

## REFERENCIAS.

ENDESA, (1984), "Términos de Referencia del Contrato DICO-06.

Fernández, B., (1985), "Modelo Hidráulico. Obra de Salida del Túnel de Desviación Presa Melado.", Informe Final, Depto. Ingeniería Hidráulica, Universidad Católica de Chile.

Fernández, B., A. Sepúlveda y E. Varas, (1985), "Colocación de Enrocados de Protección Mediante Socavación Controlada.", presentado al VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Concepción.

MN-HARZA, (1983), "Anteproyecto de la Central Pehuenche. Informe Técnico 24. Experimentación en Modelo Hidráulico".

Rouse, H., Bhoota, B.V. y En-Yun Hsu, (1951), "High Velocity Flow in Open Channels. Design of Channel Expansions. Transactions ASCE, vol 116.

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

## VII CONGRESO NACIONAL

## PROGRAMA INTERACTIVO PARA EL DISEÑO DE CANALES

María Alexis Jungk W. (1)

Fernando Mendoza P. (2)

## RESUMEN

Aunque el diseño de los canales es sencillo desde el punto de vista de la ingeniería, el hecho que normalmente requieran de grandes inversiones, obliga a poner mayor cuidado en su diseño.

Un buen diseño de canales pretende elegir aquella alternativa que dentro de las condiciones impuestas resulta más adecuada y económica con los medios disponibles. Esta elección depende de una serie de variables, las que deben considerarse en detalle y en conjunto. El considerar el rango posible de estas variables origina múltiples alternativas y dado que el estudio de cada una de ellas es largo y laborioso, el diseño normalmente se simplifica estudiando sólo una alternativa.

El empleo del computador al simplificar la labor permite evaluar un mayor número de alternativas, así como considerar la importancia relativa de cada una de las variables y en definitiva hacer una mejor elección.

Los métodos computacionales para el diseño de canales, permiten abordar éste en sus distintas etapas y en forma separada; pudiendo de esta forma considerar distintas alternativas, sin repetir etapas innecesariamente.

Del análisis que se hace en este trabajo, se desprende que el uso de métodos computacionales para el diseño de canales permite optimizar el diseño: reduciendo el tiempo de trabajo, considerando un mayor número de variables que afectan el diseño y evaluando un mayor número de alternativas.

(1) Ingeniero Civil, Profesor Auxiliar, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Concepción.

(2) Ingeniero Civil, U. de C.

## Metodología de diseño

No existe una norma que fije el diseño de los canales; sin embargo, encontramos recomendaciones o especificaciones en distintos países. En este caso se han estudiado las "Redomendaciones para el proyecto de canales", del Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas de España y las "Especificaciones técnicas para el proyecto de canales", de la Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas de nuestro país.

Se entiende por canal a un cauce artificial abierto, que sirve para conducir aguas. En la determinación de sus variables se debe tener en cuenta una serie de consideraciones: hidráulicas, constructivas, geotécnicas y estructurales. Un buen estudio de ellas determinará en una u otra forma un mejor diseño.

### Diseño de Secciones:

Las secciones consideradas para el diseño son: trapeziales, rectangulares, triangulares y circulares.

Los canales se diseñan en régimen de río, suficiente mente alejado de la crisis. El cálculo de la altura normal se hace usando la ecuación de Manning y tanto para la verificación de la velocidad como para el cálculo de las pérdidas de carga se siguen las "Especificaciones técnicas para el proyecto de canales" del M.O.P.

La ecuación de Manning en función del caudal se puede expresar de la forma:

$$A^5 = \left( \frac{Q \times n}{i} \right)^3 P^2 = 0 \quad (1)$$

En que:

A : Área de la sección mojada

P : perímetro mojado

Q : caudal

n : coeficiente de rugosidad de Manning

i : pendiente de fondo del canal

En la ecuación (1), Q, n e i son constantes dadas por el proyectista, A y P dependen de la forma del canal; la altura normal se calcula resolviendo la ecuación por el método de la bisección en el intervalo (0, HMAX), en que HMAX resulta para velocidad próxima a cero.

