemáticamente a estos bordes por dos procedimientos: por medio de nodos de reflexión o haciendo las permeabilida

des cero en los bordes.

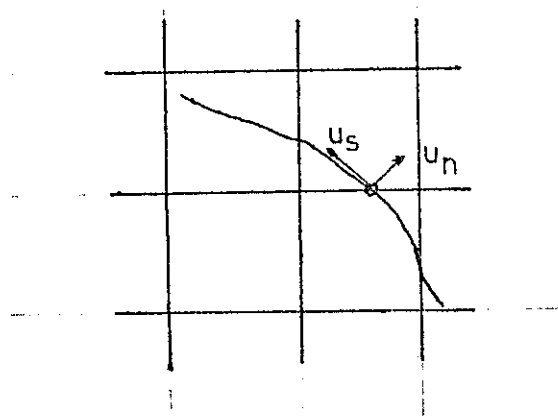


FIGURA E-1

Para el primer procedimiento, aseguramos no-flujo a través de un nodo A (Fig. E2), introduciendo un imaginario nodo B' fuera del borde de manera que este último sea la imagen del nodo B que se halla dentro del borde. Entonces las presiones son iguales en B y B', por consiguiente:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_A = \frac{P_B - P_{B'}}{2\Delta x} = 0 \quad \text{E-2}$$

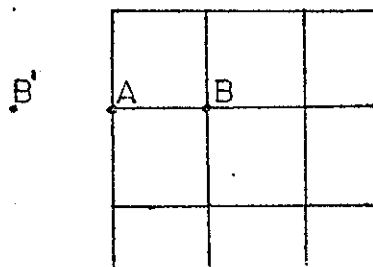


FIGURA E-2



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

En el caso de hacer cero las permeabilidades en el borde, también se sigue cumpliendo la igualdad E-2 para el Nodo A.



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

---

## APENDICE F

### DEDUCCION DE LAS FORMULAS DEL METODO DE THOMAS PARA RESOLVER UN SISTEMA TRIAGONAL DE ECUACIONES

Supongamos que tenemos un sistema de 4 ecuaciones con incógnitas  $x_1, x_2, x_3, x_4$  representado por la ecuación matricial.

$$Ax = D$$

Donde:

$$A = \begin{vmatrix} b_1 & c_1 & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 \end{vmatrix}$$

y

$$x = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix} \quad D = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{vmatrix}$$

Si utilizamos el método de eliminación de Gauss para resolver esta ecuación matricial, tendremos:

La matriz aumentada es:  $C = [A \mid D]$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



$$C = \left| \begin{array}{cccc|c} b_1 & c_1 & & & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & & d_2 \\ & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ & & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Dividiendo la primera fila para  $b_1 = w_1$

$$C = \left| \begin{array}{cccc|c} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & \frac{d_1}{w_1} \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & d_2 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Multiplicando la primera fila por  $a_2$  y restando a la segunda fila, llamando  $\frac{d_1}{w_1} = g_1$

$$C = \left| \begin{array}{cccc|c} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & (b_2 - \frac{a_2 c_1}{w_1}) & c_2 & 0 & (d_2 - a_2 g_1) \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Hacemos  $(b_2 - \frac{a_2 c_2}{w_1}) = w_2$ , y dividimos la 2ª fila por  $w_2$ :

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & \frac{d_2 - a_2 g_1}{w_2} \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Hacemos  $(\frac{d_2 - a_2 g_1}{w_2}) = g_2$ , multiplicando la 2ª fila por  $a_3$  y restando  $\tilde{a}$  la 3ª fila:

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & (b_3 - \frac{a_3 c_2}{w_2}) & c_3 & (d_3 - a_3 g_2) \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Haciendo  $(b_3 - \frac{a_3 c_2}{w_2}) = w_3$ , y dividiendo la 3ª fila

la por  $w_3$ :

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & \left( \frac{d_3 - a_3 g_2}{w_3} \right) \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & d_4 \end{array} \right|$$

Haciendo  $\left( \frac{d_3 - a_3 g_2}{w_3} \right) = g_4$ , multiplicando la 3ª fila por  $a_4$  y restando de la 4ª fila.

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & \left( b_4 - \frac{a_4 c_3}{w_3} \right) & (d_4 - a_4 g_3) \end{array} \right|$$

Hacemos  $\left( b_4 - \frac{a_4 c_3}{w_3} \right) = w_4$  y dividimos la 4ª fila por  $w_4$ :

$$C = \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \left( \frac{d_4 - a_4 g_3}{w_4} \right) \end{array} \right|$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Haciendo  $\left(\frac{d_4 - a_4 d_3}{w_4}\right) = g_4$ :

$$C = \begin{array}{c|cccc|c} & 1 & \frac{c_1}{w_1} & 0 & 0 & g_1 \\ & 0 & 1 & \frac{c_2}{w_2} & 0 & g_2 \\ & 0 & 0 & 1 & \frac{c_3}{w_3} & g_3 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & g_4 \end{array}$$

Luego tendremos que:

$$\begin{aligned} x_4 &= g_4 \\ x_3 &= g_3 - \frac{c_3 x_4}{w_3} \\ x_2 &= g_2 - \frac{c_2 x_3}{w_2} \\ x_1 &= g_1 - \frac{c_1 x_2}{w_1} \end{aligned}$$



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Se puede observar que un procedimiento similar es aplicable a un mayor número de ecuaciones, luego para un sistema de  $N+1$  ecuaciones con  $N+1$  incógnitas se lo puede resolver usando el siguiente algoritmo:

$$x_k = g_k - \frac{c_k x_{k+1}}{w_k} \quad (1 \leq k \leq n)$$

$$x_n = g_n$$

Donde:

$$w_k = b_k - \frac{a_k c_{k-1}}{w_{k-1}} \quad (2 \leq k \leq n+1)$$

$$w_1 = b_1$$

$$g_k = \frac{d_k - a_k g_{k-1}}{w_k} \quad (2 \leq k \leq n+1)$$

$$g_1 = \frac{d_1}{w_1}$$



BIBLIOTECA FIC1  
ESPOL

## MONOGRAMAS

SIMBOLO	FORTRAN	
<i>a</i>	A	<i>Coefficiente de la matriz</i>
<i>b</i>	B	<i>Coefficiente de la matriz</i>
<i>c</i>	C	<i>Coefficiente de la matriz</i>
<i>d</i>	D	<i>Coefficiente de la matriz</i>
<i>g</i>	G	<i>Elemento del algoritmo de Thomas</i>
<i>w</i>	W	<i>Elemento del algoritmo de Thomas</i>
<i>h</i>	H	<i>Espesor del modelo</i>
$K_x$	KHH	<i>Permeabilidad en dirección x</i>
$K_y$	KHV	<i>Permeabilidad en dirección y</i>
<i>q</i>	Q	<i>Rata de flujo</i>
<i>r</i>	R	<i>Radio</i>
<i>t</i>	T	<i>Tiempo</i>
$v_x$	VX	<i>Velocidad en dirección x</i>
$v_y$	VY	<i>Velocidad en dirección</i>
<i>v</i>	v	<i>Velocidad</i>
<i>x</i>	X	<i>Posición en x</i>
<i>y</i>	Y	<i>Posición en y</i>
<i>m</i>	M	<i>Número de intervalos en dirección y</i>
<i>n</i>	N	<i>Número de intervalos en dirección x</i>
	PANT	<i>Presión en tiempo anterior</i>
	PNUE	<i>Presión actual</i>
<i>Sod</i>	SOD	<i>Saturación de aceite desplazable</i>



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

SIMBOLO	FORTTRAN	
$\Delta$	DELTA	Cambio de presión en el progreso de los cálculos.
$\Delta x = \Delta y$	DELTX	Longitud del intervalo
$\Delta t$	DT	Incremento en el tiempo
$\Delta x$	DX	Longitud del intervalo en dirección x.
$\Delta y$	DY	Longitud del intervalo en dirección y.
$\Delta \theta$	DTHET	Incremento en el ángulo
$\gamma$	GAM	Parámetro de iteración
$\phi$	POR	Porosidad
$\mu$	VIS	Viscosidad



