

FIG. 8 ESQUEMAS DE LAS OBRAS ENSAYADAS

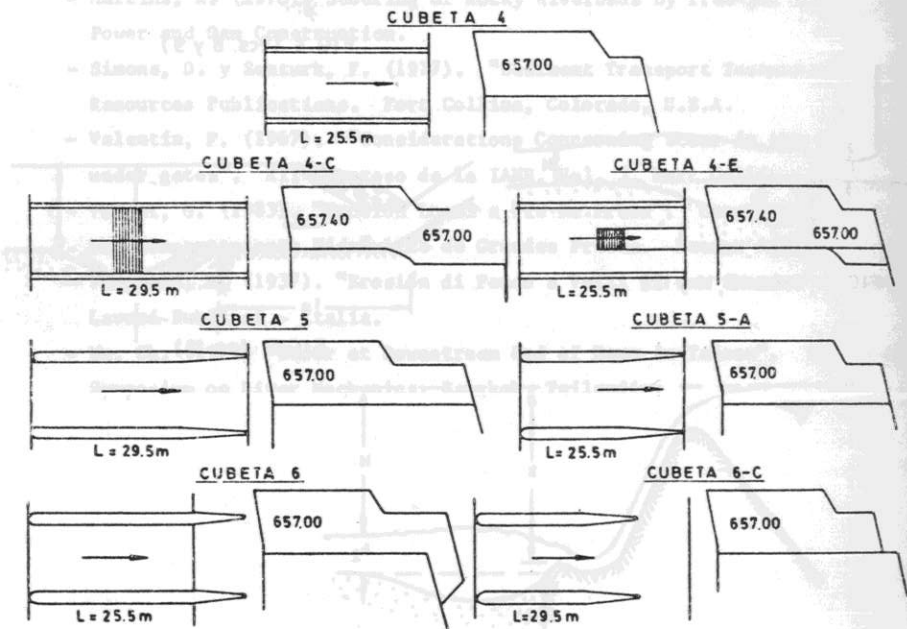


FIG. 9 ESQUEMAS DE LAS CUBETAS ENSAYADAS EN EL MODELO BOCATOMA MAULE

ALGUNAS CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EVACUADOR DE
CRECIDAS DE LA PRESA COLBUN

* Ricardo Riedel Grünwaldt

RESUMEN

Las obras de seguridad del embalse Colbún consistirán en un vertedero frontal controlado por compuertas y un rápido exterior que terminará en un salto de esquí, que descargará directamente al río Maule. El diseño del vertedero fue realizado en base a un modelo hidráulico construido y operado por la ENDESA. En este trabajo se describen y analizan algunos de los aspectos más interesantes en el diseño del vertedero. Si bien las conclusiones obtenidas en este trabajo son en estricto rigor válidas solamente para el vertedero de Colbún, se estima que ellas pueden ser de utilidad para el proyecto de obras similares.

* Ingeniero Civil EMPRESA NACIONAL DE ELECTRICIDAD S.A.
Profesor Centrales de Generación - U.Católica de Chile

1. INTRODUCCION

La presa principal del embalse Colbún, ubicada en el río Maule, será un muro de tierra de 116 m de altura y 550 m de longitud. El evacuador de crecidas será un vertedero frontal controlado por compuertas y seguido de un rápido y salto de esquí. En la Figura N° 1 se muestran las características más importantes del proyecto de esta obra.

El diseño básico del vertedero se efectuó con la ayuda de un modelo hidráulico. En este trabajo se analizan los aspectos más relevantes del diseño del vertedero que tienen relación con los problemas de erosión por el flujo evacuado. Para valorar la bondad de las alternativas ensayadas se tuvieron en cuenta básicamente los siguientes factores:

- Profundidad y ubicación de la fosa de erosión.
- Expansión lateral de la fosa de erosión por las corrientes de retorno o de recirculación y su implicancia en la seguridad del pie de la presa y de la ladera del cerro en que se apoya el salto de esquí.

2. ANTECEDENTES BASICOS PARA EL DISEÑO

La presa Colbún se ubica en una angostura del río Maule directamente aguas arriba de una curva del río. La ubicación más conveniente del evacuador de crecidas es en consecuencia por la ladera derecha o norte del cerro (lado interior de la curva). En la Figura N° 2 se muestran en planta las ubicaciones estudiadas para el eje del rápido, el cual cruza diagonalmente las curvas de nivel de la ladera del cerro. La altura máxima aproximada del cerro en esa zona es de unos 120 m.

Desde el punto de vista geológico, el vertedero quedará fundado íntegramente en roca. Se pueden distinguir dos unidades geológicas básicas. La unidad inferior es una brecha de color gris verdoso (brecha Colbún) formada por clastos angulosos de rocas volcánicas y sedimentarias de tamaños pequeños y en general inferiores a 30 cm, aglomerados por una matriz de origen volcánico. La unidad superior corresponde a lutitas y areniscas finamente estratificadas de colores predominantemente grises. En la Figura N° 3 se muestra un corte transversal típico por el valle.