### Búsqueda del Eje Rojo

### Modelación del Terreno

La Modelación digital del terreno está directamente relacionada con la utilización que se quiera dar a esta representación de él, ya que esto determinará la forma o el método utilizado en la obtención de los datos del terreno así también como la precisión requerida en la obtención de los datos y para el proyecto.

Este sistema tridimensional se construye a partir de dos sistemas bidimensionales de coordenadas, uno que tiene la ubicación planimétrica de los perfiles en el terreno (X,Y) y otro que define estos perfiles transversalmente (W,Z). Estas coordenadas se relacionan de la forma  $(X,Y) \leftrightarrow W$ , formando así una estructura interna de datos propia y única (Fig. 1).

Este modelo permite relacionar cualquier trazado que por dicha franja se haga, y ubicar en el terreno los puntos del eje rojo del canal.

## MODELO DE TERRENO

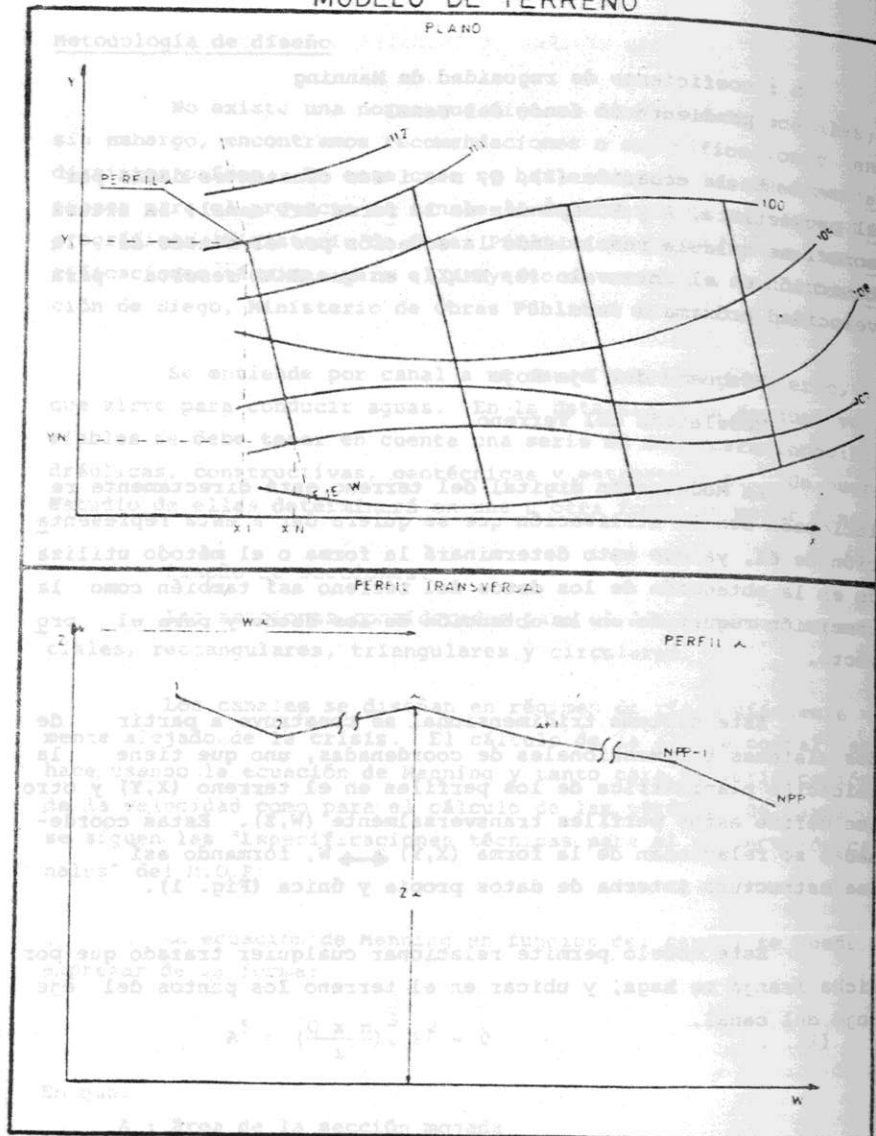


Fig.1. Modelo de Terreno

## Puntos ideales:

Para una misma sección y una misma pendiente de fondo existen numerosas posibilidades para ubicar la sección en un mismo perfil de terreno. La sección puede ubicarse de forma de construirse totalmente en terraplén o totalmente en corte, pasando por cualquier posición intermedia.

Al decidir la ubicación de la sección se debe tener presente la calidad del material del terreno, la pendiente media de la zona, el tipo de revestimiento del canal y los costos que la afectan. Se ha definido para este trabajo el punto óptimo o ideal de ubicación de la sección como aquel en que el área de intersección entre el perfil transversal del terreno y la sección de canal es mínima, es decir, mínimo volumen de excavación.

## Trazado del eje del canal:

En la práctica el trazado del canal nunca pasa por todos los puntos ideales definidos anteriormente, debiendo dejar de lado algunos ya sea para disminuir curvas excesivas o para obtener un camino más corto, lo que redundará en una economía general del proyecto.

Dado que los puntos ideales en general no están formando parte de un tramo recto o curvo, se debe calcular el eje rojo a partir de una interpolación que permita construir este eje en base a tramos rectos y curvos. Este cálculo se ha excluido del programa, dado que no existe un criterio programable para decidir si el tramo a interpolar es recto o curvo, mejor que el que pueda tener el proyectista.