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

Q = 250.0 PCUB/DIA

S O D = 0.50

DE L I A = 1.00  
V I S = 1.0 CP

N = 10  
M = 10



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
11	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
10	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
9	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
8	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
7	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
6	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
5	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
4	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
3	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
2	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y ENTRE LOS NODOS EN MILIDARCIS-PIES

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

PRESIONES EN LOS NODOS EN L P C

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	100.000	99.281	97.845	95.684	92.764	89.007	84.240	78.113	69.900	57.977	38.231
11	100.718	100.000	98.571	96.440	93.600	90.013	85.594	80.191	73.605	65.793	57.977
10	102.154	101.428	100.000	97.905	95.180	91.849	87.928	83.447	78.527	73.605	69.900
9	104.315	103.559	102.094	100.000	97.363	94.271	90.818	87.134	83.447	80.191	78.113
8	107.235	106.399	104.819	102.636	100.000	97.052	93.936	90.818	87.928	85.594	84.240
7	110.992	109.995	108.150	105.728	102.947	100.000	97.052	94.271	91.849	90.013	89.007
6	115.759	114.405	112.071	109.181	106.063	102.947	100.000	97.363	95.180	93.600	92.764
5	121.886	119.908	116.552	112.865	109.181	105.728	102.636	100.000	97.905	96.440	95.684
4	130.099	126.394	121.472	116.552	112.071	108.150	104.819	102.094	100.000	98.571	97.845
3	142.022	134.206	126.394	119.808	114.405	109.986	106.399	103.559	101.428	100.000	99.231
2	161.768	142.022	130.099	121.886	115.759	110.992	107.235	104.315	102.154	100.718	100.000



	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00000	0.68153	1.13839	1.60773	2.11245	2.69712	3.44699	4.53695	6.37089	10.02032	10.02032
11	0.00000	0.67909	1.12620	1.57293	2.03237	2.53289	3.10776	3.79357	4.55570	4.94460	0.00000
10	0.00000	0.68153	1.11467	1.52502	1.91606	2.29426	2.65846	2.97446	3.11403	2.72958	0.00000
9	0.00000	0.70282	1.12620	1.49702	1.81243	2.07062	2.25822	2.33239	2.19668	1.69774	0.00000
8	0.00000	0.74424	1.19058	1.52502	1.75689	1.91851	1.97227	1.90078	1.65285	1.16709	0.00000
7	0.00000	0.88921	1.34714	1.64620	1.81243	1.86523	1.81243	1.64620	1.34714	0.89921	0.00000
6	0.00000	1.16709	1.65285	1.90078	1.97227	1.91851	1.76689	1.52503	1.19058	0.76424	0.00000
5	0.00000	1.69774	2.19668	2.33239	2.25822	2.07062	1.81243	1.49703	1.12620	0.70282	0.00000
4	0.00000	2.72958	3.11403	2.97446	2.65846	2.29426	1.91606	1.52503	1.11467	0.68153	0.00000
3	0.00000	4.94460	4.55570	3.79357	3.10776	2.53289	2.03337	1.57293	1.12620	0.67909	0.00000
2	10.02032	10.02032	6.37089	4.53695	3.44699	2.69712	2.11245	1.60773	1.13839	0.68153	0.00000



VELOCIDADES EN SENTIDO Y EN PCUR/DIA/PCUA

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	10.02032
11	0.68153	0.67909	0.68153	0.70282	0.76424	0.89921	1.16709	1.68774	2.72958	4.94460	10.02032
10	1.13839	1.12620	1.11467	1.12620	1.19058	1.34714	1.65285	2.19668	3.11403	4.55570	6.37089
9	1.60773	1.57293	1.52503	1.49703	1.52503	1.64620	1.90078	2.33239	2.97446	3.79357	4.53695
8	2.11245	2.03337	1.91606	1.81243	1.75689	1.81243	1.97227	2.25822	2.65846	3.10776	3.44699
7	2.69712	2.53289	2.29426	2.07062	1.91851	1.86523	1.91851	2.07062	2.29426	2.53289	2.69712
6	3.44699	3.10776	2.65846	2.25822	1.97227	1.81243	1.76689	1.81243	1.91606	2.03337	2.11245
5	4.53695	3.79357	2.97446	2.33239	1.90078	1.64620	1.52502	1.49702	1.52502	1.57293	1.60773
4	6.37089	4.55570	3.11403	2.19668	1.65285	1.34714	1.19058	1.12620	1.11467	1.12620	1.13839
3	10.02032	4.94460	2.72958	1.68774	1.16709	0.89921	0.76424	0.70282	0.68153	0.67909	0.68153
2	10.02032	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	14.142	0.000
2	14.134	0.453
3	14.113	0.906
4	14.076	1.357
5	14.026	1.808
6	13.960	2.257
7	13.881	2.703
8	13.787	3.146
9	13.679	3.587
10	13.557	4.023
11	13.421	4.456
12	13.271	4.884
13	13.108	5.307
14	12.931	5.724
15	12.741	6.136
16	12.538	6.541
17	12.322	6.939
18	12.093	7.331
19	11.852	7.715
20	11.598	8.090
21	11.333	8.458
22	11.056	8.817
23	10.768	9.167
24	10.469	9.507
25	10.159	9.838
26	9.838	10.158
27	9.507	10.469
28	9.167	10.768
29	8.817	11.056
30	8.458	11.333
31	8.090	11.598
32	7.715	11.852
33	7.331	12.093
34	6.939	12.322
35	6.541	12.538
36	6.136	12.741
37	5.724	12.931
38	5.307	13.108
39	4.884	13.271
40	4.456	13.421
41	4.023	13.557
42	3.587	13.679
43	3.146	13.787
44	2.703	13.881
45	2.257	13.960
46	1.808	14.026
47	1.358	14.076
48	0.906	14.113
49	0.453	14.134
50	0.000	14.142



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

INCREMEN TO EN EL TIEMPO= 0.251 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 4.038 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	36.142	0.000
2	35.872	1.099
3	35.590	2.211
4	35.292	3.338
5	34.975	4.481
6	34.640	5.642
7	34.285	6.824
8	33.906	8.026
9	33.504	9.256
10	33.075	10.513
11	32.611	11.728
12	32.117	12.884
13	31.602	13.986
14	31.070	15.037
15	30.519	16.048
16	29.951	17.017
17	29.367	17.952
18	28.775	18.844
19	28.176	19.698
20	27.572	20.515
21	26.969	21.290
22	26.372	22.019
23	25.777	22.710
24	25.181	23.372
25	24.594	23.991
26	23.991	24.594
27	23.372	25.181
28	22.710	25.777
29	22.019	26.372
30	21.290	26.969
31	20.515	27.572
32	19.699	28.176
33	18.844	28.775
34	17.952	29.367
35	17.018	29.951
36	16.048	30.519
37	15.038	31.070
38	13.986	31.602
39	12.884	32.117
40	11.728	32.610
41	10.513	33.075
42	9.256	33.504
43	8.026	33.906
44	6.824	34.285
45	5.642	34.640
46	4.482	34.975
47	3.338	35.292
48	2.211	35.590
49	1.099	35.872
50	0.000	36.142



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.352 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 8.000 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	49.142	0.000
2	48.807	1.704
3	48.456	3.444
4	48.082	5.223
5	47.684	7.046
6	47.261	8.919
7	46.805	10.837
8	46.298	12.672
9	45.744	14.407
10	45.152	16.055
11	44.527	17.628
12	43.873	19.140
13	43.195	20.597
14	42.498	21.981
15	41.783	23.301
16	41.051	24.558
17	40.302	25.767
18	39.547	26.912
19	38.785	28.001
20	38.021	29.034
21	37.255	30.018
22	36.493	30.949
23	35.735	31.830
24	34.974	32.672
25	34.227	33.459
26	33.460	34.226
27	32.672	34.974
28	31.830	35.735
29	30.949	36.493
30	30.018	37.255
31	29.035	38.021
32	28.001	38.785
33	26.913	39.547
34	25.767	40.302
35	24.554	41.051
36	23.301	41.783
37	21.981	42.498
38	20.597	43.195
39	19.140	43.873
40	17.628	44.527
41	16.055	45.152
42	14.407	45.744
43	12.672	46.298
44	10.837	46.805
45	8.919	47.261
46	7.046	47.684
47	5.224	48.082
48	3.444	48.456
49	1.704	48.807
50	0.000	49.142



