

- 10.- DAVIS S.N., DE WIEST J.M. "Hydrogeology", John Wiley 1966.
- 11.- TODD D.K. "Ground Water Hydrology", John Wiley N.Y. 1959.
- 12.- HANTUSH M.S. "Hydraulics of wells, advances in hydro-sciences", Academic Press N.Y. 1964.

SEGUNDO COLOQUIO NACIONAL

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

"METODOS COMPUTACIONALES PARA EL TRAZADO DE CANALES"

Bonifacio Fernández L. (*)

Se presentan las características fundamentales de dos métodos desarrollados para estudiar mediante técnicas computacionales el problema de la elección de alternativas de trazado de canales en etapa de anteproyecto. Uno de estos métodos intenta una optimización interna del trazado a partir de las características del canal y del terreno. En el otro se describe un procedimiento de simulación de alternativas que permita optar por una de ellas para el trazado definitivo del canal.

(*) Ingeniero Civil U.C. Profesor Escuela de Ingeniería Universidad Católica de Chile

1.- INTRODUCCION.

1.1 Objetivos.

El presente trabajo tiene por objeto estudiar la aplicación de técnicas computacionales en la elección de alternativas de trazado de canales a nivel de anteproyecto.

Con ello se pretende aumentar la certidumbre de que el trazado elegido finalmente es el más conveniente desde el punto de vista de la economía del proyecto, reducir el tiempo y la cantidad de trabajo, así como entregar antecedentes que permitan evaluar un mayor número de alternativas.

1.2 Restricciones y limitaciones.

Los métodos propuestos están destinados exclusivamente a decidir entre varias alternativas de trazado para un canal. Esto significa que se dispone de las características generales de éste, las que se habrían obtenido de estudios anteriores a la determinación del trazado mismo.

Necesariamente las alternativas posibles deben encontrarse dentro de una franja de terreno previamente delimitada para la cual se dispone de toda información topográfica y geológica necesaria.

Las obras de arte se han excluido totalmente del estudio.

2.- ANTECEDENTES NECESARIOS.

Como datos para resolver el problema del trazado de un canal se dispone de los antecedentes topográficos y geológicos

de la zona. Por otra parte, a partir de estudios anteriores es posible determinar las características hidráulicas y constructivas que deberá tener el canal (sección, pendiente de fondo, etc.)

2.1 Característica del terreno.

La información del terreno necesaria es la topografía, el espesor de la capa vegetal y la dureza del material base en la zona donde se ubican las posibles alternativas de trazado.

Para poder procesar y aprovechar toda esta información se construye con ella un Modelo Digital de Terreno (MDT), que consiste en un conjunto ordenado de datos preparados de tal manera que puedan ser procesados en un computador digital.

Existen varios tipos diferentes de MDT (1). En este caso se utiliza uno del tipo de Alineamiento Base (2), al cual se le ha agregado la información geológica. Este modelo consiste básicamente en un Alineamiento Base (AB) formado por una sucesión de rectas y curvas a lo largo de la zona que interesa. Sobre este se toman perfiles transversales, a distancias variables, referidas por su bilometraje, sobre el cual a su vez se toman una serie de puntos caracterizándoles por su distancia al AB y su cota. En cada perfil se agregan además el espesor de la capa de terreno veje-

-
- (1) Ojeda F., Hernán. "Estudios de Modelos Digitales para proyectos de caminos". Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile. 1969.
- (2) Roberts, P.O. y Suhrbier, J.H. "DTM Location System. 20 K Program Manual". M.I.T. 1962.

tal y la dureza del material base.

2.3 Características del canal.

El canal queda definido básicamente por sus características hidráulicas. Desde el punto de vista del trazado tienen especial interés la sección transversal y la pendiente de fondo, ya que condicionan el recorrido.

En este caso se supone que la pendiente de fondo es constante en el tramo en estudio.