Las obras de arte se consideran como singularidades dentro del trazado del canal; en estas obras el canal deja su forma característica, para adaptarse a situaciones que presenta el terreno o para obtener un comportamiento hidráulico determinado.

### Rectificación de los perfiles transversales:

Dado que al trazar el eje rojo del canal los perfiles transversales del terreno, pueden no ser ortogonales al trazado definitivo, y que el determinar nuevamente dichos perfiles es una etapa larga y laboriosa, y que además en algunos casos esta falta de ortogonalidad disminuye la precisión en el cálculo de las cubriciones, se ha implementado como una opción más del programa la rectificación de dichos perfiles en forma iterativa.

La construcción de un nuevo perfil se hace a partir de la ecuación del nuevo perfil (en planta) y de las ecuaciones de las curvas de nivel para los tramos anterior y posterior al perfil considerado; para cada cota (curva de nivel) se encuentran las coordenadas (W,Z) de cada perfil, resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} Y - Y_{nI-1} &= 0 \\ Y - Y_{nI} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

en que:

Y : ecuación de la recta que define el nuevo perfil en planta.

$Y_{nI-1}$  : ecuación de la recta que representa la cota n en el tramo I-1.

$Y_{nI}$  : ecuación de la recta que representa la cota n en el tramo I.

Estas ecuaciones se solucionan por el método de la bisección en el intervalo  $[XER_{i-1}, XER_{i+1}]$ .

$XER_i$  : coordenadas del eje rojo en el perfil i.

### Cubicaciones:

El cálculo de movimiento de tierras diferencia entre volumen de terraplén y volumen de corte. Este último especifica si es corte de mesa o de cubeta, la calidad del material y además los volúmenes de revestimiento en caso que la sección sea revestida. (Fig. 3)

El cálculo del área de intersección entre la sección y el perfil, se realiza determinando primero la cota de fondo del canal en el perfil como:

$$CF = CFO - P \times DIST \quad (3)$$

en que:

CF : cota de fondo

CFO: cota de fondo perfil anterior

P : pendiente del canal

DIST: distancia según el eje del canal entre el perfil y el perfil anterior. El cálculo de DIST se diferencia según el tramo considerando ser recto o curvo.

