

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO**



Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica



Instituto Nacional
de Hidráulica - Chile

10

**INFLUENCIA DEL METODO DE CALCULO DE
TRANSPORTE SOLIDO
EN LA MODELACION MORFOLOGICA
CUASI-BIDIMENSIONAL**

**BERNARDO DOMINGUEZ C. (1) - LUIS E. ESTELLE A. (2)
RICARDO CORTEZ C. (3)**

RESUMEN

La modelación Cuasi-Bidimensional es una alternativa simple para analizar flujos con cierto grado de bidimensionalidad que tienen lugar en zonas de estuarios. La aproximación al efecto bidimensional permite predecir cambios morfológicos diferenciales en una sección, dependiendo de la intensidad de los procesos a que se encuentran sometidos los tubos de corrientes que conforman teóricamente el flujo. Sin embargo, los procesos morfológicos modelados dependen del método de cálculo para el transporte sólido y del número de tubos utilizado. En este trabajo se presenta, a modo comparativo, la influencia en los cambios morfológicos que predice un modelo cuasi-bidimensional para un lecho de estuario, de distintos métodos para el cálculo del transporte sólido.

- (1) Dr. Ing. Profesor Titular - Pontificia Universidad Católica de Chile.
- (2) Ing. Civil Jefe Lab. de Peñaflores - Instituto Nacional de Hidráulica.
- (3) Ing. Civil Investigador - Instituto Nacional de Hidráulica.

1. GENERALIDADES

La simplicidad de la modelación «Cuasi-Bidimensional», Domínguez, Estellé, Cortez 1995, para el análisis del funcionamiento de cursos fluviales incluyendo las evoluciones morfológicas del fondo ha motivado, desde hace algún tiempo, a los ingenieros dedicados a problemas fluviales a su análisis, estudio y aplicación. El uso de este tipo de modelos es atractivo en zonas de hidrodinámica compleja como las que se desarrollan en los pequeños estuarios de Chile. En estos estuarios, es común el desarrollo de actividades pesqueras artesanales que aprovechan las características estuariales para sus fines, sin embargo la acción permanente del mar en la desembocadura provoca la formación de barras que restringe la zona navegable, generándose de este modo en el sector fluvial canales por el fondo, que no son percibidos desde la superficie y que conforman la vía navegable o track. En estas zonas el flujo en estiaje es marcadamente impermanente, recayendo en la acción periódica de la marea (flujos y reflujos), un papel preponderante en la mantención de las profundidades del lecho.

Para el cálculo de los cambios morfológicos se utiliza la continuidad del gasto sólido en cada sección y en cada tubo de corriente. Por esta razón los cambios quedan dependiendo de la fórmula de transporte sólido utilizada y del tipo de transporte considerado sea éste de fondo, en suspensión o total. Considerando lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo se efectúa para el último tramo del río Aysén, un análisis de sensibilidad del modelo cuasi-bidimensional de Domínguez et al (1994) frente a distintas metodologías de cálculo de gasto sólido, como también frente a la consideración de distintos tipos de transporte.

2. ECUACIONES BASICAS

2.1. ECUACIONES BASICAS DEL MOVIMIENTO CUASI-BIDIMENSIONAL

Las ecuaciones básicas del movimiento Cuasi-Bidimensional, Domínguez, et al (1994), son las ecuaciones del movimiento impermanente, esto es, las conocidas ecuaciones de Saint-Venant, a las que se les agrega una ecuación de continuidad de sedimentos. Para simular la bidimensionalidad se utiliza el concepto del tubo de corriente, que es un tubo imaginario delimitado por líneas de corrientes, donde el gasto que fluye es continuo en su extensión.

Para la determinación de los tubos de corriente se utiliza la condición de igual conductividad hidráulica para determinar los tubos de corriente en cada sección. Cada tubo puede ser tratado en forma unidimensional, formando un conjunto que se aproxima en cierto modo al flujo bidimensional, situación que se utiliza para calcular la fase morfológica.

2.2. ECUACIONES PARA EL GASTO SOLIDO

La literatura presenta variados métodos para el cálculo del gasto sólido, sea éste por acarreo de fondo, suspensión o total. Para el presente trabajo se consideran las fórmulas propuestas, para el acarreo de fondo, por Meyer-Peter y Müller (M-PyM) y Van Rijn (V-R F). Para el gasto sólido por suspensión se consideró el método de Van Rijn (V-R S) y para el gasto sólido total los métodos de Van Rijn (V-R T) y Engelund-Hansen (E-H).