Para la sección transversal se tomará una del tipo trapecial con todas las combinaciones posibles a partir de ella (3). Esta quedaría definida si se asignan valores a cada uno de los parámetros que la caracterizan, los que se indican en la fig. 1.

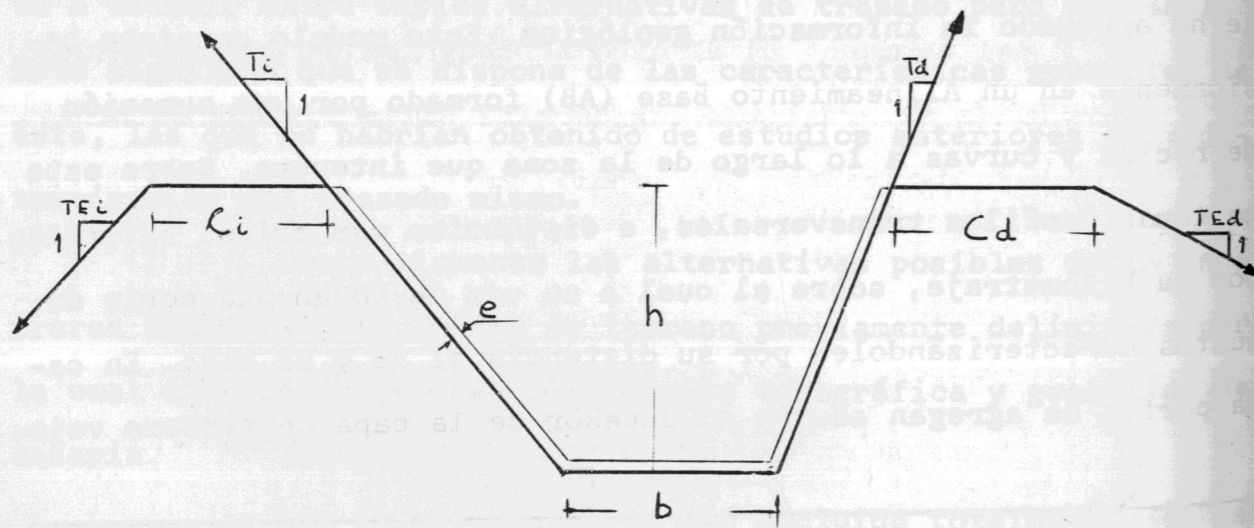


Fig. 1: Parámetros que definen la sección transversal.

(3) Christansen Nephi, A. "Aqueduct for least cost conveyance of water". Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. Vol. 97, N°IR3, Sept. 1971, pg. 483-499.

2.4 Características constructivas.

Estas conforman una serie de restricciones al trazado del canal y completan las variables que definen una alternativa de trazado y su evaluación. Entre ellas se considerarán la ubicación del punto inicial, el revestimiento y la ubicación de la sección. Esta última se refiere a la colocación que se desea para la sección del canal en el perfil transversal del terreno, pudiendo ir desde corte puro hasta corte compensado con terraplén.

Con el objeto de disponer de un valor numérico que defina la Ubicación de la Sección (US) en un perfil, se tomará la razón entre el volumen de terraplén (VT) y el volumen de corte (VC) que se desea dar a ella.

$$US = \frac{VT}{VC}$$

US podrá tomar normalmente cualquier valor entre 0 y 1 e indica el volumen de material obtenido del corte que debe emplearse en hacer el terraplén.

3.- TRAZADO.

Al determinar el trazado fundamentalmente se trata de encontrar un recorrido para el canal de tal manera que el costo de construcción sea mínimo.

3.1 Método del trazado óptimo.

Dados como datos la sección transversal del canal, la pendiente de fondo, el punto inicial y el MDT, es posible encontrar a lo largo del Alineamiento Base puntos por los cuales de-

biera pasar el Eje Rojo del canal de tal manera que si la sección transversal se ubica en ella el valor de US que resulta es el que se desea (Puntos Ideales). Con el objeto de decidir entre todos estos puntos aquellos que representan el trazado óptimo se tomarán ellos como NODOS de una RED cuyos ARCOS serán tramos rectos que unen dos nodos cualesquiera. Si se calcula el costo asociado a cada una de los arcos es posible encontrar un recorrido que una el punto inicial con el punto final a un costo total mínimo, empleando para ello técnicas de investigación operacional.