Desde el punto de vista geotécnico, la brecha Colbún en la zona del salto de esquí del vertedero se presenta masiva, poco fracturada y de una resistencia

media entre 200 y 300 kg/cm².

El material de relleno del valle del río Maule corresponde a un fluvial moderno, de granulometría extendida y con un diámetro medio del orden de 9 cm. No obstante lo anterior, suelen encontrarse bolones aislados que pueden llegar hasta unos 3 m de dimensión máxima.

Desde el punto de vista hidrológico, el estudio de crecidas del río Maule en Colbún fue realizado por ENDESA utilizando dos procedimientos de cálculo: método probabilístico considerando la estadística de Maule en Armerillo y el método del Hidrograma Unitario para la definición de las ondas de crecidas. El caudal peak de la crecida milenaria es de 8 500 m³/s y el de la decamilenaria 10.400 m³/s. La operación adecuada del vertedero permite regular estas crecidas. Para el diseño del vertedero se han adoptado los siguientes caudales peak para las crecidas efluentes:

PERIODO DE RETORNO EN AÑOS	CAUDAL (m ³ /s)
20	4 500
1 000	7 500
10 000	9 000

3. MODELO HIDRAULICO DEL VERTEDERO

El estudio del evacuador de crecidas de la presa Colbún y los túneles de desviación del río Maule se efectuaron con la ayuda de un modelo hidráulico a escala 1/100 sin distorsión. El modelo fue construido y operado por la ENDESA.

En el modelo se reprodujo la presa principal, un tramo del río de unos 900 m aguas arriba de la presa y 2 900 m aguas abajo de ella y los túneles de desviación. En la Figura N° 4 se muestra un esquema en planta del modelo.

La topografía de la roca se reprodujo con mortero (lecho fijo) y el fluvial con arena de granulometría a escala de la del prototipo (lecho móvil).

Las experiencias estandar efectuadas para estudiar el vertedero se ejecutaron haciendo escurrir un caudal constante de 7 500 m³/s durante dos horas modelo. Se comprobó que con este criterio de experimentación la socavación producida en el fluvial era cercana al 90% de la socavación límite obtenida al escurrir en forma indefinida el caudal. También se comprobó que la socava -

ción era del orden del 17% superior a la que se obtiene representando en el modelo la onda real de la crecida.

4. ORIENTACION DEL RAPIDO

Se analizaron tres orientaciones diferentes para el eje del rápido del evacuador de crecidas (Figura N° 2). La posición del umbral de control en todos los casos fue aproximadamente la misma.

Dada la configuración topográfica de la ladera derecha del cerro, las orientaciones ubicadas hacia el lado de la presa son más económicas por cuanto requieren menor excavación para su implantación. Sin embargo, esas soluciones acercan la zona de impacto hacia el pie de la presa, generándose corrientes de recirculación que pueden erosionar dicha obra.

En la Figura N° 5 se muestra la extensión de la fosa de erosión para las orientaciones extremas ensayadas. Los puntos de impacto en el lecho se ubican a una distancia de unos 85 m entre si y aproximadamente en esa misma magnitud se desplazan las fosas de erosión hacia el lado del pie de la presa. Las corrientes de recirculación que se generan por los contornos topográficos de las riberas que limitan el flujo son muy importantes y obligan a elegir la orientación del rápido en forma que la zona de impacto se ubique a una distancia suficiente del pie de la presa.

Además de los inconvenientes de orden económico que tiene la orientación N° 1, está el hecho constatado en el modelo que en ese caso el extremo derecho del chorro impacta muy cerca de la ladera del cerro, poniendo en peligro la estabilidad de la obra de salida del desagüe de fondo, que se ubicará en el túnel de desviación izquierdo (Figura N° 2).

El eje de la solución definitiva corresponde a la orientación N° 3 (Figura N° 2). La zona de impacto en ese caso se ubica a unos 300 m del pie de la presa. Para limitar las corrientes de recirculación se recurrió a la concentración del flujo evacuado.

5. CONVERGENCIA DEL RAPIDO

Los ensayos con un rápido de ancho constante y caudal unitario de $105 \text{ m}^3/\text{s}$ para el caudal de diseño, producen corrientes de recirculación amplias y energéticas que erosionan el pie de la presa en una extensión de aproximadamente 100 m.

Con el objeto de limitar la expansión lateral de la socavación se recurrió a la convergencia gradual de las paredes laterales del rápido. El caudal unitario varió de $105 \text{ m}^3/\text{s}$ a $150 \text{ m}^3/\text{s}$ en la zona del salto de esquí. En la Figura N° 6 se muestran los resultados obtenidos.