Luego se determinan los puntos de intersección entre la sección y el perfil resolviendo la ecuación:

$$ZP(w) - ZS(w) = 0 \quad (4)$$

en que:

ZP(w) : valor de la coordenada z del perfil en el punto w.

ZS(w) : valor de la coordenada z de la sección de canal en el punto w.

Esta ecuación se resuelve en el intervalo  $w(1), w(NPP)$  (figura 2) con el método de la bisección, diferenciando entre parte central (canal) e izquierda y derecha (mesa), previa definición de criterios sobre anchos de camino de borde y terraplenes.

Una vez calculados los puntos de intersección, se calcula el área de intersección entre estos puntos utilizando el método trapecial, siendo la función de integración:

$$F(w) = ZP(w) - ZS(w) \quad (5)$$

en que:

ZP(w) y ZS(w) tienen el mismo significado anterior.

### DEFINICION DE LOS INTERVALOS

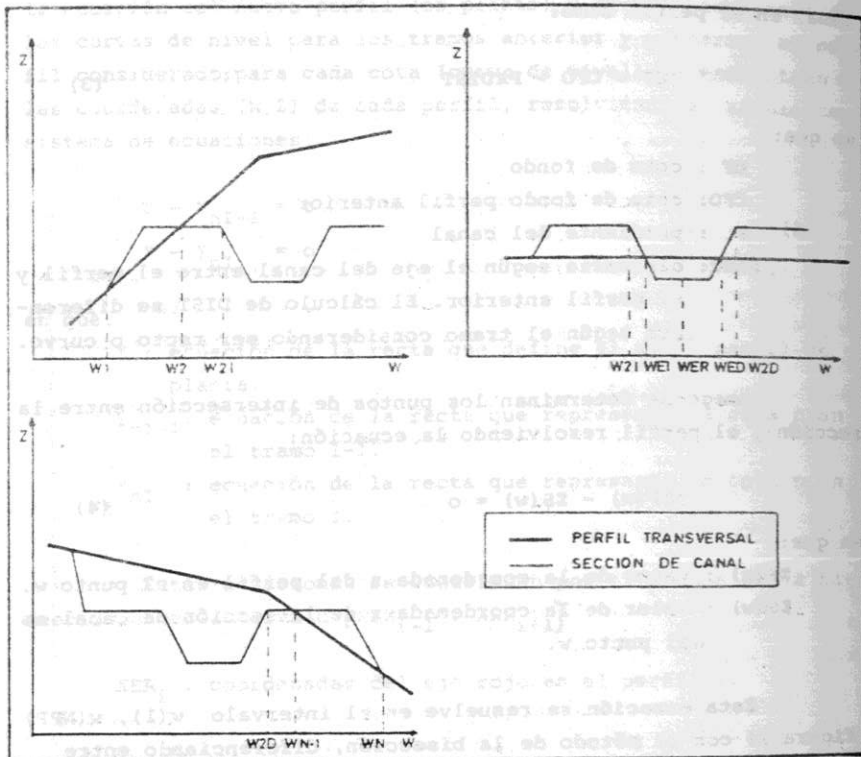


Fig.2.- Definición de los intervalos para el cálculo del área.

El cálculo de los volúmenes de movimiento de tierra y revestimiento se hace a partir de las áreas de intersección con 2 perfiles consecutivos (con un perfil y con el anterior); los volúmenes se calculan de la forma:

$$V_i = (A_{i-1} + A_i) \times \frac{l_i}{2} \quad (6)$$

en que:

- $V_i$  : volumen parcial
- $A_{i-1}$  : área perfil anterior
- $A_i$  : área perfil
- $l_i$  : distancia entre el perfil y el perfil anterior