En una etapa posterior se incluirán las curvas de enlace necesarias para unir los arcos del trazado óptimo y proceder a una evaluación completa.

3.2 Método de simulación de Alternativas de trazado.

En este caso se trata de evaluar los costos de un trazado cualquiera definido previamente, de tal manera de probar distintas alternativas y elegir entre ellas la más conveniente. Este método en ningún caso asegura la obtención de un óptimo, solamente indica si una alternativa es mejor o peor que otra.

En la Figura 2 se muestra un esquema en el cual se individualizan los procesos necesarios por ambos métodos, así como los datos y resultados de cada paso. Ambos métodos utilizan el mismo esquema general de cálculo, el que se desarrolla a continuación en sus pasos más importantes.

3.3 Puntos Ideales.

Sobre cada uno de los perfiles del MDT se ubican los puntos ideales por medio de su cota de fondo y su distancia al Alineamiento Base.

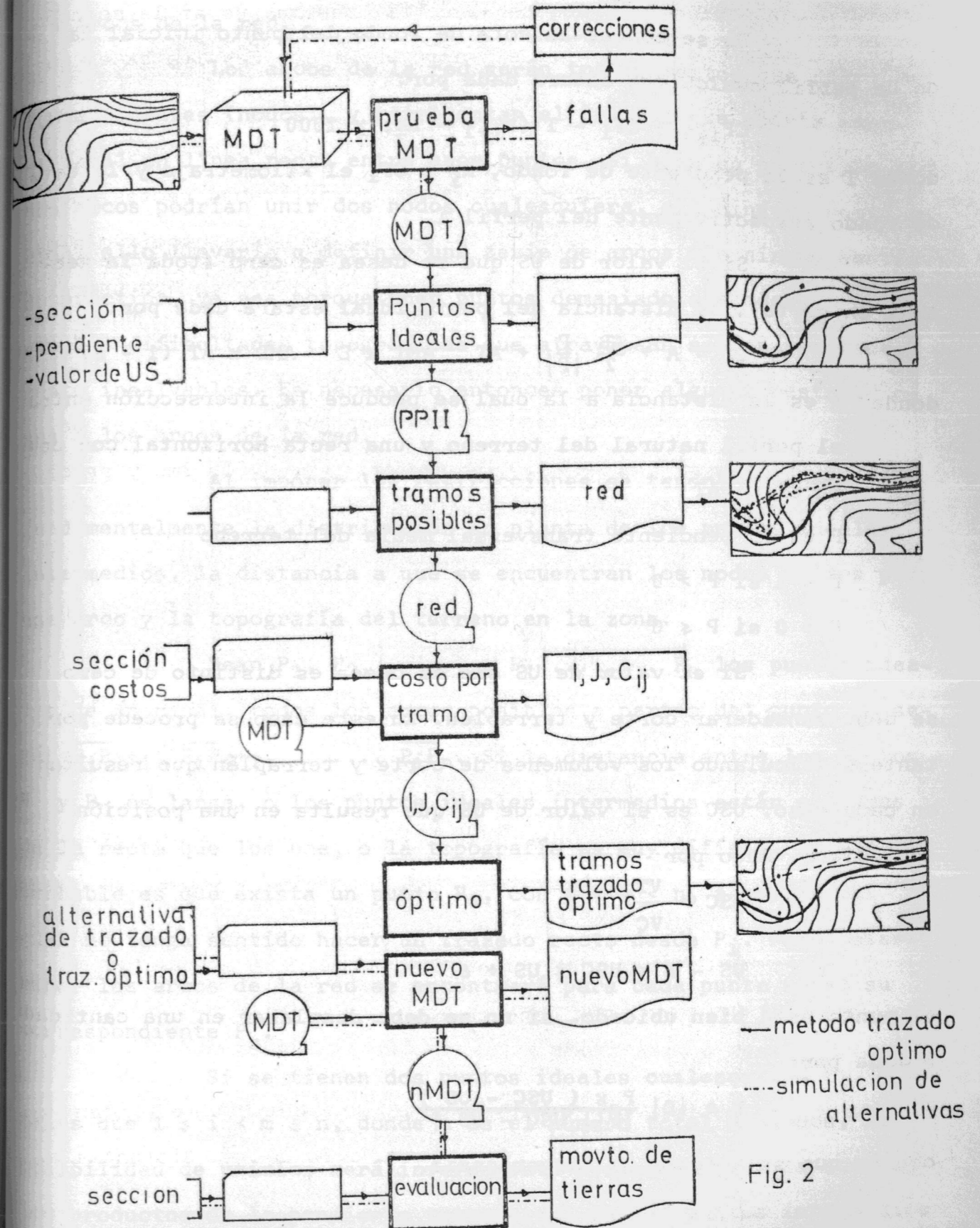


Fig. 2

Si se conoce la cota de fondo del punto inicial la de un perfil cualquiera estará dada por:

$$CF_{i+1} = CF_i - I (K_{i+1} - K_i) \times 1000$$

donde I es la pendiente de fondo, K_i y CF_i el kilometraje y la cota de fondo respectivamente del perfil i.

Si el valor de US que se desea es cero (toda la sección en corte), la distancia del punto ideal estará dada por:

$$DI = A + \frac{AB}{2} \frac{P}{|P|} + AT \quad AMI \times E - AMD \times AT (1 - E)$$

donde: A es la distancia a la cual se produce la intersección entre el perfil natural del terreno y una recta horizontal con cota $CF_i + AT$

P es la pendiente transversal media del terreno

$$E = 1 \text{ si } P > 0$$

$$E = 0 \text{ si } P \leq 0$$