En los ensayos comparativos mencionados la concentración del flujo permitió alejar la fosa de erosión del pié de la presa en aproximadamente 88 m. Como contrapartida de lo anterior la socavación máxima medida respecto al lecho original aumentó de 49 m a 58 m y también aumentaron los niveles de aguas en los costados de las paredes del rápido.

6. REPRESENTACION DE LA ROCA

Un problema frecuente que se presenta en los modelos hidráulicos es la representación de las características mecánicas de la roca. En algunos casos se suele recurrir a la representación de la roca en base a materiales semi-cohesivos o en base a bloques de hormigón de tamaño y forma adecuados. En ambos casos la interpretación de los resultados es incierta y difícil.

En el modelo del vertedero Colbún se optó por efectuar algunos ensayos extremos, representando la topografía de la roca con lecho móvil total (arena).

Los resultados de ensayos comparativos de ambas soluciones, lecho de roca fijo y lecho móvil total, se pueden resumir en los siguientes puntos :

- En los ensayos con lecho móvil total, la fosa de erosión se acerca más al pié de la presa.
- Con lecho de roca fijo la fosa de erosión tiene mayor amplitud según la dirección del lanzamiento (Figura N° 7).
- La profundidad de la fosa de erosión es mayor con lecho móvil total y se acerca más hacia el pié del salto de esquí (Figura N° 7).
- Con lecho móvil total se erosiona fuertemente la ladera del cerro al pié del salto de esquí, debido a las velocidades de las corrientes de recirculación. Representando la roca con lecho fijo se midieron velocidades tangenciales en la ladera del cerro del orden de 6,5 m/s y con lecho móvil total de aproximadamente 5 m/s junto a la pared del salto de esquí.

Del análisis de los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

a) En la zona de impacto de la lámina líquida se produce una enorme turbulencia, presiones dinámicas elevadas y severas fluctuaciones de presión. Existe consenso en reconocer que esta acción violenta del agua es capaz de destruir progresivamente la roca. En consecuencia, en las vecindades de la zona de impacto del chorro es razonable considerar la erosión producida en los ensayos con lecho móvil total para definir la dimensión de la fosa de erosión.

b) En relación a la extensión lateral de la fosa de erosión hacia la ladera del cerro al pie del salto de esquí y hacia el pie de la presa, en el modelo se observó que dichas zonas son erosionadas fundamentalmente por la acción de las velocidades tangenciales producidas por las corrientes de recirculación. En consecuencia, es razonable considerar los resultados de los ensayos con lecho de roca fijo para definir las dimensiones laterales de la fosa de erosión.

7. FORMA DEL SALTO DE ESQUI

La forma de la obra terminal del rápido fue estudiada acuciosamente en el modelo. Se ensayaron lanzadores de variadas formas: dientes alternados, fondo del cuenco inclinado, división en trampolines desfasados según el eje del rápido, umbrales de salida inclinados, división del trampolín en saltos con diferentes ángulos de lanzamiento, etc. El objetivo de estas obras era disipar parte de la energía por la interacción de masas de agua en el aire y minimizar así los fenómenos de erosión en el lecho. Estos ensayos se efectuaron con lecho móvil total, concluyéndose básicamente lo siguiente:

Con trampolines de lanzamiento simples (arcos circulares continuos) se obtienen socavaciones del orden de 60 m de profundidad máxima. Con estructuras complejas de trampolines se logra bajar la socavación a valores del orden de 50 m.

La expansión lateral de la fosa de erosión también es posible disminuirla mediante el diseño de trampolines complejos.

Un cuando los resultados indican la posibilidad de disminuir la fosa de erosión, se consideró que las singularidades presentes en las zonas de alta velocidad de los trampolines complejos, 38 m/s, presentan serios riesgos de cavitación. Por tales motivos, se decidió continuar la investigación en la línea

de los saltos de esquí simples, simétricos y generados por arcos de círculo.

8. UBICACION EN COTA DEL SALTO DE ESQUI

Con el objeto de alejar la zona de impacto del chorro de la ladera del cerro, es conveniente ubicar el salto de esquí a una cota baja pero suficientemente elevado sobre el nivel de aguas abajo. Por otra parte, con la idea de limitar las velocidades al término del rápido a menos de 40 m/s por problemas de cavitación, se ubicó el fondo del cuenco a la cota 350 m, lo cual da una altura bruta de caída de 86 m. Para el caudal de diseño (7 500 m³/s) se producen velocidades medias máximas del orden de 37 a 38 m/s. Velocidades mayores han demostrado en la práctica que producen cavitación en las superficies de hormigón.