BIBLIOTECA FICT  
 ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.450 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 12.042 DIAS

PUNTO	X(PIFS)	Y(PIES)
1	59.142	0.000
2	58.785	2.393
3	58.407	4.847
4	58.004	7.368
5	57.574	9.966
6	57.097	12.525
7	56.558	14.907
8	55.969	17.149
9	55.338	19.280
10	54.670	21.310
11	53.972	23.226
12	53.245	25.041
13	52.494	26.764
14	51.722	28.396
15	50.925	29.958
16	50.107	31.448
17	49.275	32.864
18	48.438	34.195
19	47.597	35.450
20	46.753	36.633
21	45.906	37.752
22	45.063	38.804
23	44.217	39.803
24	43.362	40.760
25	42.519	41.652
26	41.652	42.519
27	40.760	43.361
28	39.803	44.217
29	38.804	45.063
30	37.752	45.906
31	36.633	46.753
32	35.450	47.597
33	34.195	48.438
34	32.864	49.275
35	31.448	50.107
36	29.958	50.925
37	28.396	51.722
38	26.764	52.494
39	25.041	53.245
40	23.226	53.972
41	21.310	54.670
42	19.280	55.337
43	17.149	55.969
44	14.908	56.558
45	12.525	57.097
46	9.966	57.574
47	7.368	58.004
48	4.847	58.407
49	2.393	58.785
50	0.000	59.142



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.554 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 16.097 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	67.142	0.000
2	66.784	3.226
3	66.405	6.541
4	65.999	9.956
5	65.547	13.290
6	65.034	16.348
7	64.469	19.200
8	63.860	21.883
9	63.215	24.396
10	62.538	26.753
11	61.828	28.974
12	61.085	31.080
13	60.324	33.061
14	59.548	34.913
15	58.753	36.660
16	57.939	38.306
17	57.103	39.868
18	56.255	41.334
19	55.403	42.706
20	54.548	43.988
21	53.688	45.189
22	52.829	46.309
23	51.964	47.365
24	51.085	48.369
25	50.210	49.305
26	49.305	50.210
27	48.369	51.085
28	47.365	51.964
29	46.309	52.829
30	45.189	53.688
31	43.988	54.548
32	42.706	55.403
33	41.335	56.255
34	39.868	57.103
35	38.306	57.939
36	36.660	58.753
37	34.914	59.548
38	33.061	60.324
39	31.080	61.085
40	28.975	61.828
41	26.754	62.538
42	24.396	63.215
43	21.883	63.859
44	19.201	64.469
45	16.349	65.034
46	13.290	65.547
47	9.957	65.999
48	6.542	66.405
49	3.226	66.784
50	0.000	67.142



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL



NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.684 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 20.477 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	74.1142	0.000
2	73.800	4.367
3	73.437	8.862
4	73.038	13.319
5	72.585	17.335
6	72.081	21.019
7	71.541	24.423
8	70.969	27.577
9	70.359	30.526
10	69.728	33.273
11	69.084	35.825
12	68.419	38.208
13	67.731	40.433
14	67.030	42.500
15	66.321	44.424
16	65.597	46.214
17	64.851	47.892
18	64.090	49.445
19	63.312	50.889
20	62.525	52.224
21	61.726	53.461
22	60.923	54.601
23	60.106	55.661
24	59.273	56.555
25	58.438	57.567
26	57.567	58.438
27	56.555	59.273
28	55.661	60.106
29	54.601	60.923
30	53.462	61.726
31	52.225	62.525
32	50.889	63.312
33	49.445	64.090
34	47.892	64.851
35	46.214	65.597
36	44.425	66.321
37	42.500	67.030
38	40.434	67.731
39	38.208	68.418
40	35.825	69.083
41	33.274	69.728
42	30.527	70.359
43	27.578	70.969
44	24.424	71.541
45	21.019	72.081
46	17.335	72.585
47	13.319	73.038
48	8.862	73.437
49	4.367	73.800
50	0.000	74.1142



BIBLIOTECA DEL  
CONGRESO DE LA  
REPUBLICA DE COLOMBIA

NUEVA POSICION 'DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.815 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 24.276 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	79.142	0.000
2	78.821	5.639
3	78.477	11.422
4	78.093	16.701
5	77.664	21.416
6	77.211	25.699
7	76.731	29.632
8	76.237	33.262
9	75.730	36.616
10	75.217	39.715
11	74.690	42.581
12	74.168	45.230
13	73.641	47.674
14	73.098	49.921
15	72.538	51.998
16	71.970	53.906
17	71.386	55.668
18	70.782	57.277
19	70.158	58.749
20	69.513	60.091
21	68.843	61.318
22	68.162	62.427
23	67.461	63.440
24	66.736	64.371
25	65.997	65.209
26	65.209	65.997
27	64.371	66.736
28	63.440	67.461
29	62.427	68.162
30	61.318	68.843
31	60.091	69.513
32	58.749	70.158
33	57.278	70.782
34	55.668	71.386
35	53.906	71.970
36	51.998	72.538
37	49.921	73.098
38	47.674	73.641
39	45.230	74.168
40	42.581	74.690
41	39.715	75.217
42	36.616	75.730
43	33.262	76.231
44	29.633	76.731
45	25.700	77.211
46	21.416	77.664
47	16.702	78.093
48	11.423	78.477
49	5.639	78.821
50	0.000	79.142



BIBLIOTECA FR  
ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 1.005 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 28.895 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	84.142	0.000
2	83.852	7.653
3	83.543	15.145
4	83.204	21.571
5	82.859	27.268
6	82.507	32.418
7	82.179	37.118
8	81.858	41.422
9	81.568	45.379
10	81.309	49.007
11	81.050	52.332
12	80.832	55.381
13	80.629	58.166
14	80.420	60.697
15	80.205	63.002
16	79.995	65.085
17	79.779	66.971
18	79.531	68.658
19	79.246	70.163
20	78.918	71.501
21	78.546	72.685
22	78.158	73.705
23	77.713	74.610
24	77.223	75.404
25	76.692	76.082
26	76.082	76.697
27	75.404	77.223
28	74.610	77.713
29	73.705	78.158
30	72.685	78.546
31	71.501	78.918
32	70.163	79.248
33	68.659	79.531
34	66.972	79.778
35	65.085	79.995
36	63.002	80.205
37	60.697	80.420
38	58.166	80.629
39	55.381	80.832
40	52.332	81.050
41	49.007	81.309
42	45.379	81.568
43	41.422	81.857
44	37.119	82.179
45	32.419	82.507
46	27.269	82.859
47	21.571	83.203
48	15.146	83.543
49	7.653	83.852
50	0.000	84.142



BIBLIOTECA FISIOLÓGICA  
ESPAÑOLA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 1.165 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 32.221 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	87.142	0.000
2	86.875	9.518
3	86.596	18.311
4	86.311	25.707
5	86.046	32.246
6	85.830	38.142
7	85.656	43.514
8	85.559	48.431
9	85.508	52.947
10	85.553	57.093
11	85.642	60.890
12	85.782	64.371
13	85.990	67.550
14	86.218	70.431
15	86.442	73.044
16	86.703	75.386
17	86.946	77.492
18	87.183	79.342
19	87.341	80.965
20	87.443	82.362
21	87.455	83.561
22	87.422	84.546
23	87.347	85.337
24	87.176	85.980
25	86.894	86.491
26	86.491	86.894
27	85.980	87.176
28	85.337	87.347
29	84.546	87.422
30	83.561	87.455
31	82.362	87.443
32	80.965	87.341
33	79.343	87.183
34	77.494	86.946
35	75.386	86.703
36	73.044	86.442
37	70.431	86.218
38	67.550	85.990
39	64.371	85.782
40	60.891	85.642
41	57.093	85.553
42	52.947	85.508
43	48.432	85.559
44	43.515	85.656
45	38.143	85.830
46	32.247	86.046
47	25.708	86.311
48	18.311	86.596
49	9.519	86.875
50	0.001	87.142



BIBLIOTECA FICI  
ESPO.