Si el valor de US que se desea es distinto de cero se debe considerar corte y terraplén. En este caso se procede por tanteos calculando los volúmenes de corte y terraplén que resultan en cada caso. USC es el valor de US que resulta en una posición cualquiera, dado por:

$$USC = \frac{VT}{VC}$$

$$\text{si } USC - \Delta \leq USC \leq USC + \Delta$$

el punto está bien ubicado, si no se debe desplazar en una cantidad D dada por:

$$D = |D| \frac{P \times (USC - US)}{|P| |USC - US|}$$

con lo que se asegura la convergencia.

3.4 Arcos de la red.

Los arcos de la red serán tramos rectos que unen dos puntas Ideales (nodos), y representan el trazado que podría seguir el canal en línea recta entre esos puntos. Si bien en principio estos arcos podrían unir dos nodos cualesquiera, sin ninguna restricción, ello llevaría a definir una serie de arcos sin ningún sentido práctico, ya sea porque unen puntos demasiado alejados, o porque las dificultades topográficas que atraviesan serían prácticamente insalvables. Es necesario entonces poner algunas restricciones a los arcos de la red.

Al imponer las restricciones se tendrá en cuenta fundamentalmente la distribución en planta de los puntos ideales intermedios, la distancia a que se encuentran los nodos unidos por ese arco y la topografía del terreno en la zona.

Sean $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$ los puntos ideales de un canal, todos los arcos posibles a partir del punto P_i serán $\overline{P_i P_{i+1}}, \overline{P_i P_{i+2}}, \dots, \overline{P_i P_n}$. Si la distancia entre los puntos P_i y P_n es larga, o los puntos ideales intermedios están alejados de la recta que los une, o la topografía es muy difícil, lo más probable es que exista un punto P_s , con $i < s < n$, a partir del cual no tenga sentido hacer un trazado recto desde P_i . Para determinar los arcos de la red se encontrará para cada punto ideal su correspondiente P_s .