9. ESVIACION DEL UMBRAL DE SALIDA DEL SALTO DE ESQUI

Debido a la inclinación del plano de roca con respecto al eje del rápido (Figura N° 2) es posible aumentar el alcance del chorro por el extremo derecho del salto de esquí esviando en planta su umbral terminal, en forma de dejarlo paralelo a las curvas de nivel del terreno.

Los ensayos realizados en el modelo indicaron que en esos casos el chorro se concentra hacia la derecha y sale en forma de espiral, expandiéndose aproximadamente 16° en planta con respecto al eje del rápido. Por la inclinación que presenta el plano de roca este fenómeno hace que la zona de impacto del chorro se acerque hacia la ladera del cerro y se pierda la ventaja que tiene este tipo de lanzador. Considerando además la propensión a la cavitación que presenta esta solución por la presencia de una zona horizontal en el fondo del cuenco, se decidió adoptar para el proyecto un salto de esquí simétrico y con su umbral de salida normal al eje del rápido.

10. ANGULO DE LANZAMIENTO DEL SALTO DE ESQUI

El ángulo de lanzamiento del salto de esquí influye básicamente en los siguientes aspectos:

a) Profundidad de la fosa de erosión

Se efectuaron ensayos con lecho de roca fijo variando los ángulos de lanzamiento entre 20 y 45°. Las diferencias medidas en la socavación máxima fueron pequeñas, del orden de 5%. Si la roca fuera erosionable (lecho

móvil total) las profundidades máximas de la socavación aumentarán aproximadamente en un 14%.

b) Extensión lateral de la fosa de erosión

En la Figura N° 8 se muestra la extensión lateral de la fosa de erosión producida con lanzadores de diferentes ángulos de salidas. Se concluye en forma clara que a mayor ángulo de lanzamiento menor es la extensión lateral de la fosa de erosión. Esto se debe a que las corrientes de recirculación disminuyen en forma importante al aumentar este ángulo. En la tabla siguiente se dan las velocidades tangenciales máximas medidas al pie del salto de esquí en la solución de proyecto (Figura N° 1):

Q = 4 500 m ³ /s		Q = 7 500 m ³ /s	
α°	V (m/s)	α°	V (m/s)
40	7,0	40	8
45	5,0	45	6,5

Considerando la conveniencia de aumentar la longitud del lanzamiento y reducir la extensión de la fosa de erosión y por ende aumentar la seguridad de erosión del pie de la presa y ladera del cerro, sería adecuado elegir un ángulo de lanzamiento cercano a 45°. Por otra parte, ángulos muy grandes producirían fosas de erosión más profundas y el rechazo del resalto en el cuenco se producirá para caudales mayores, aspectos inconvenientes. Finalmente, la tendencia actual en el diseño de obras similares es usar ángulos entre 30 y 40°.

Después de analizar estos antecedentes se concluyó que un ángulo de lanzamiento de 40° resulta ser la mejor opción para el salto de esquí del vertedero Colbún. Dicha solución se muestra en la Figura N° 1 y los resultados de los ensayos de socavación se dan en la tabla siguiente :