- Método de Meyer-Peter y Müller - Gasto sólido de fondo (M-PyM)

Según este método, la tasa volumétrica de arrastre de fondo [m²/s] es:

$$Q_{b,c} = \frac{\Phi_b}{(s-1)^{0.5} g^{0.5} d_m^{1.5}} \quad (1)$$

donde:

Φ_b	:	Tasa de transporte de fondo adimensional
s	:	Densidad relativa
g	:	Aceleración de gravedad [m/s ²]
d_m	:	Diámetro medio de la partícula [m]

- Método de Van Rijn - Gasto Sólido de Fondo (V-R F)

Según Van Rijn, la tasa volumétrica de arrastre de fondo [m²/s] es:

$$Q_{b,c} = 0.053 (s-1)^{0.5} g^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1} \quad T < 3$$

$$Q_{b,c} = 0.100 (s-1)^{0.5} g^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{1.5} \quad T \geq 3$$

donde:

T	:	Parámetro adimensional del esfuerzo de corte
g	:	Aceleración de gravedad [m/s ²]
D_*	:	Parámetro adimensional de la partícula
d_{50}	:	Diámetro para el cual pasa un 50% del sedimento [m]
s	:	Densidad relativa

- Método de Van Rijn - Gasto Sólido en Suspensión (V-R S)

Según el mismo Van Rijn, la tasa volumétrica del transporte en suspensión [m²/s] es:

$$Q_{s,c} = F u h c_a$$

donde:

F	:	Factor de forma
a	:	Nivel de referencia [m]
h	:	Profundidad del agua [m]
c _a	:	Concentración de referencia
u	:	Velocidad media en la vertical [m/s]

- Método de Van Rijn - Gasto Sólido Total (V-R T)

Corresponde a la suma del gasto sólido de fondo y el de suspensión.

- Método de Engelund-Hansen - Gasto Sólido Total (E-H)

Este método calcula la tasa volumétrica del gasto sólido total [m²/s] de acuerdo a lo siguiente:

$$Q_{t,c} = \frac{0.05 u^5}{(s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3}$$

donde:

u	:	Velocidad media en la vertical [m/s]
s	:	Densidad relativa sedimento-fluido
g	:	Aceleración de gravedad [m/s ²]
d ₅₀	:	Diámetro para el cual pasa un 50% del sedimento [m]
C	:	Coefficiente de Chezy total [m ^{0.5} /s]

3. APLICACION A LA DESEMBOCADURA DEL RIO AYSÉN EN PUERTO AYSÉN

Para observar el funcionamiento del modelo implementado, se efectuó una aplicación a un caso que cuenta con la información de entrada requerida. Se eligió el estudio denominado «Estudio Fluvial y Marítimo Río Aysén» encargado al INH por la Dirección de Obras Portuarias del MOP. La planta de la zona en estudio se presenta en Fig N°1. Su objetivo, considerando los problemas de embancamiento

que ha venido sufriendo el último sector y desembocadura de este río, es disponer de antecedentes básicos que permitan definir localizaciones de facilidades portuarias y track de navegación, identificando restricciones en cuanto a calado y desplazamiento de las embarcaciones potencialmente usuarias de rampas y atracaderos. Considerando estos objetivos, cuantificar en forma correcta la evolución morfológica del cauce es de vital importancia, lo que justifica utilizar técnicas de modelación como las que se presentan, además de investigar el grado de sensibilidad, en los cambios morfológicos, de las metodologías más usuales para el cálculo de gasto sólido.

3.1. PROBLEMATICA DE LA DESEMBOCADURA DEL RIO AYSÉN.

El Río Aysén, XI Región del país desemboca en el fiordo del mismo nombre, que se interna en el continente por más de 60 km. El Río Aysén fue navegable hasta la década del 1940. La carta SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) de 1950 avala esta afirmación presentando sondas de profundidad mayores a 5 m para el río. El origen de la sedimentación acelerada que experimentó el río en la zona próxima a la desembocadura, se le atribuye a la deforestación de la cuenca generada por los colonos durante la década de 1940. En esta época, con el objeto de generar zonas despejadas, los colonos provocaron grandes incendios de bosques, incendios incontrolados que durante años devastaron la cuenca y cuyos efectos aún se pueden apreciar a simple vista.