Si se tienen dos puntos ideales cualesquiera P_i, P_m , tales que $1 \leq i < m \leq n$, donde n es el número total de nodos, la posibilidad de unirlos será inversamente proporcional a la suma de los productos de la pendiente transversal de los puntos intermedios

por la distancia desde esos puntos al arco y por la distancia entre ese punto y el punto intermedio siguiente, entonces si F_{im} es un factor que mide la posibilidad de unir por medio de un arco el punto P_i con el P_m , ella estará dada por:

$$F_{im} = \frac{A}{\sum D_k K_k L_k} \quad \text{con } A = \text{cte. de escala.}$$

donde D_k es la distancia desde el punto P_k al arco en cuestión, K_k la pendiente transversal del terreno en el punto k y L_k la distancia sobre el arco desde el punto k hasta el punto $k + 1$.

Pero $D_k K_k = H_k$ es la altura desde el arco hasta el terreno frente al punto k . Entonces $H_k L_k$ es el área de la superficie encerrada en un plano vertical que pasa por el arco y corta el terreno. Entonces

$$P_{im} = \frac{A}{\sum S_{k,k+1}} = \frac{A}{S_{im}}$$

Se supondrá que el arco im pertenece a la red si $P_{im} < P_0$ donde P_0 es el valor máximo permitido para poder unir mediante una recta el punto i con el m .

3.5 Evaluación de costos.

Una vez que se ha determinado el trazado del canal, único entre dos puntos según un método y como una serie de tramos que forman una malla según el otro, se procede a calcular el costo asociado a cada tramo y por lo tanto al trazado total a la red.

La evaluación en sí consta de dos partes: en la primera se confecciona un nuevo MDT cuyo alineamiento base coincide con el trazado del canal; en la segunda etapa, con las caracterís-

ticas del canal y el nuevo MDT, se procede a calcular el costo del tramo.

El nuevo MDT tendrá perfiles transversales en la intersección del trazado, o del arco, con los perfiles transversales del MDT primitivo. Sobre ellos se ubican puntos a distancias constantes referidas al nuevo alineamiento (Fig. 3).