CAUDAL (m ³ /s)	SOCAVACION MAXIMA (m)	DISTANCIA FOSA DE EROSION A PIE DE PRESA (m)
4 500	48	60
7 500	61	5

CONCLUSION

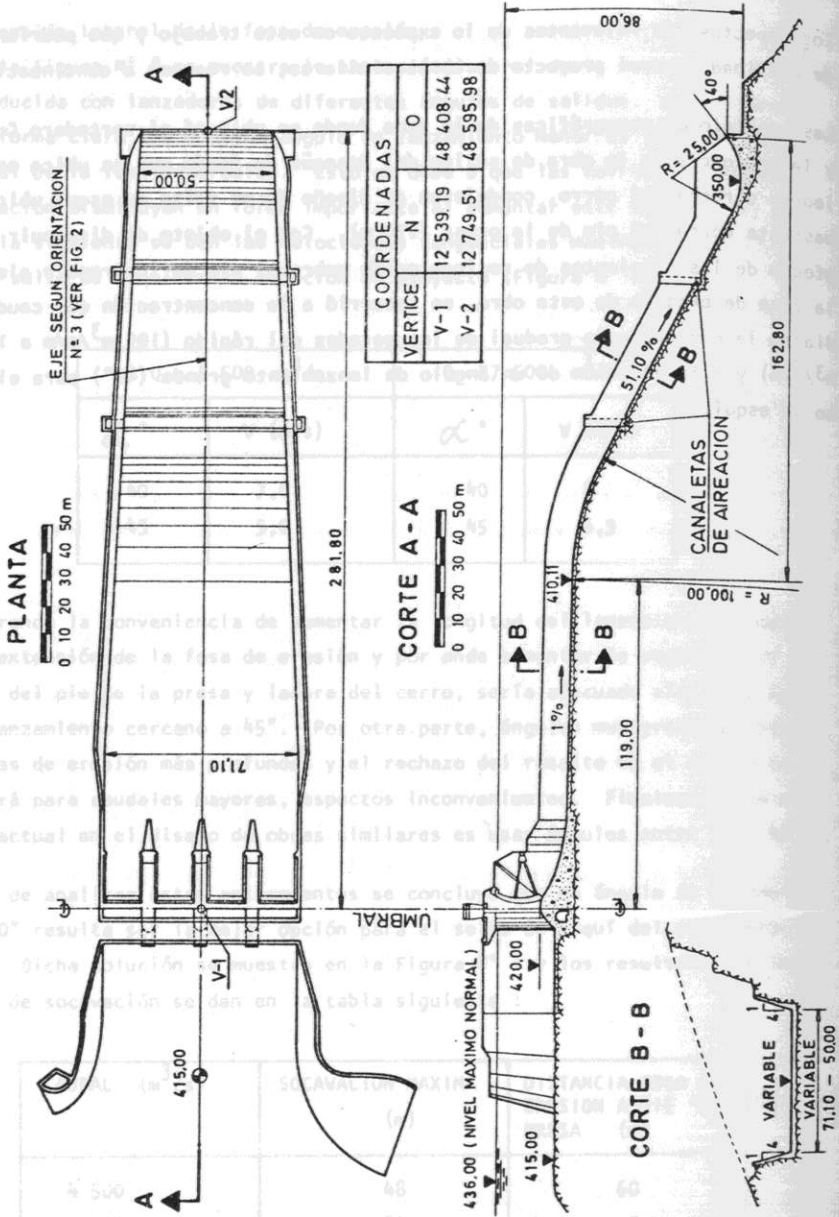
Los aspectos más relevantes de lo expuesto en este trabajo y que podrían ser de utilidad para el proyecto de obras similares, se resumen a continuación:

Las condiciones topográficas de la zona donde se ubicará el vertedero Colbún, y la presencia de la obra de salida del desagüe de fondo que se ubica en la ladera derecha del cerro, condujeron al diseño de un salto de esquí ubicado bastante cerca del pie de la presa (170 m). Con el objeto de disminuir el efecto de las corrientes de recirculación sobre el pie de la presa y alejar la fosa de erosión de esta obra, se recurrió a la concentración del caudal mediante la convergencia gradual de las paredes del rápido (105 m³/s/m a 150 m³/s/m) y a la adopción de un ángulo de lanzamiento grande (40°) para el salto de esquí.