Hasta alrededor de 1940, Puerto Aysén fue un importante puerto, con atracaderos para grandes embarcaciones en la ciudad cerca de la actual Rampa Hospital y en una localidad vecina ubicada a unos 1.500 m aguas abajo de la ciudad, llamada Puerto Piedras. Puerto Aysén en la actualidad es sólo un puerto de fondeo ya que Puerto Chacabuco y Puerto Aguirre satisfacen las necesidades de embarque de la zona. Según la autoridad marítima de la zona las embarcaciones registradas en Puerto Chacabuco son alrededor de 1116. Debido al bajo calado del track de navegación existente en la desembocadura del río Aysén, a la fecha sólo pueden operar en él alrededor de 50 embarcaciones tipo lanchas de 1.5 a 2.0 m de calado y 20 m de eslora y barcasas de las mismas características, con una frecuencia diaria del orden de 15.

3.2. ANTECEDENTES FLUVIO-MARITIMOS

El régimen de mareas de la zona es de características mixtas, con dos pleas y dos bajas en el día. Presenta valores de hasta 3.10 m de amplitud y su influencia en el estuario alcanza hasta el puente carretero que une Puerto Aysén con Puerto Chacabuco. La influencia de las mareas no origina, generalmente, cambios en el sentido del escurrimiento, sólo en situaciones excepcionales de buen tiempo se presenta esta situación.

En relación a las alturas de olas en la desembocadura, los antecedentes recopilados y la inspección practicada, indican valores inferiores a los 2 m de amplitud. Este valor relativamente bajo para los valores usuales en Chile, se debe a la condición de mar interior que se presenta en el fiordo.

3.3. ANTECEDENTES DE TERRENO

Entre los días 4 al 12 de Noviembre de 1994, se llevó a cabo una Misión Hidrográfica al lugar. La zona levantada estuvo comprendida, desde la Desembocadura del Río Aysén hasta la llamada Isla Solitaria. Los trabajos realizados fueron: Topografías, Batimetrías, Medición de Niveles y Tomas de muestras superficiales del fondo.

a) Topografía de Riberas y Orillas de Playa

Estas zonas muestran un gran embancamiento, que respecto a orillas levantadas en épocas anteriores establecidas en cartas del SHOA, han sufrido grandes variaciones. En ambos lados de la desembocadura del río y especialmente en su lado Norte se observa, en baja marea, grandes playas de mínimas pendientes que se prolongan por cientos de metros al interior del mar. Ya bastante lejos de la costa estas playas caen bruscamente a grandes profundidades, como también ocurre con el canal de salida existente, en dirección a las Islas Partida y Carmen.

Las riberas del río son todas del mismo tipo, tierra con gran cantidad de pasto; vegas que al subir la marea quedan sumergidas entre aguas, lo que hace que sea un terreno de poca consistencia y muy fácil de debilitarse, producto del oleaje que se forma por el fuerte viento imperante en la zona y además por el constante movimiento de embarcaciones, como ser lanchas y especialmente el tránsito de barcas. Principalmente son estas últimas las que forman una ola residual excesivamente grande, con el consiguiente golpe de ola sobre la ribera. A consecuencia de lo anterior se producen desplazamientos de gran cantidad de material, planchones de pasto con tierra hacia el fondo del canal, proceso que aumenta en forma progresiva el ancho del río.

b) Hidrografía

Los fondos obtenidos con el levantamiento hidrográfico realizado, muestran a lo largo del sector levantado y en la zona de la desembocadura que los veriles frente al Faro suben bruscamente de 3.0 a 1.8 m de profundidad, existiendo un gran embanque. Hacia aguas arriba en el río mismo, las menores profundidades del track de navegación están ubicadas frente a la Entrada Falsa con valores

a los 2.5 m de profundidad. Más arriba las profundidades son mayores, entre 4 y 6 m.

c) Mediciones de Niveles

Las lecturas de las observaciones de niveles se efectuaron en tres puntos del río. (Desembocadura, Estación H y Puerto Piedra)

d) Muestras Superficiales del Fondo

Con el fin de conocer en toda la zona en estudio la granulometría del fondo del canal y su proyección al mar, se tomaron 21 muestras superficiales del fondo del río, las cuales después de un análisis en laboratorio dieron los resultados de curvas granulométricas que se muestran en la Fig. N° 2.