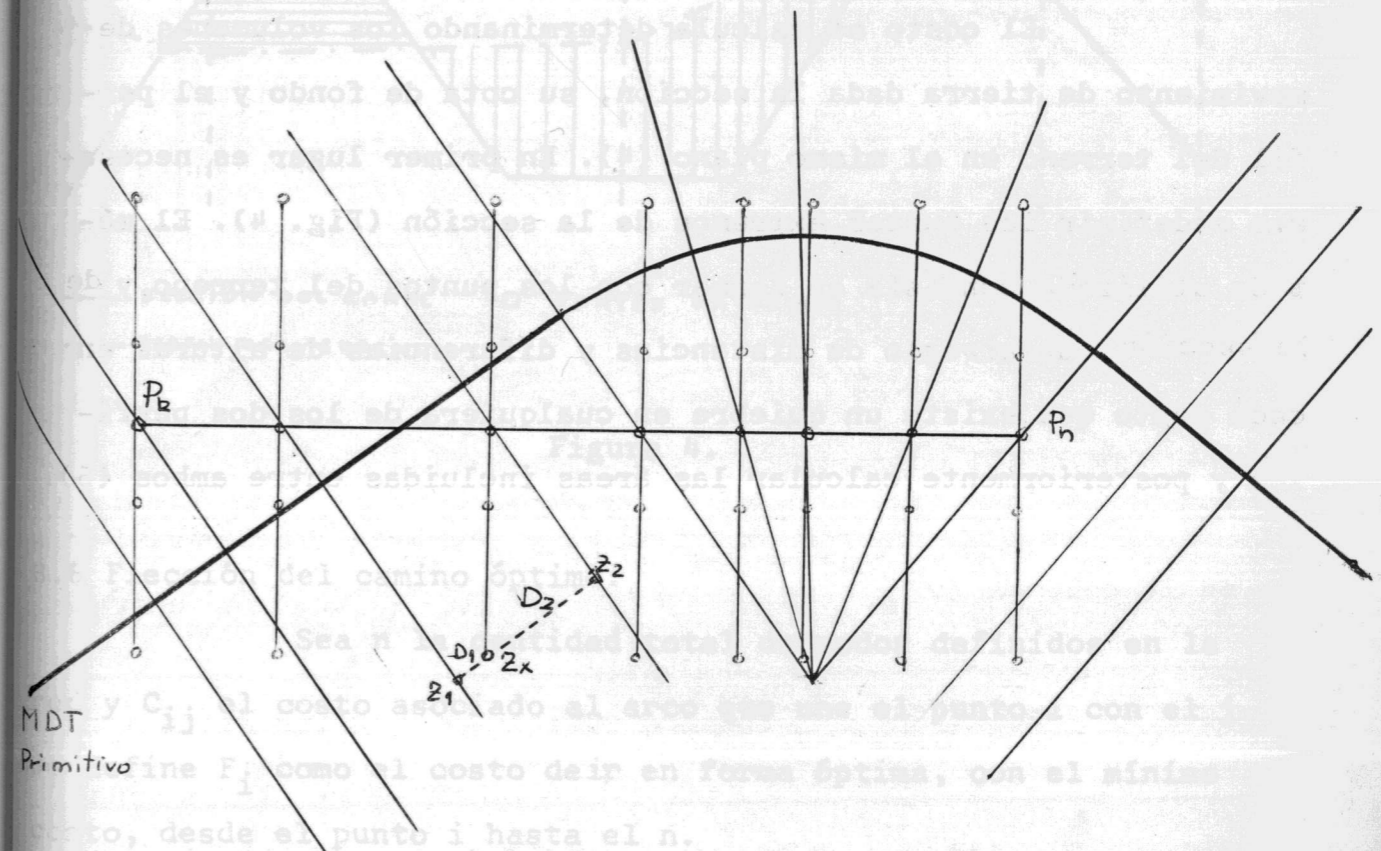


Figura 3: Nuevo MDT y cálculo de las cotas de los puntos que lo forman.

Para conocer las cotas de los nuevos puntos se les ubica planimétricamente sobre el terreno y se calcula su cota interpolándola cuadráticamente entre las cotas de los puntos de los perfiles más cercanos (Fig. 3), de tal manera que:

$$Z_x = \frac{Z_1 D_2^2 + Z_2 D_1^2}{D_1^2 + D_2^2}$$

El costo se calcula determinando los volúmenes de movimiento de tierra dada la sección, su cota de fondo y el perfil del terreno en el mismo plano (4). En primer lugar es necesario redefinir los puntos extremos de la sección (Fig. 4). El método utilizado consiste en formar con los puntos del terreno y de la sección un arreglo de distancias y diferencias de alturas en cada punto que existe un quiebre en cualquiera de los dos perfiles y posteriormente calcular las áreas incluidas entre ambos (5).

(4) Fenves, Steven; "Métodos de computación en Ingeniería Civil", Limusa - Wiley, México 1969.
 (5) Hamsen, R.J., Cason, S.R. y Yeager, P. "Earthwork Computations on Electronic Computers", Jour. of the Highway Division. ASCE, Vol. 87 N° HW1 March 1961.