### CUBICACION

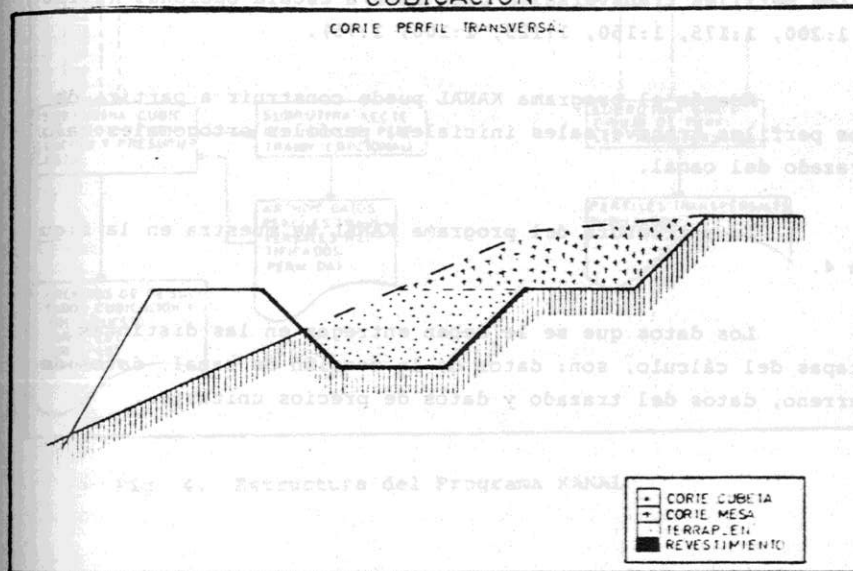


Fig.3. Corte perfil transversal

### Programa KANAL

El programa denominado KANAL se ha hecho en lenguaje Fortran IV para ser usado en un computador DEC-10 y consta de cuatro subprogramas principales, los cuales dividen el diseño en etapas a las que se puede ingresar en forma independiente. Estos subprogramas en sus distintas etapas entregan la siguiente información:

- La sección transversal de canal totalmente diseñada
- Los puntos ideales del trazado a partir de los cuales se puede determinar el eje rojo.
- La información necesaria para dibujar el perfil longitudinal del canal.
- La cubicación y el presupuesto para cada tramo y la totalidad del canal.
- Los perfiles transversales dibujados a escala opcional (1:250, 1:200, 1:175, 1:150, 1:125, 1:100, 1:75).

Además el programa KANAL puede construir a partir de los perfiles transversales iniciales, perfiles ortogonales al trazado del canal.

La estructura del programa KANAL se muestra en la figura 4.

Los datos que se le deben entregar en las distintas etapas del cálculo, son: datos de la sección de canal, datos de terreno, datos del trazado y datos de precios unitarios.