3.4. HIDROLOGIA

La cuenca del Río Aysén dispone de estaciones fluviométricas y pluviométricas. Las estadísticas de las primeras no son muy extensas en consecuencia, fue necesario determinar los hidrogramas de crecidas, mediante un procedimiento indirecto basado en la información pluviométrica.

Los antecedentes hidrológicos se consiguieron en la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, y en la Oficina Meteorológica de la Fuerza Aérea, siendo los ríos Simpson, Mañihuales y Blanco los más importantes de la cuenca.

A los hidrogramas de los caudales calculados mediante un modelo precipitación-escorrentía, se le sumó como caudal base el caudal medio anual de la Cuenca, valor que se estimó en 600 m³/s.

Las tormentas mayoritariamente concordantes con la estadística de los caudales ajustados, corresponden a lluvias del Grupo 3 (grupo que presenta la máxima intensidad de lluvia en el 3er cuarto de la duración de la tormenta), con una probabilidad del 90%. El tiempo al caudal máximo es de 27.5 h. La estadística de caudales, Qest, se obtuvo de 4 estaciones fluviométricas, ajustádoles una distribución de valores extremos del Tipo I (Gumbel), determinando los parámetros del modelo por el Método de Máxima Verosimilitud. En la Tabla N° 1 se resume los caudales máximos calculados utilizando los datos pluviométricos y los fluviométricos para los períodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.

TABLA N° 1
Cuenca Río Aysén - Caudales Máximos Instantáneos

Período de Retorno (años)	Hidrograma Calculado		Q _{máx} Estadística (m ³ /s)	Razón Q _{Est} /Q _{peak}
	Q _{peak} (m ³ /s)	T _{máx} (h)		
100	9450	27.5	9902	1.048
50	8681	27.5	8914	1.027
20	7719	27.5	7595	0.984
10	6821	27.5	6536	0.958

3.5. MODELACION DEL FUNCIONAMIENTO DE LA DESEMBOCADURA EN CRECIDAS

Para esta fase de la investigación, la condición de borde inferior, mareas, fue representada por un nivel del mar fijo, ubicado a la cota +1.55 m NRS que corresponde al nivel medio del mar en la zona. Como condición de borde superior se utilizó gastos líquidos variables, correspondiente a un hidrograma de crecida de 50 años de período de recurrencia, con caudal peak igual a 8.681 m³/s y sus correspondientes gastos sólidos calculados por las metodologías a analizar y que corresponden a Meyer Peter Müller (M-PyM), Engelund Hansen (E-H), Van Rijn Acarreo de Fondo (V-R-F) y Van Rijn Total (V-R-T). La Figura N°3 presenta el hidrograma de crecida utilizado y los sedimentogramas para los arrastres de fondo de M-PyM y V-R F.

La composición del fondo fue caracterizada con la información granulométrica de terreno, curva media Fig N° 2, de acuerdo a lo siguiente: $d_{50}=0.55$ mm, $d_{90}=5.0$ mm y $\sigma_g=3.0$. Se consideró una rugosidad global de Manning de 0.021 para la zona central del cauce y 0.031 para los bordes.

Se modeló un tramo de 4,0 Km de río con perfiles transversales cada 100 m ($\Delta=100$ m), con Δt variable (0.5 y 0.05 horas), dependiendo de la metodología de gasto sólido utilizada. Se efectuaron cálculos con gastos constante de 25 horas de duración y con gasto variable (hidrograma) con duración total de 60 horas. Finalmente, se consideraron cálculos para 3 y 5 tubos de corrientes.

Como condición inicial de cálculo se utilizó el eje hidráulico obtenido mediante un cálculo preliminar en régimen permanente.

4. RESULTADOS

Como resultados de la modelación sólo se presentan los cambios morfológicos de los perfiles. Del total de perfiles (40) se presenta el perfil N°16 y N° 35, debido a que en éstos se aprecian con mayor intensidad los cambios en la morfología.