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 1.731 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 33.452 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	88.142	0.000
2	87.884	10.315
3	87.617	19.600
4	87.360	27.393
5	87.135	34.779
6	86.975	40.487
7	86.887	45.149
8	86.883	51.334
9	86.967	56.108
10	87.155	60.501
11	87.398	64.533
12	87.757	68.250
13	88.160	71.655
14	88.586	74.749
15	89.117	77.559
16	89.651	80.094
17	90.142	82.385
18	90.596	84.405
19	91.067	86.125
20	91.512	87.574
21	91.822	89.804
22	92.034	89.805
23	92.155	90.596
24	92.142	91.214
25	91.981	91.668
26	91.668	91.981
27	91.214	92.142
28	90.596	92.155
29	89.805	92.034
30	88.804	91.822
31	87.574	91.512
32	86.125	91.067
33	84.405	90.596
34	82.385	90.142
35	80.095	89.651
36	77.559	89.117
37	74.749	88.587
38	71.655	88.160
39	68.250	87.757
40	64.534	87.398
41	60.502	87.155
42	56.109	86.967
43	51.334	86.883
44	46.149	86.887
45	40.428	86.975
46	34.280	87.134
47	27.394	87.360
48	19.601	87.617
49	10.316	87.884
50	0.001	88.142



ESPAÑA

C A R A C T E R I S T I C A S

H = 10.0 PIES  
Q = 400.0 PCUB/DIA

P O R = 0.20  
S O D = 0.50

D E L T X = 10.0 PIES  
V I S = 1.0 CP

N = 10  
M = 10



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL



PREVISIONES EN LOS NODOS EN L P C

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	100.000	98.851	96.553	93.094	88.423	82.411	74.784	64.980	51.841	32.763	1.169
11	101.148	100.000	97.714	94.304	89.760	84.022	76.951	68.306	57.768	45.269	32.763
10	103.446	102.285	100.000	96.648	92.288	86.959	80.686	73.515	65.644	57.768	51.841
9	106.905	105.695	103.351	100.000	95.781	90.834	85.310	79.415	73.515	68.306	64.980
8	111.576	110.239	107.711	104.218	100.000	95.283	90.298	85.310	80.686	76.951	74.784
7	117.588	115.977	113.040	109.165	104.716	100.000	95.283	90.834	86.959	84.022	82.411
6	125.215	123.048	119.313	114.689	109.701	104.716	100.000	95.781	92.288	89.760	88.423
5	135.019	131.694	126.484	120.584	114.689	109.165	104.218	100.000	96.648	94.304	93.094
4	148.158	142.231	134.355	126.484	119.313	113.040	107.711	103.351	100.000	97.714	96.553
3	167.236	154.730	142.231	131.693	123.048	115.977	110.239	105.695	102.285	100.000	98.851
2	198.840	167.236	148.158	135.019	125.215	117.588	111.576	106.905	103.446	101.148	100.000



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL





PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	14.142	0.000
2	14.134	0.453
3	14.113	0.906
4	14.076	1.357
5	14.026	1.808
6	13.960	2.257
7	13.881	2.703
8	13.787	3.146
9	13.679	3.587
10	13.557	4.023
11	13.421	4.456
12	13.271	4.884
13	13.108	5.307
14	12.931	5.724
15	12.741	6.136
16	12.538	6.541
17	12.322	6.939
18	12.093	7.331
19	11.852	7.715
20	11.598	8.090
21	11.333	8.458
22	11.056	8.817
23	10.768	9.167
24	10.469	9.507
25	10.159	9.838
26	9.838	10.158
27	9.507	10.469
28	9.167	10.768
29	8.817	11.056
30	8.458	11.333
31	8.090	11.598
32	7.715	11.852
33	7.331	12.093
34	6.939	12.322
35	6.541	12.538
36	6.136	12.741
37	5.724	12.931
38	5.307	13.108
39	4.884	13.271
40	4.456	13.421
41	4.023	13.557
42	3.587	13.679
43	3.146	13.787
44	2.703	13.881
45	2.257	13.960
46	1.808	14.026
47	1.358	14.076
48	0.906	14.113
49	0.453	14.134
50	0.000	14.142



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.157 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 2.524 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	36.142	0.000
2	35.872	1.099
3	35.590	2.211
4	35.292	3.338
5	34.975	4.481
6	34.640	5.642
7	34.285	6.824
8	33.906	8.026
9	33.504	9.256
10	33.075	10.513
11	32.611	11.728
12	32.117	12.884
13	31.602	13.986
14	31.070	15.037
15	30.519	16.048
16	29.951	17.017
17	29.367	17.952
18	28.775	18.844
19	28.176	19.698
20	27.572	20.515
21	26.969	21.290
22	26.372	22.019
23	25.777	22.710
24	25.181	23.372
25	24.594	23.991
26	23.991	24.594
27	23.372	25.181
28	22.710	25.777
29	22.019	26.372
30	21.290	26.969
31	20.515	27.572
32	19.699	28.176
33	18.844	28.775
34	17.952	29.367
35	17.018	29.951
36	16.048	30.519
37	15.039	31.070
38	13.986	31.602
39	12.884	32.117
40	11.728	32.510
41	10.513	33.075
42	9.256	33.504
43	8.026	33.906
44	6.824	34.285
45	5.642	34.640
46	4.482	34.975
47	3.338	35.292
48	2.211	35.590
49	1.099	35.872
50	0.000	36.142



BIBLIOTECA N.  
 ESPAÑA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.220 DIAS  
TIEMPO ACUMULADO= 5.000 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	49.142	0.000
2	48.807	1.704
3	48.456	3.444
4	48.082	5.223
5	47.684	7.046
6	47.261	8.919
7	46.805	10.837
8	46.298	12.672
9	45.744	14.407
10	45.152	16.035
11	44.527	17.628
12	43.873	19.140
13	43.195	20.597
14	42.498	21.981
15	41.783	23.301
16	41.051	24.558
17	40.302	25.767
18	39.547	26.912
19	38.785	28.001
20	38.021	29.034
21	37.255	30.018
22	36.493	30.949
23	35.735	31.830
24	34.974	32.672
25	34.227	33.459
26	33.460	34.226
27	32.672	34.974
28	31.830	35.735
29	30.949	36.493
30	30.018	37.255
31	29.035	38.021
32	28.001	38.785
33	26.913	39.547
34	25.767	40.302
35	24.558	41.051
36	23.301	41.783
37	21.981	42.498
38	20.597	43.195
39	19.140	43.873
40	17.628	44.527
41	16.055	45.152
42	14.407	45.744
43	12.672	46.298
44	10.837	46.805
45	8.919	47.261
46	7.046	47.684
47	5.224	48.082
48	3.444	48.456
49	1.704	48.807
50	0.000	49.142



REPUBLICA  
ESPAÑOLA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.281 DIAS  
TIEMPO ACUMULADO= 7.526 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	59.142	0.000
2	58.785	2.393
3	58.407	4.847
4	58.004	7.368
5	57.574	9.966
6	57.097	12.525
7	56.558	14.907
8	55.969	17.149
9	55.338	19.280
10	54.670	21.310
11	53.972	23.226
12	53.245	25.041
13	52.494	26.764
14	51.722	28.396
15	50.925	29.958
16	50.107	31.448
17	49.275	32.864
18	48.438	34.195
19	47.597	35.450
20	46.753	36.633
21	45.906	37.752
22	45.063	38.804
23	44.217	39.803
24	43.362	40.760
25	42.519	41.652
26	41.652	42.519
27	40.760	43.361
28	39.803	44.217
29	38.804	45.063
30	37.752	45.906
31	36.633	46.753
32	35.450	47.597
33	34.195	48.438
34	32.864	49.275
35	31.448	50.107
36	29.958	50.925
37	28.396	51.722
38	26.764	52.494
39	25.041	53.245
40	23.226	53.972
41	21.310	54.670
42	19.280	55.337
43	17.149	55.969
44	14.908	56.558
45	12.525	57.097
46	9.966	57.574
47	7.368	58.004
48	4.847	58.407
49	2.393	58.785
50	0.000	59.142