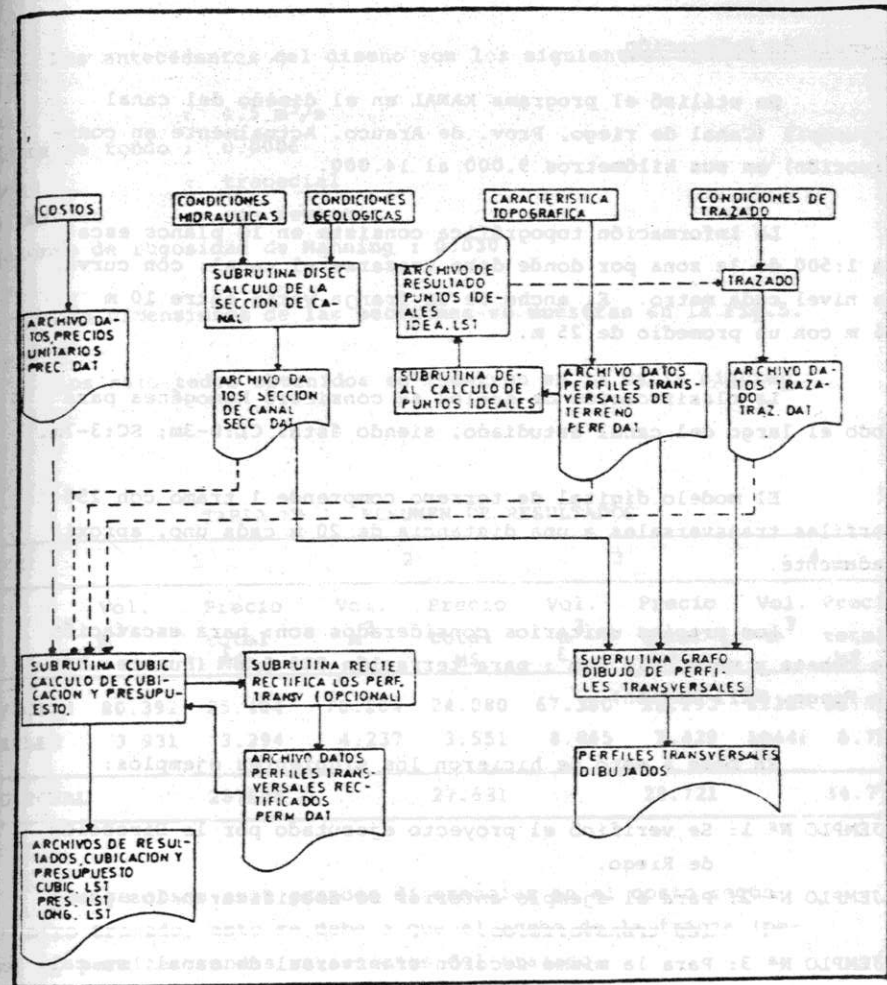


Fig. 4. Estructura del Programa KANAL

## Ejemplo de Aplicación

Se utilizó el programa KANAL en el diseño del canal Cayucupil (Canal de riego, Prov. de Arauco. Actualmente en construcción) en sus kilómetros 9.000 al 14.000.

La información topográfica consiste en 10 planos escala 1:500 de la zona por donde debe trazarse el canal, con curvas de nivel cada metro. El ancho de la franja varía entre 10 m y 35 m con un promedio de 25 m.

La clasificación de suelos se consideró homogénea para todo el largo del canal estudiado, siendo ésta: CL:0-3m; SC:3-7m.

El modelo digital de terreno comprende 1 tramo con 256 perfiles transversales a una distancia de 20 m cada uno, aproximadamente.

Los precios unitarios considerados son: para excavación de cubeta y mesa, 316 \$/m<sup>3</sup>; para terraplén 838 \$/m<sup>3</sup> (Fuente: Dir. de Riego, VIII Región).

En base a esto se hicieron los siguientes ejemplos:

EJEMPLO N° 1: Se verificó el proyecto ejecutado por la Dirección de Riego.

EJEMPLO N° 2: Para el ejemplo anterior se rectificaron los perfiles transversales.

EJEMPLO N° 3: Para la misma sección transversal de canal, se calcularon los puntos ideales, el nuevo trazado y la cubicación y presupuestos respectivos.

EJEMPLO N° 4: Se diseñó de nuevo completamente el canal

Los antecedentes del diseño son los siguientes:

Caudal : 1.5 m<sup>3</sup>/s  
 Pendiente de fondo : 0.0006  
 Sección : trapecial  
 Revestimiento : sin revestir  
 Coeficiente de rugosidad de Manning : 0.030

Las dimensiones de las secciones se muestran en la Fig.5.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

TABLA N° 1. RESUMEN DE RESULTADOS

EJEMPLO	1		2		3		4	
	Vol. m <sup>3</sup>	Precio total M\$	Vol. m <sup>3</sup>	Precio total M\$	Vol. m <sup>3</sup>	Precio total M\$	Vol. m <sup>3</sup>	Precio total M\$
EXCAVACION	80.392	25.404	76.204	24.080	67.380	21.292	82358	26.025
TERRAPLEN	3.931	3.294	4.237	3.551	8.865	7.429	10446	8.753
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>28.698</b>		<b>27.631</b>		<b>28.721</b>		<b>34.778</b>

No se observaron grandes diferencias en el costo según uno u otro trazado; esto se debe a que el ancho de la franja (pequeño) no permite grandes variaciones del trazado.