FIGURA N° 1

Disposición General



PLANTA GENERAL
EJES DEL VEREDERO ENSAYADOS EN EL MODELO

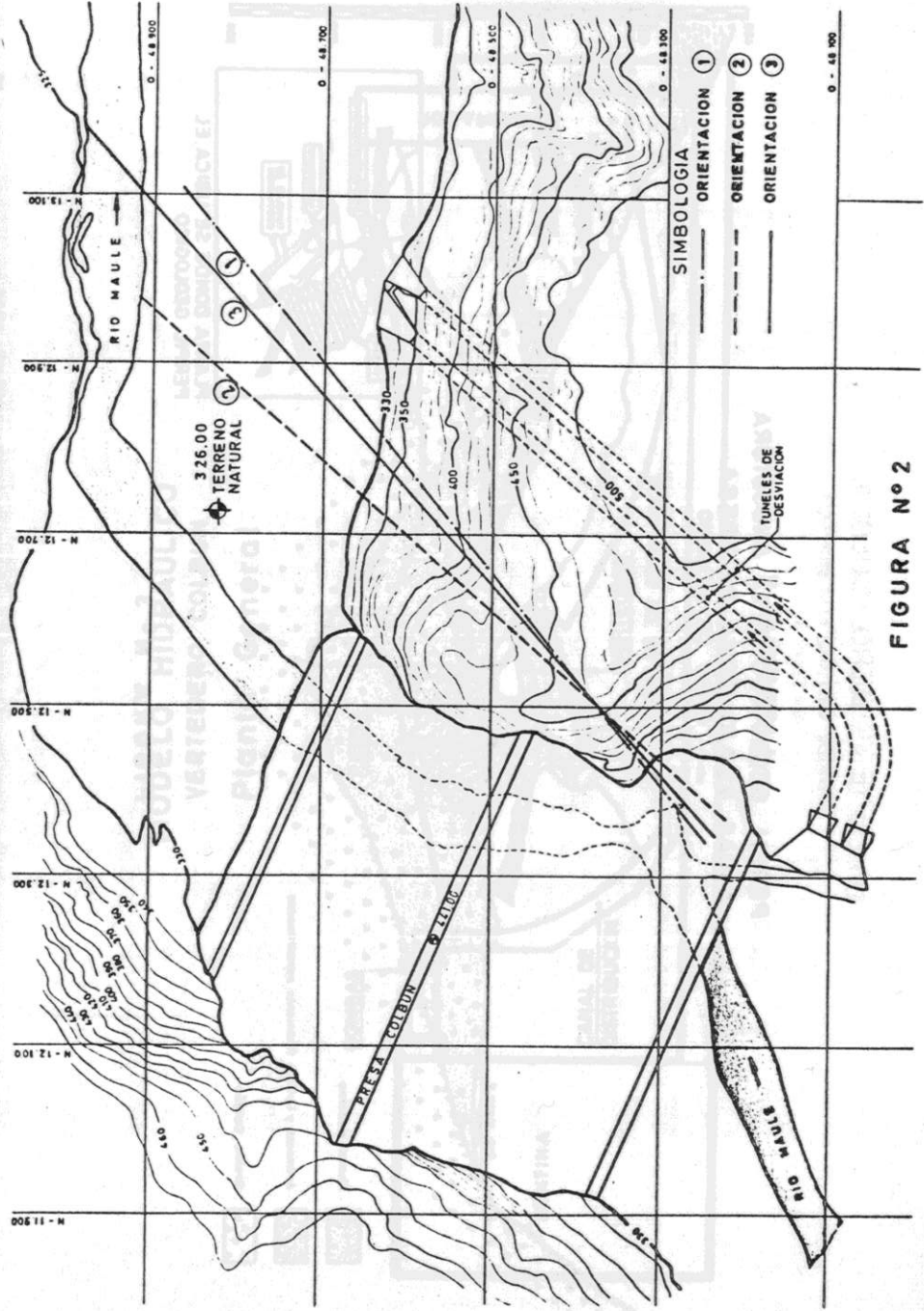
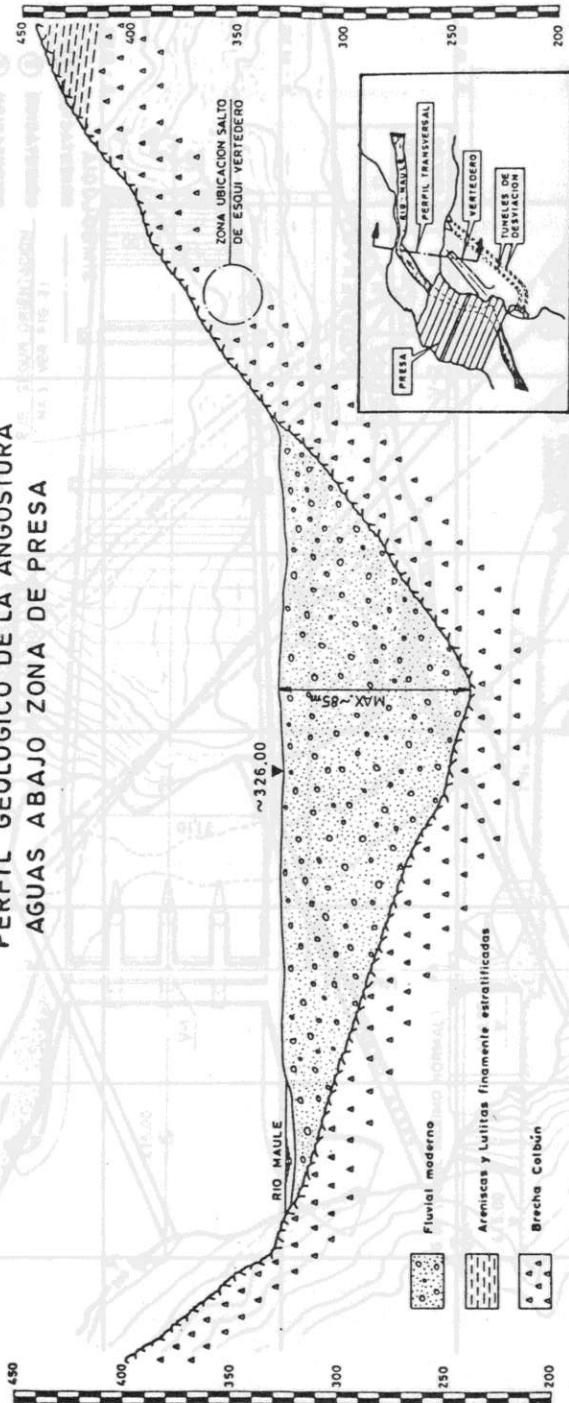