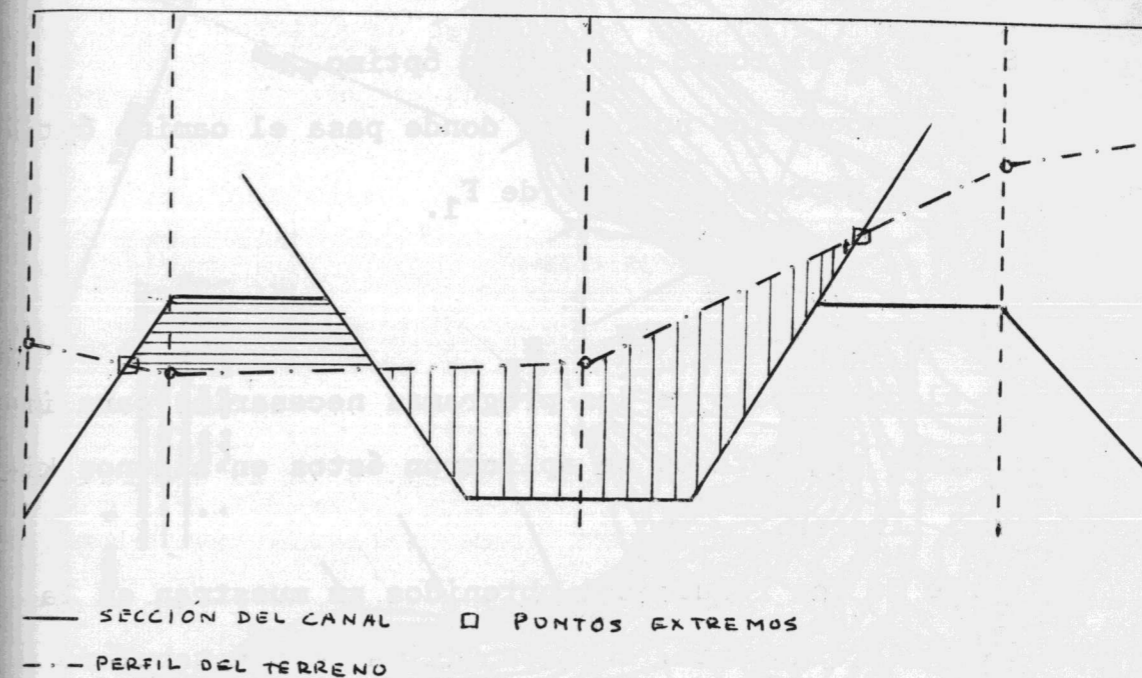


Figura 4.

3.6 Flección del camino óptimo.

Sea n la cantidad total de nodos definidos en la red y C_{ij} el costo asociado al arco que une el punto i con el j . Se define F_i como el costo de ir en forma óptima, con el mínimo costo, desde el punto i hasta el n .

Entonces a partir del último nodo se puede definir para toda la red:

$$\begin{aligned} F_n &= 0 \\ F_{n-1} &= C_{n-1,n} + F_n \\ F_{n-2} &= \min [(C_{n-2,n-1} + F_{n-1}), (C_{n-2,n} + F_n)] \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$F_{n-k} = \min | (C_{n-k,n-k+1} + F_{n-k+1}), \dots, (C_{n-k,n} + F_n) |$$

$$F_1 = \min | (C_{1,2} + F_2), (C_{1,3} + F_3), \dots, (C_{1,n} + F_n) |$$

Siendo F_n el costo del camino óptimo.

Para conocer los nodos por donde pasa el camino óptimo se reconstituye el proceso a partir de F_1 .

4.- ALGUNOS RESULTADOS PRELIMINARES.

En el desarrollo de los programas necesarios para implementar los métodos presentados se aplicaron éstos en algunos kilómetros del canal Linares.

Parte de los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5 y en la tabla siguiente. En esta última se han tabulado los volúmenes y costos de un trazado obtenido por el método de optimización y otro que corresponde a una alternativa cualquiera. En ambos se supuso una misma relación de precios unitarios que se indica en la columna 2.