Se observa eso sí que la diferencia, considerando rectificación de los perfiles es apreciable (del orden del 4%).

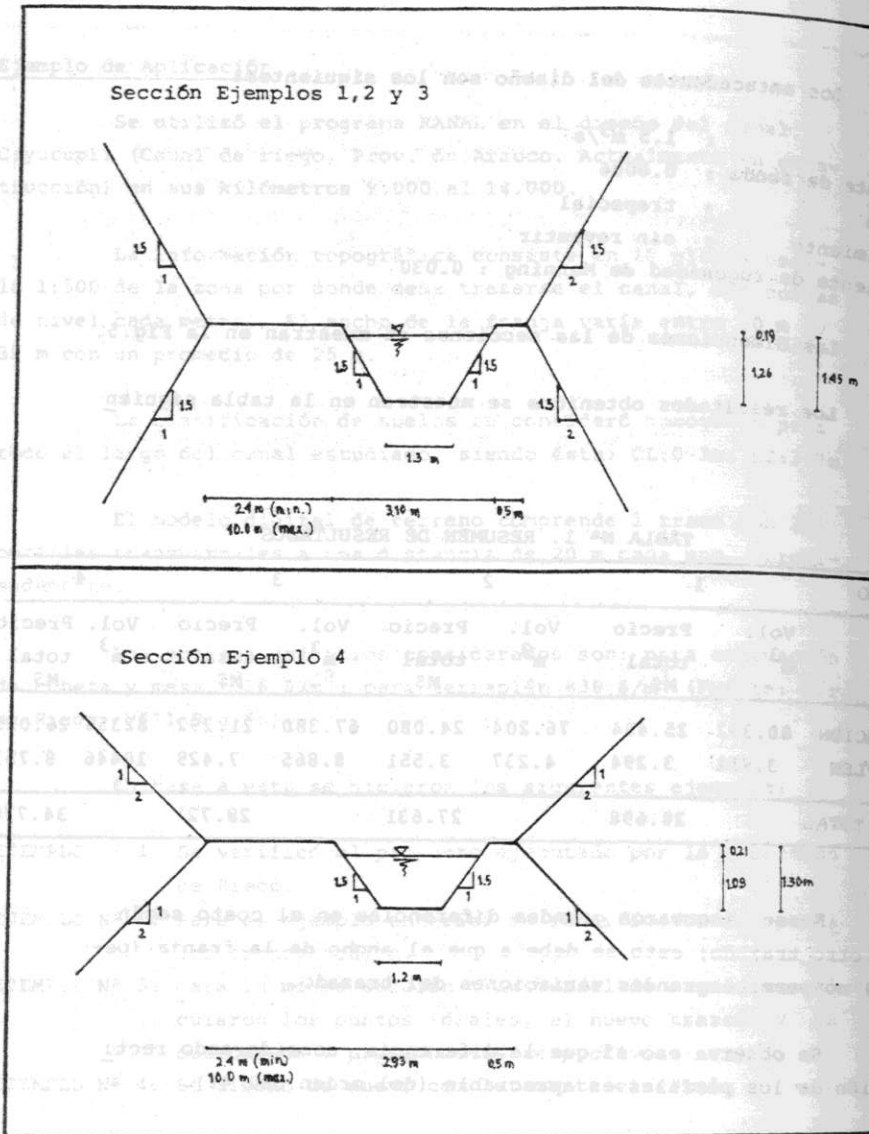


Fig.5. Secciones Transversales de Canal

Conclusiones y Comentarios

El estudio, construcción e implementación de un programa computacional para el diseño de canales permite concluir que éste es una valiosa herramienta para el diseño puesto que:

- Permite reducir los tiempos de cálculo considerablemente. El diseño de 5 Km de canal usando el programa ocupó aproximadamente 2 semanas, esto mismo requirió de 10 semanas usando métodos manuales. (Tabla N° 2)

- Las opciones gráficas además de gran ahorro de tiempo en la confección de los perfiles transversales, permiten una rápida verificación de los datos.