FIGURA N° 2

PERFIL GEOLOGICO DE LA ANGOSTURA
AGUAS ABAJO ZONA DE PRESA



PLANTA DONDE SE UBICA EL
PERFIL GEOLOGICO

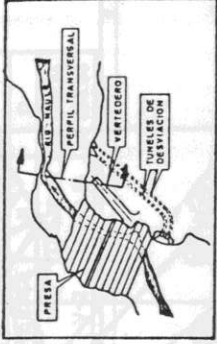


FIGURA N° 3

MODELO HIDRAULICO
VERTEDERO COLBUN
Planta General

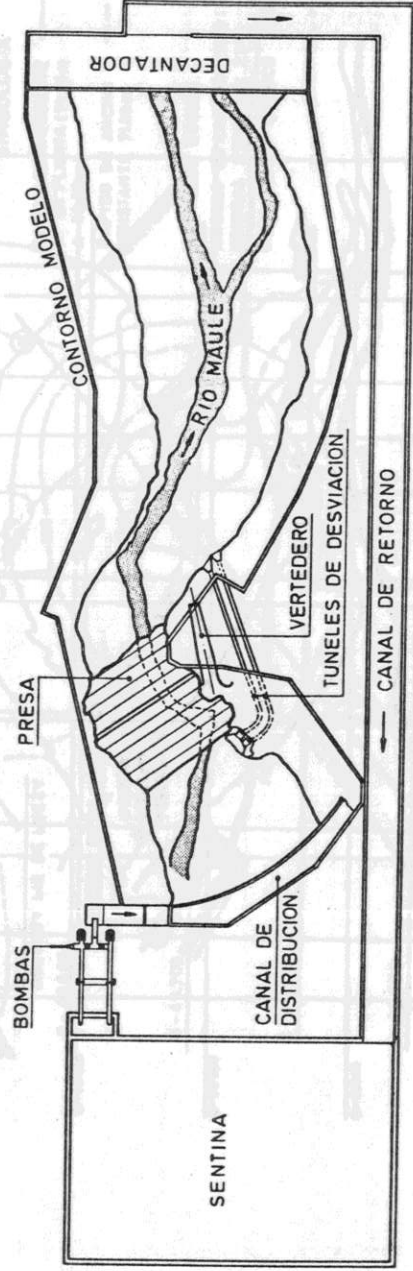


FIGURA N° 4

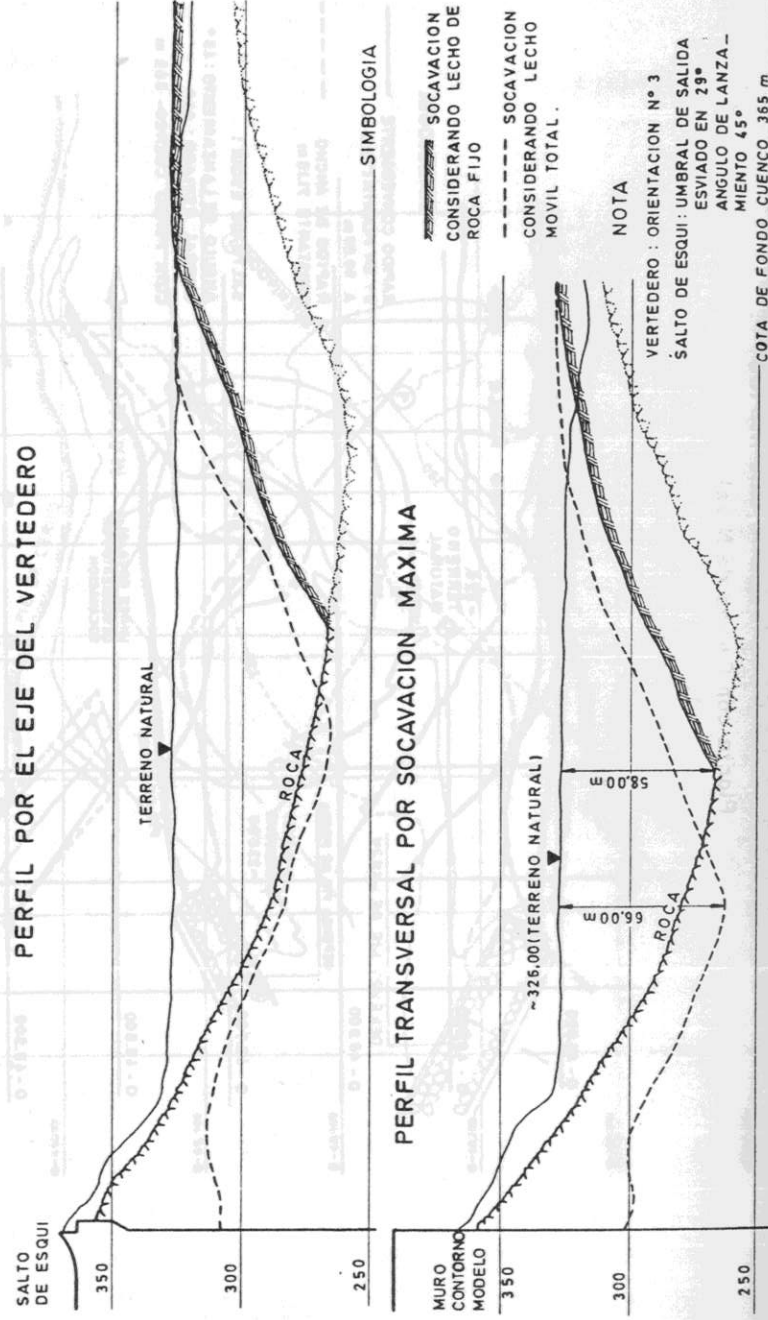


FIGURA N° 7

EFFECTO DEL ANGULO DE LANZAMIENTO Planta con Curvas de Nivel

Ensayo con Lecho de Roca Fijo

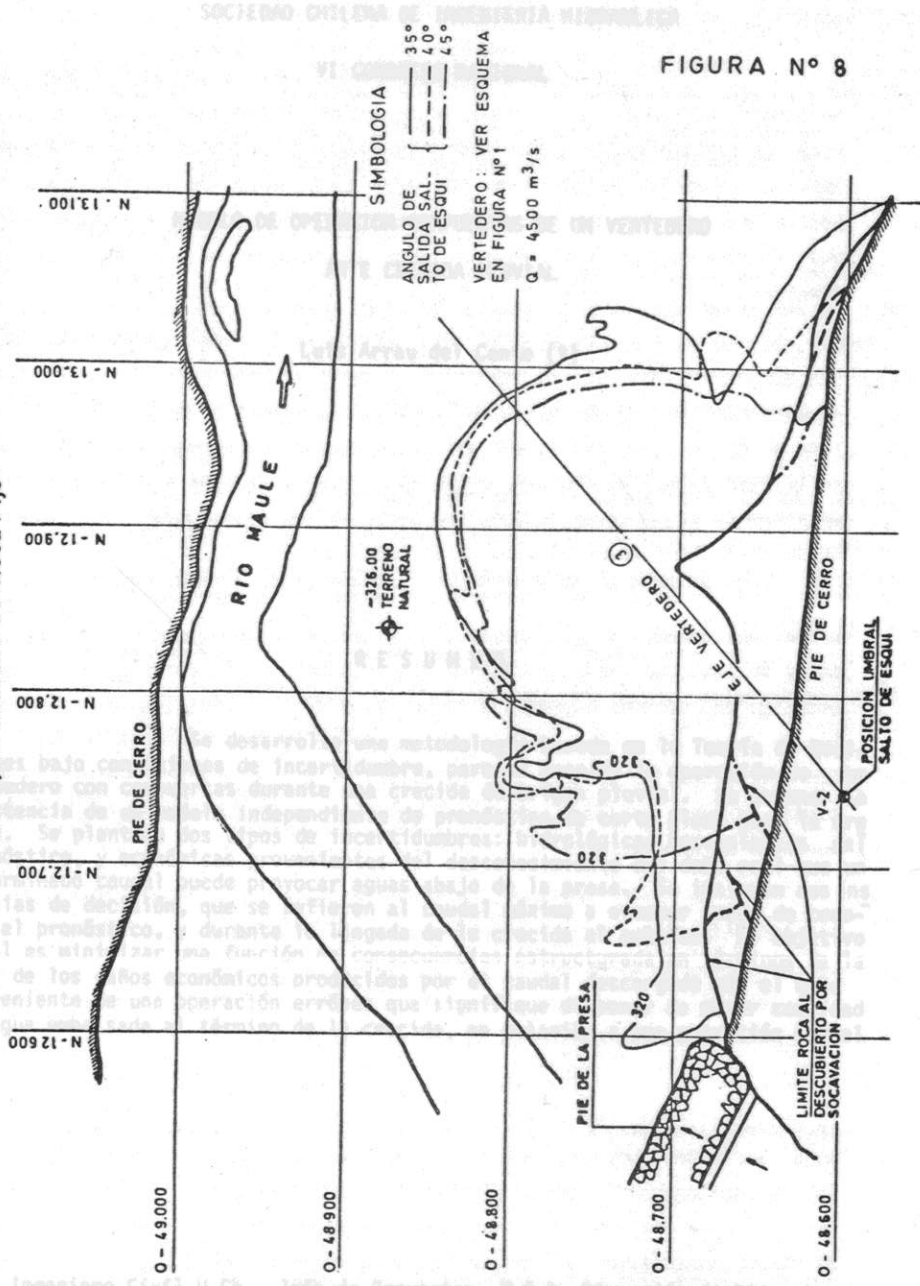


FIGURA N° 8