BIBLIOTECA  
POLICIA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.346 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 10.060 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	67.142	0.000
2	66.784	3.226
3	66.405	6.541
4	65.999	9.956
5	65.547	13.290
6	65.034	16.348
7	64.469	19.200
8	63.860	21.983
9	63.215	24.396
10	62.538	26.753
11	61.828	28.974
12	61.085	31.080
13	60.324	33.061
14	59.548	34.913
15	58.753	36.660
16	57.939	38.306
17	57.103	39.868
18	56.255	41.334
19	55.403	42.706
20	54.548	43.988
21	53.688	45.189
22	52.829	46.309
23	51.964	47.365
24	51.085	48.369
25	50.210	49.305
26	49.305	50.210
27	48.369	51.085
28	47.365	51.964
29	46.309	52.829
30	45.189	53.688
31	43.988	54.548
32	42.706	55.403
33	41.335	56.255
34	39.868	57.103
35	38.306	57.939
36	36.660	58.753
37	34.914	59.548
38	33.061	60.324
39	31.080	61.085
40	28.975	61.828
41	26.753	62.538
42	24.396	63.215
43	21.883	63.859
44	19.201	64.469
45	16.348	65.034
46	13.290	65.547
47	9.957	65.999
48	6.542	66.405
49	3.226	66.784
50	0.000	67.142



BIBLIOTECA NCI  
 ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.428 DIAS  
TIEMPO ACUMULADO= 12.798 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	74.142	0.000
2	73.800	4.367
3	73.437	8.862
4	73.038	13.319
5	72.585	17.335
6	72.081	21.019
7	71.541	24.423
8	70.969	27.577
9	70.359	30.526
10	69.728	33.273
11	69.084	35.825
12	68.419	38.208
13	67.731	40.433
14	67.030	42.500
15	66.321	44.424
16	65.597	46.214
17	64.851	47.892
18	64.090	49.445
19	63.312	50.889
20	62.525	52.224
21	61.726	53.461
22	60.923	54.601
23	60.106	55.661
24	59.273	56.655
25	58.438	57.567
26	57.567	58.438
27	56.655	59.273
28	55.661	60.106
29	54.601	60.923
30	53.462	61.726
31	52.225	62.525
32	50.889	63.312
33	49.445	64.090
34	47.892	64.851
35	46.214	65.597
36	44.425	66.321
37	42.500	67.030
38	40.434	67.731
39	38.208	68.418
40	35.825	69.083
41	33.273	69.728
42	30.527	70.359
43	27.578	70.969
44	24.424	71.541
45	21.019	72.081
46	17.335	72.585
47	13.319	73.038
48	8.862	73.437
49	4.367	73.800
50	0.000	74.142



BIBLIOTECA TIC  
ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.509 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 15.172 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	79.142	0.000
2	78.821	5.639
3	78.477	11.422
4	78.093	16.701
5	77.664	21.416
6	77.211	25.699
7	76.731	29.632
8	76.232	33.262
9	75.730	36.616
10	75.217	39.715
11	74.690	42.581
12	74.168	45.230
13	73.641	47.674
14	73.098	49.921
15	72.538	51.998
16	71.970	53.906
17	71.386	55.668.
18	70.782	57.277
19	70.158	58.749
20	69.513	60.091
21	68.843	61.318
22	68.162	62.427
23	67.461	63.440
24	66.736	64.371
25	65.997	65.209
26	65.209	65.997
27	64.371	66.736
28	63.440	67.461
29	62.477	68.162
30	61.318	68.843
31	60.091	69.513
32	58.749	70.158
33	57.278	70.782
34	55.668	71.386
35	53.906	71.970
36	51.998	72.538
37	49.921	73.098
38	47.674	73.641
39	45.230	74.168
40	42.581	74.690
41	39.715	75.217
42	36.616	75.730
43	33.262	76.231
44	28.633	76.731
45	25.700	77.211
46	21.416	77.664
47	16.702	78.093
48	11.423	78.477
49	5.639	78.821
50	0.000	79.142



GUARDIA CIVIL  
 ESPAÑA



NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.628 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 18.059 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	84.142	0.000
2	83.852	7.653
3	83.543	15.145
4	83.204	21.571
5	82.859	27.268
6	82.507	32.418
7	82.179	37.118
8	81.858	41.422
9	81.568	45.379
10	81.309	49.007
11	81.050	52.332
12	80.832	55.381
13	80.629	58.166
14	80.420	60.697
15	80.205	63.002
16	79.995	65.085
17	79.779	66.971
18	79.531	68.659
19	79.248	70.166
20	78.918	71.501
21	78.546	72.685
22	78.158	73.705
23	77.713	74.610
24	77.223	75.404
25	76.692	76.082
26	76.082	76.692
27	75.404	77.223
28	74.610	77.713
29	73.705	78.158
30	72.695	78.546
31	71.501	78.918
32	70.163	79.248
33	68.659	79.531
34	66.972	79.778
35	65.085	79.995
36	63.002	80.205
37	60.697	80.420
38	58.166	80.629
39	55.381	80.832
40	52.332	81.050
41	49.007	81.309
42	45.379	81.568
43	41.422	81.857
44	37.119	82.179
45	32.419	82.507
46	27.269	82.859
47	21.571	83.203
48	15.146	83.543
49	7.653	83.852
50	0.000	84.142



BIBLIOTECA FIC  
19 19 19

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.728 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 20.128 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	87.142	0.000
2	86.875	9.518
3	86.596	18.311
4	86.311	25.707
5	85.046	32.246
6	85.830	38.142
7	85.656	43.514
8	85.559	48.431
9	85.508	52.947
10	85.553	57.093
11	85.542	60.890
12	85.782	64.371
13	85.990	67.550
14	86.218	70.431
15	86.442	73.044
16	86.703	75.386
17	86.946	77.493
18	87.193	79.342
19	87.341	80.965
20	87.443	82.362
21	87.455	83.561
22	87.422	84.546
23	87.347	85.237
24	87.176	85.980
25	86.894	86.491
26	86.491	86.894
27	85.980	87.176
28	85.337	87.347
29	84.546	87.422
30	83.561	87.455
31	82.362	87.442
32	80.965	87.341
33	79.343	87.183
34	77.494	86.946
35	75.386	86.703
36	73.044	86.442
37	70.431	86.218
38	67.550	85.990
39	64.371	85.782
40	60.891	85.542
41	57.093	85.553
42	52.947	85.508
43	48.432	85.559
44	43.515	85.656
45	38.143	85.830
46	32.247	86.046
47	25.708	86.311
48	18.311	86.596
49	9.519	86.875
50	0.001	87.142



BIBLIOTECA FIC1  
ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.769 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 20.908 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	88.142	0.000
2	87.884	10.315
3	87.617	19.600
4	87.360	27.393
5	87.135	34.279
6	86.975	40.487
7	86.887	46.149
8	86.883	51.334
9	86.967	56.108
10	87.155	60.501
11	87.398	64.533
12	87.757	68.250
13	88.160	71.555
14	88.586	74.749
15	89.117	77.559
16	89.651	80.094
17	90.142	82.385
18	90.596	84.405
19	91.067	86.125
20	91.512	87.574
21	91.822	88.804
22	92.034	89.805
23	92.155	90.596
24	92.142	91.214
25	91.981	91.668
26	91.668	91.981
27	91.214	92.142
28	90.596	92.155
29	89.805	92.034
30	88.804	91.822
31	87.574	91.512
32	86.125	91.067
33	84.405	90.596
34	82.385	90.142
35	80.095	89.551
36	77.559	89.117
37	74.749	88.587
38	71.655	88.160
39	68.250	87.757
40	64.534	87.398
41	60.502	87.155
42	56.109	86.967
43	51.334	86.883
44	46.149	86.887
45	40.488	86.875
46	34.280	87.134
47	27.394	87.360
48	19.601	87.617
49	10.316	87.884
50	0.001	88.142