Designación	Relación de costos	Trazado Optimo		Alternativa 1	
		Cantidad	Costo	Cantidad	Costo
Desmonte	100	9.600	960.000	9.400	940.000
Corte Blando	100	10.200	1.020.000	18.400	1.840.000
Corte Duro	300	0	0	0	0
Corte Roca	800	15.500	12.400.000	17.500	14.000.000
Terraplén	300	14.800	4.445.000	13.400	4.020.000
Revestimiento	2000	2.050	4.100.000	2.020	4.040.000
Total			22.925.000		24.840.000

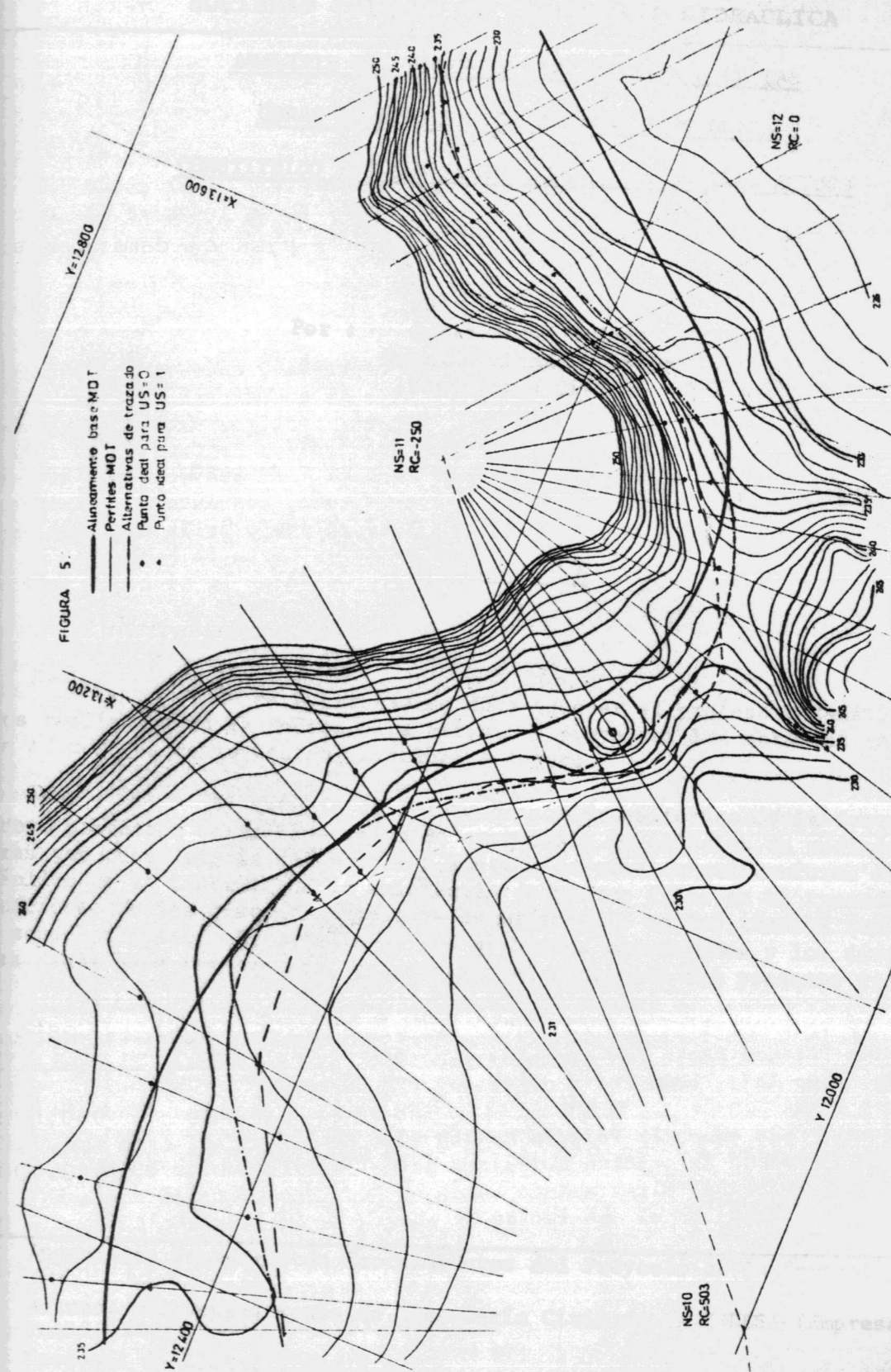


FIGURA 5.