- La rectificación de los perfiles transversales permite un aumento en la precisión de las cubicaciones.

- El tiempo de cálculo usando el programa para un trazado alternativo puede reducirse a una semana, ya que la modelación del terreno que es la etapa más larga se hace solamente una vez.

TABLA N° 2. TIEMPOS DE CALCULO PARA 5KM DE CANAL CON PERFILES TRANSVERSALES CADA 20 M.

<u>Cálculo Manual</u>		<u>Cálculo usando Kanal</u>	
<u>Etapa</u>	<u>tiempo</u>	<u>Etapa</u>	<u>tiempo</u>
1. Dibujo de perfiles transversales.	20 días	1. Modelación del terreno	5 días
2. Trazado del eje	3 días	2. Cálculo puntos ideales	1min(0:10 s CPU)
3. Dibujo sección sobre el perfil.	7 días	3. Trazado del eje	3 días
4. Cubicación (planímetro)	20 días	4. Rectificación de perfiles.	3 min (1:10s CPU)
	50 días	5. Cubicación	3 min(1:27 s CPU)
	(10 semanas)	6. Dibujo de perfiles transversales.	10 horas (2 min x perf.)
			9 días
			(2 semanas)



El uso del programa KANAL requiere para el cálculo de 5 Km de canal, con perfiles transversales cada 20 m, de las siguientes capacidades de memoria y tiempo CPU:

Etapas del diseño	Capac.de Memoria	Tiempo CPU
Diseño de sección de canal	6.5 Mb	00:01.0 s
Cálculo de puntos ideales	6.9 Mb	00:10.0 s
Cubicación y presupuesto	8.4 Mb	01:27.0 s
Rectificación de perfiles transversales.	7.2 Mb	01:10.0 s
Dibujo de perfiles transversales.	7.1 Mb	10 horas (1 perfil cada 2 min.)

El programa construido, Kanal, es de gran manejabilidad, ya que:

- Su operación interactiva permite verificar el diseño paso a paso, modificar variables y ver su incidencia en el diseño total.

- Permite la entrada independiente a cualquiera de las etapas de diseño, no siendo necesario realizar todas las etapas nuevamente al modificar algún parámetro.

- La forma modular del programa elaborado permite que éste sea modificado y extendido de distintas formas, muy fácilmente.

- Los parámetros usados en los diversos cálculos no son fijos, aunque para algunos el programa escoja valores si no le son proporcionados por el usuario.

- El programa está hecho de tal forma que no requiere que el usuario tenga sino conocimientos elementales de manejo de un terminal de computación.

## BIBLIOGRAFIA

- ALDER, H. et al. Cálculo numérico, Concepción, Universidad de Concepción, 1980. 252 p.
- BARRAGAN, MANUEL Canales Circulares. Obras Públicas. Madrid, (198:5-14. Junio 1974).
- CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRAFICOS. Recomendaciones para el proyecto de canales 1ª Parte. Madrid. Ministerio de Obras Públicas, 1963. 97 p.
- DIRECCION DE RIEGO Especificaciones técnicas para proyecto de canales. Santiago, Ministerio de Obras Públicas, 1960. 18 p.
- FERNANDEZ, B. Elección de alternativas de trazado de canales por medio de un computador digital. Santiago, Universidad Católica, 1973. 177 p.
- KRAATZ, D.B. Revestimiento de canales de riego. Roma, FAO, 1977. 217 p.
- MENDOZA P., FERNANDO Diseño Automático de Canales. Informe para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción. Enero, 1985.
- MRUK, STEVEN G. Systems analysis of an interactive digital terrain modelling system. 1982. ACSM-ASP Fall Convention. Hollywood, Florida. 303-314. Sep., 1982.

Ingeniero Civil, Ph.D. Profesor Escuela de Ingeniería Universidad Católica de Chile.

Ingeniero Civil, Ingeniero de la División de Estudios Hidráulicos de la DISESA.