ESTADÍSTICA  
NACIONAL

H = 10.0 PIES  
Q = 400.0 PCUB/DIA

P O R = 0.20  
S O D = 0.50

D F L T X = 10.0 PIES  
V I S = 1.0 CP

N = 10  
M = 10



BIBLIOTECA FIC  
ESPOL

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO X ENTRE LOS NODOS EN MILIDARCIS-PIES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	0.00	0.60	0.50	1.50	1.70	1.30	1.00	0.10	0.90	9.00	3.00	0.00
11	0.00	0.90	1.10	1.00	0.90	1.30	1.50	1.20	2.10	2.60	1.90	0.00
10	0.00	1.00	1.20	1.60	1.50	2.30	1.60	1.20	1.40	1.70	2.20	0.00
9	0.00	1.20	1.90	2.00	2.10	0.00	1.70	2.10	2.60	1.70	1.50	0.00
8	0.00	1.30	1.70	1.60	2.10	2.30	2.60	2.80	2.70	2.10	1.90	0.00
7	0.00	1.40	1.60	1.50	1.80	2.50	2.80	2.20	1.70	1.90	1.40	0.00
6	0.00	1.60	1.90	0.80	2.50	3.00	2.60	1.70	2.10	1.60	0.70	0.00
5	0.00	2.00	2.80	1.10	2.50	1.80	1.50	3.00	2.10	1.50	1.80	0.00
4	0.00	1.50	1.30	1.50	1.80	2.70	2.00	1.60	1.70	1.80	2.00	0.00
3	0.00	1.10	1.90	2.30	1.50	2.30	2.00	0.90	1.00	1.10	1.00	0.00
2	0.00	1.00	1.20	0.80	1.50	2.00	0.90	1.70	1.60	0.60	1.10	0.00

PERMEABILIDAD-ESPESOR EN SENTIDO Y ENTRE LOS NODOS EN MILIDARCIS-PIES

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	1.80	1.80	1.80	1.50	2.00	1.40	1.20	1.50	1.70	2.20	2.70
10	1.00	1.60	0.60	1.70	1.50	1.40	1.30	1.40	1.70	1.60	1.90
9	2.00	2.10	1.70	3.00	1.50	1.70	1.30	1.70	0.80	2.00	1.60
8	2.00	1.90	1.30	1.70	1.80	1.30	2.20	2.50	2.70	2.30	1.70
7	0.50	1.60	0.50	2.40	1.60	1.40	1.70	2.00	2.50	1.40	1.20
6	1.20	2.50	3.00	3.00	2.00	1.80	1.70	1.60	1.90	2.10	2.10
5	0.80	2.10	2.40	2.90	0.70	2.20	1.70	3.00	1.90	1.70	0.90
4	1.80	1.80	2.50	1.60	3.00	1.40	1.70	1.30	0.90	1.60	1.10
3	1.70	1.70	2.60	1.70	0.50	2.30	3.00	2.10	1.70	1.40	1.80
2	1.90	1.90	2.50	1.40	2.20	1.30	0.80	1.00	1.20	1.30	0.70
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



BIBLIOTECA  
ECONOMICA

PRESIONES EN LOS NODOS EN L.P.C.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	401.707	400.802	398.424	396.767	394.469	391.365	387.861	372.086	362.907	360.584	349.499
11	402.007	401.141	399.236	397.605	394.531	390.989	386.253	376.542	370.352	366.193	360.591
10	403.324	402.365	400.892	399.011	395.757	392.400	388.267	382.291	376.513	373.802	370.752
9	404.461	403.682	402.205	400.433	398.955	392.914	390.717	387.534	385.272	380.941	378.626
8	406.063	406.259	404.488	402.682	399.895	396.460	393.503	390.788	388.415	385.459	383.996
7	411.063	411.195	410.183	405.510	402.228	399.610	397.051	394.263	391.729	390.424	389.288
6	415.316	414.571	412.928	407.407	404.406	402.416	399.984	397.471	395.117	393.344	391.550
5	421.835	419.507	416.899	410.433	408.425	404.878	401.706	399.406	397.396	396.008	395.434
4	422.799	426.736	420.633	414.617	409.813	407.593	404.679	401.825	399.824	398.187	397.673
3	448.601	433.706	424.644	418.333	412.805	409.181	405.939	402.770	400.841	399.309	398.470
2	468.237	440.380	427.731	418.405	413.500	410.579	406.116	403.834	402.078	399.868	399.323



REPUBLICA  
ESPAÑA



PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	14.142	0.000
2	14.134	0.453
3	14.113	0.906
4	14.076	1.357
5	14.026	1.808
6	13.960	2.257
7	13.881	2.703
8	13.787	3.146
9	13.679	3.587
10	13.557	4.023
11	13.421	4.456
12	13.271	4.884
13	13.108	5.307
14	12.931	5.724
15	12.741	6.136
16	12.538	6.541
17	12.322	6.939
18	12.093	7.331
19	11.852	7.715
20	11.598	8.090
21	11.333	8.458
22	11.056	8.817
23	10.768	9.167
24	10.469	9.507
25	10.159	9.838
26	9.838	10.158
27	9.507	10.469
28	9.167	10.768
29	8.817	11.056
30	8.458	11.333
31	8.090	11.598
32	7.715	11.852
33	7.331	12.093
34	6.939	12.322
35	6.541	12.538
36	6.136	12.741
37	5.724	12.931
38	5.307	13.108
39	4.884	13.271
40	4.456	13.421
41	4.023	13.557
42	3.587	13.679
43	3.146	13.787
44	2.703	13.881
45	2.257	13.960
46	1.808	14.026
47	1.358	14.076
48	0.906	14.113
49	0.453	14.134
50	0.000	14.142



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL



NUEVA POSICION DEL FRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.196 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 2.686 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	32.142	0.000
2	32.890	2.480
3	33.598	4.801
4	34.244	7.003
5	34.857	9.094
6	35.385	11.137
7	35.939	13.173
8	35.462	15.114
9	35.246	16.952
10	34.929	18.700
11	34.531	20.374
12	34.056	21.958
13	33.526	23.437
14	32.966	24.846
15	32.387	26.164
16	31.818	27.402
17	31.255	28.560
18	30.707	29.635
19	30.178	30.586
20	29.663	31.455
21	29.166	32.192
22	28.684	32.838
23	28.203	33.390
24	27.723	33.868
25	27.241	34.286
26	26.747	34.651
27	26.229	34.961
28	25.701	35.245
29	25.117	35.488
30	24.514	35.703
31	23.864	35.890
32	23.170	36.036
33	22.402	36.152
34	21.580	36.228
35	20.698	36.256
36	19.718	36.241
37	18.690	36.211
38	17.597	36.160
39	16.434	36.080
40	15.203	35.964
41	13.898	35.796
42	12.523	35.552
43	11.073	35.189
44	9.549	34.653
45	8.002	34.086
46	6.438	33.522
47	4.857	32.963
48	3.256	32.414
49	1.637	31.872
50	0.000	31.342



ESPOL  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA

NUOVA POSICION DEL MONTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.242 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 5.100 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	43.142	0.000
2	44.610	3.416
3	45.925	6.504
4	47.136	9.365
5	47.963	12.336
6	48.032	15.037
7	47.741	19.398
8	47.300	23.462
9	46.715	25.477
10	45.949	28.074
11	45.192	31.392
12	44.443	33.302
13	43.793	34.825
14	43.228	35.099
15	42.716	37.182
16	42.243	38.156
17	41.785	39.052
18	41.334	39.897
19	40.895	40.683
20	40.423	41.459
21	39.929	42.197
22	39.447	42.829
23	38.944	44.020
24	38.424	44.751
25	37.868	45.486
26	37.343	45.150
27	36.757	45.821
28	36.144	47.427
29	35.457	48.002
30	34.735	48.533
31	33.939	49.017
32	33.069	49.399
33	32.081	49.574
34	30.994	49.788
35	29.780	49.693
36	28.463	49.548
37	27.038	49.357
38	25.497	49.130
39	23.837	48.894
40	22.050	48.714
41	20.112	48.742
42	18.071	48.899
43	15.956	48.981
44	13.787	48.926
45	11.627	48.529
46	9.576	47.208
47	7.485	45.359
48	5.235	43.343
49	2.777	41.178
50	0.000	38.950



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

NUEVA POSICION DEL TRENTE

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.301 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 7.568 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	57.142	0.000
2	54.346	4.368
3	56.184	8.304
4	57.578	12.102
5	57.865	17.030
6	57.474	23.072
7	56.993	28.421
8	56.416	31.017
9	55.719	36.542
10	55.060	39.297
11	54.471	41.247
12	53.958	42.563
13	53.509	43.711
14	53.107	44.523
15	52.729	45.194
16	52.366	45.800
17	51.997	46.366
18	51.613	46.936
19	51.213	47.524
20	50.767	48.199
21	50.294	48.888
22	49.799	49.626
23	49.279	50.353
24	48.734	51.132
25	48.179	51.900
26	47.599	52.720
27	46.995	53.531
28	46.381	54.368
29	45.699	55.228
30	44.959	56.058
31	44.140	56.898
32	43.194	57.573
33	42.078	58.416
34	40.802	59.069
35	39.341	59.572
36	37.710	59.888
37	35.928	59.993
38	34.012	59.816
39	31.979	59.294
40	29.799	58.310
41	27.267	57.193
42	24.606	56.286
43	21.477	54.080
44	18.136	56.915
45	14.877	57.603
46	11.887	57.506
47	9.299	55.598
48	6.623	52.714
49	3.618	49.279
50	0.000	44.891



ESPAÑOLA  
POLICIA

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.353 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 10.204 DIAS

PUNTO	X (PIES)	Y (PIES)
1	60.142	0.000
2	62.447	5.613
3	64.010	10.681
4	65.389	16.179
5	66.262	23.201
6	66.877	29.714
7	66.679	36.040
8	65.592	42.122
9	64.970	46.048
10	64.744	48.670
11	64.573	50.501
12	64.378	51.793
13	64.166	52.726
14	63.940	53.433
15	63.704	54.002
16	63.465	54.505
17	63.209	54.966
18	62.932	55.474
19	62.635	55.892
20	62.302	56.428
21	61.944	56.973
22	61.567	57.565
23	61.159	58.150
24	60.735	58.784
25	60.293	59.413
26	59.832	60.085
27	59.340	60.746
28	58.804	61.436
29	58.153	62.131
30	57.358	62.820
31	56.361	63.518
32	55.092	64.213
33	53.521	64.924
34	51.723	55.620
35	49.759	66.260
36	47.651	66.756
37	45.378	67.398
38	42.945	67.256
39	40.323	67.224
40	37.550	66.893
41	34.604	66.135
42	31.377	64.799
43	27.661	63.054
44	23.326	62.238
45	18.911	63.853
46	14.931	65.281
47	11.461	64.737
48	8.120	61.674
49	4.481	57.117
50	0.000	50.464



BIBLIOTECA FIC1  
 ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.411 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 17.518 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	66.142	0.000
2	67.840	7.080
3	69.119	13.511
4	71.231	20.203
5	73.304	27.995
6	74.440	36.406
7	73.709	47.078
8	73.086	52.968
9	73.151	56.331
10	73.462	58.664
11	73.709	60.312
12	73.824	61.456
13	73.824	62.249
14	73.741	62.817
15	73.674	63.257
16	73.477	63.641
17	73.295	64.004
18	73.092	64.363
19	72.866	64.730
20	72.579	65.155
21	72.265	65.586
22	71.913	66.058
23	71.496	66.545
24	71.045	67.097
25	70.522	67.628
26	69.951	68.184
27	69.287	68.695
28	68.550	69.218
29	67.667	69.720
30	66.601	70.181
31	65.274	70.611
32	63.592	70.996
33	61.514	71.379
34	59.127	71.804
35	56.532	72.205
36	53.936	72.560
37	51.452	72.859
38	49.077	73.033
39	46.549	73.034
40	43.786	72.849
41	40.657	72.484
42	37.100	71.768
43	33.054	70.427
44	28.361	68.494
45	23.430	68.896
46	18.700	71.177
47	14.377	71.554
48	10.008	69.126
49	5.362	64.135
50	0.000	55.449



BIBLIOTECA FIC  
 ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.493 DIAS  
 TIEMPO ACUMULADO= 15.256 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	72.142	0.000
2	72.496	9.491
3	74.563	17.351
4	77.841	24.990
5	80.163	34.637
6	81.308	48.384
7	82.353	63.608
8	83.708	70.851
9	84.478	74.224
10	85.032	-76.247
11	85.347	77.474
12	85.462	78.184
13	85.469	78.618
14	85.389	78.858
15	85.275	79.003
16	85.131	79.106
17	84.955	79.177
18	84.757	79.234
19	84.538	79.284
20	84.258	79.330
21	83.943	79.376
22	83.582	79.443
23	83.157	79.483
24	82.697	79.552
25	82.167	79.585
26	81.580	79.682
27	80.901	79.774
28	80.165	79.870
29	79.274	79.959
30	78.207	80.003
31	76.864	80.020
32	75.105	79.950
33	72.843	79.800
34	70.127	79.589
35	67.158	79.390
36	64.264	79.266
37	61.562	79.239
38	59.020	79.205
39	56.349	79.083
40	53.374	78.872
41	49.905	78.605
42	45.754	78.186
43	40.601	77.574
44	34.695	76.574
45	29.171	76.179
46	23.782	76.893
47	18.390	77.572
48	13.117	76.666
49	7.024	72.218
50	0.000	62.385



BIBLIOTECA FICU  
 ESPOL

INCREMENTO EN EL TIEMPO= 0.576 DIAS

TIEMPO ACUMULADO= 17.430 DIAS

PUNTO	X(PIES)	Y(PIES)
1	76.142	0.000
2	75.637	11.926
3	79.074	20.514
4	82.222	29.301
5	84.686	42.290
6	86.618	61.523
7	90.593	80.847
8	92.276	85.245
9	93.311	87.396
10	94.093	88.969
11	94.609	90.045
12	94.914	90.739
13	95.052	91.128
14	95.069	91.294
15	95.034	91.355
16	94.966	91.360
17	94.865	91.318
18	94.746	91.251
19	94.608	91.165
20	94.427	91.041
21	94.220	90.877
22	93.987	90.777
23	93.697	90.537
24	93.380	90.337
25	92.857	90.071
26	92.303	89.830
27	91.654	89.536
28	90.949	89.215
29	90.135	88.901
30	89.148	88.499
31	87.938	88.083
32	86.323	87.515
33	84.274	87.017
34	81.781	86.621
35	78.844	86.218
36	75.739	85.713
37	72.672	85.169
38	69.669	84.569
39	66.640	83.986
40	63.394	83.414
41	59.729	82.910
42	55.254	82.382
43	49.373	81.940
44	42.086	81.476
45	34.845	81.714
46	28.247	81.440
47	21.708	80.844
48	15.650	80.837
49	8.667	77.780
50	0.001	68.074



BIBLIOTECA TIC  
ESPOL





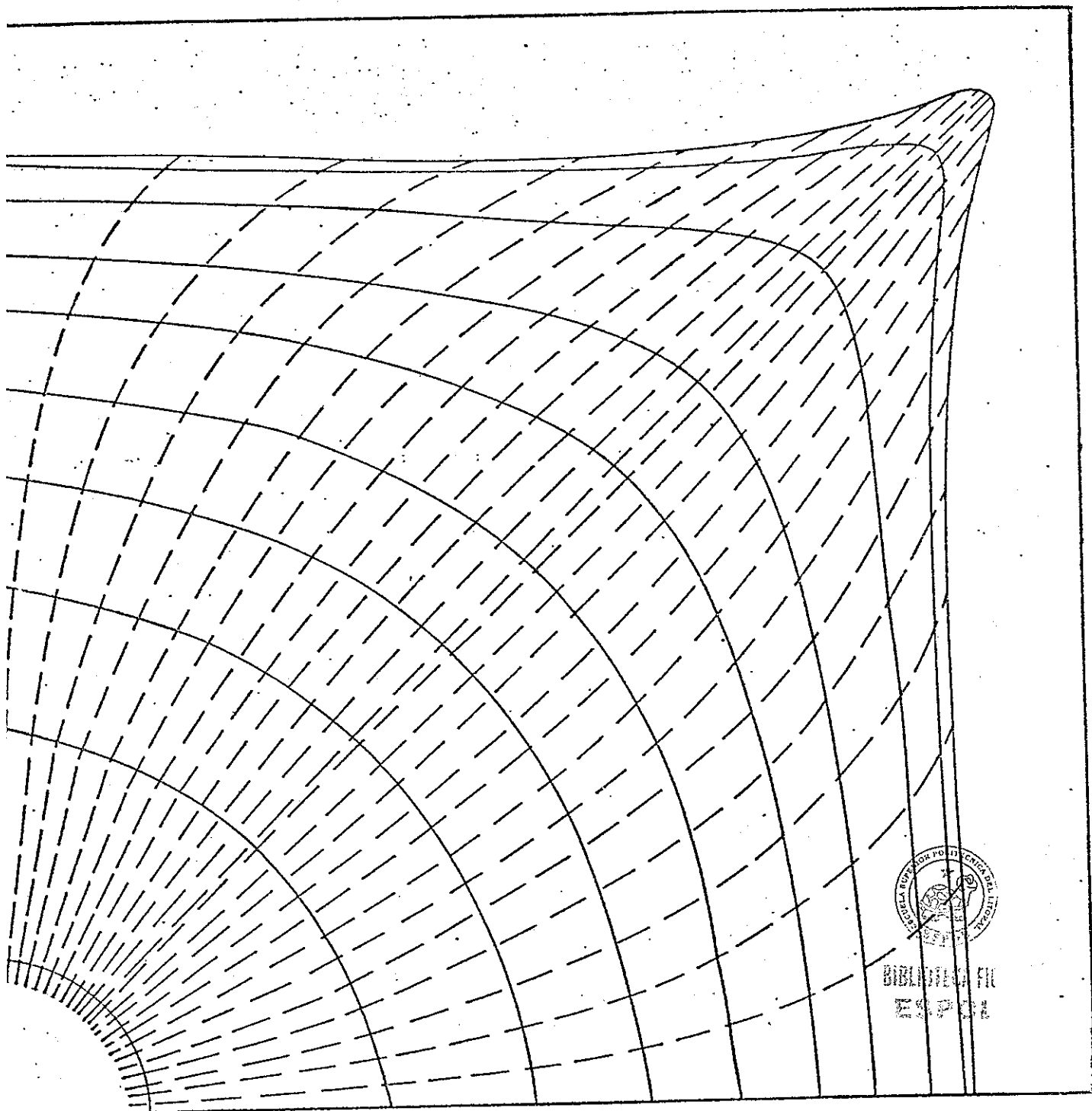



GRAFICO 1. LINEAS DE FLUJO (Cortadas) y POSICIONES DEL FRENTE (Líneas continuas) PARA UN MODELO CON CARACTERISTICAS HOMOGENEAS.

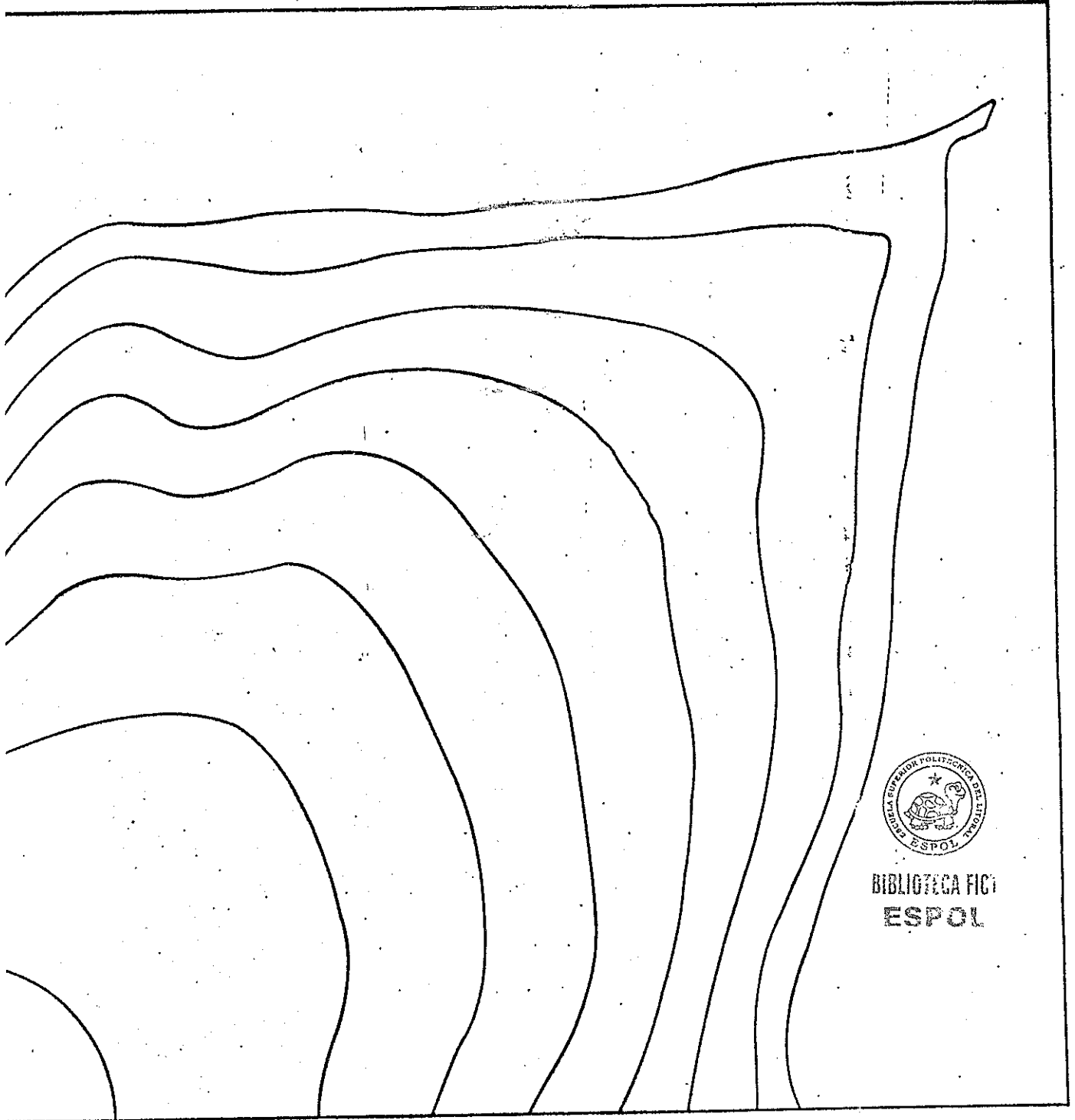



GRAFICO 2. POSICIONES DEL FRENTE PARA UN MODELO CON CARACTERISTICAS HETEROGENEAS EN SU PRODUCTO PERMEABILIDAD - ESPESOR.

## BIBLIOGRAFIA

1. Mc Carty D.G. y Barfield E.C., "THE USE OF HIGH-SPEED COMPUTERS PREDICTING FLOOD-OUT PATTERNS", *Numerical - Simulation, SPE Reprint Series*, Pag. 169.
  2. Van Poolen H.K., Bixel H.C. y Jargon G.R., "RESERVOIR MODELING", *The Petroleum Publishing Company, Copiado de The Oil and Gas Journal*.
  3. Douglas Jim Jr., Peaceman D.W., Rachford H.H. Jr., "A METHOD FOR CALCULATING MULTI-DIMENSIONAL INMISCIBLE - DISPLACEMENT", *Petroleum Transactions, AIME, Vol. 216, 1959, Pag. 297*.
  4. Smith G.D. "NUMERICAL SOLUTION OF PARTIAL DIFERENCIAL EQUATIONS".
  5. Breitenbach E.A., Van Poolen K.H., "SOLUTION OF THE INMISCIBLE FLUID FLOW SIMULATION EQUATIONS", *Numerical Simulation, SPE Reprint Series, Pag. 16*.  
  
BIBLIOTECA  
ESPE
  6. Odeh A.S., Bradley H.B., y Heller J.P., "SCALE LIMITATIONS IN POTENTIOMETRIC MODEL CONSTRUCTION", *Trans. AIME (1956) 207, Pag. 200*.
  7. Peaceman D.W. and Rachford H.H. Jr., "THE NUMERICAL - SOLUTION OF PARABOLIC AND ELLIPTIC DIFFERENTIAL EQUA-
-

- TIONS", J. Soc. Ind. Appl. Mathem. (1955) 3,28.
8. Carnahan, Luther, Wilkes, "APPLIED NUMERICAL METHODS".
  9. Farouq-Ali S.M., "NUMERICAL RESERVOIR SIMULATIONS".
  10. Peaceman N. Donald, "FUNDAMENTAL OF RESERVOIR SIMULATIONS", Lecture-Notes.



BIBLIOTECA  
ESPOL