En las Figuras N° 4 y 5, se contrasta para el arrastre de fondo (M-PyM y V-R F) con gasto constante, la forma alcanzada por los perfiles, al término de las horas 10 y 25. Se puede observar cambios del fondo de forma similar, siendo más intensos los determinados por Van Rijn. Del mismo modo en las Figuras N° 6 y 7, se contrasta para el arrastre de fondo (M-PyM y V-R F) e hidrograma, la forma alcanzada por los perfiles al término de las horas 30 y 60. Al igual que en el caso anterior, se puede observar formas similares para los cambios del fondo, siendo más intensos los determinados por Van Rijn.

Las Figuras N° 8 y 9 presentan la morfología calculada con Van Rijn, considerando arrastre de fondo e hidrograma, para 3 y 5 tubos de corriente respectivamente, para las horas 30 y 60. Se aprecian, para la zona más activa, erosiones diferenciales mayores cuando se utilizan 5 tubos.

Las Figuras N° 10 y 11 presentan para M-PyM, en forma comparativa, los estados parciales obtenidos con un caudal constante y el estado final calculado con hidrograma. Se puede apreciar que para cada perfil es diferente el tiempo en que la socavación obtenida con el caudal constante alcanza valores similares a la socavación final producto del hidrograma.

En las Figuras N° 12 y 13 se contrastan las evoluciones calculadas para Van Rijn considerando arrastre de fondo y total. Se observan socavaciones bastante más intensas cuando se considera gastos totales. Finalmente, las Figuras N° 14 y 15 presentan, en forma comparativa, los fondos obtenidos utilizando arrastre total (V-R T y E-H). Se aprecian cambios morfológicos bastante distintos y socavaciones mucho mayores con E-H.

5. CONCLUSIONES

La aplicación efectuada al Río Aysén en su desembocadura permitió hacer un análisis de sensibilidad a los principales factores que afectan la evolución morfológica del modelo cuasi-bidimensional desarrollado con anterioridad.

La aplicación efectuada para gastos de crecida ($T_r=50$ años) determinó la fuerte dependencia del tipo y método de gasto sólido utilizado. Los resultados indicaron la importancia que adquiere el transporte sólido en suspensión en los procesos estuariales, que al superar en órdenes de magnitud el transporte sólido por arrastre, genera los mayores cambios morfológicos.

La fórmula de Van-Rijn, en sus dos formas, entregó resultados acordes a lo esperado, además su resolución numérica presentó ventajas de estabilidad numérica. La fórmula de Engelund-Hansen al no presentar un valor crítico para el inicio del arrastre sobreestima los valores del transporte para bajas velocidades. Además esta fórmula, al depender en alto grado de la velocidad, dificulta la convergencia numérica del balance sedimentológico y genera cambios morfológicos distintos a los esperados.

Con respecto a los resultados obtenidos, estos deben considerarse aplicables en forma estricta a las condiciones particulares de la investigación realizada y las tendencias mostradas son comparables sólo en términos relativos.

En relación a la utilización de gasto constante versus hidrograma, se advierte la conveniencia, con el objeto de no sobreestimar los procesos morfológicos, el uso de esta última representación.

Finalmente se concluye que el análisis con un mayor número de tubos de flujo permite, con cualquier metodología una definición más precisa de la morfología.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo forma parte del proyecto de investigación del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, FONDECYT 1950894, denominado «Comprobación Experimental de la Modelación Numérica Cuasi Bidimensional» y contó con el apoyo del Instituto Nacional de Hidráulica, entidades a las que los autores le expresan sus agradecimientos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.) Domínguez, B., Estellé, L., Cortez, R. (1992) Modelo Numérico Simplificado para el Flujo en Pequeños Estuarios. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 8-12 Septiembre, Cartagena, Colombia.
- 2.) Domínguez, B., Estellé, L., Cortez, R. (1994) Flow and Sediment Bed Load Analysis in Estuaries. 2da International Conference on Hydraulic Modelling, Publication 11 BHR Group Conference Series, Edited by A.J. Saul June, Stratford-upon-Avon, UK, pp 537-550.
- 3.) Domínguez, B., Estellé, L., Cortez, R. (1994) Modelo Numérico Cuasi-Bidimensional para Simular el Esguerramiento en Pequeños Estuarios. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 7-11 Noviembre, Santiago, Chile.
- 4.) Domínguez, B., Estellé, L., Cortez, R. (1994) Caracterización Numérica del Arrastre y Variación del Lecho en Estuarios en Flujos en Crecidas. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 7-11 Noviembre, Santiago, Chile.
- 5.) Van Rijn L. C. (1993) Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications. Netherlands.

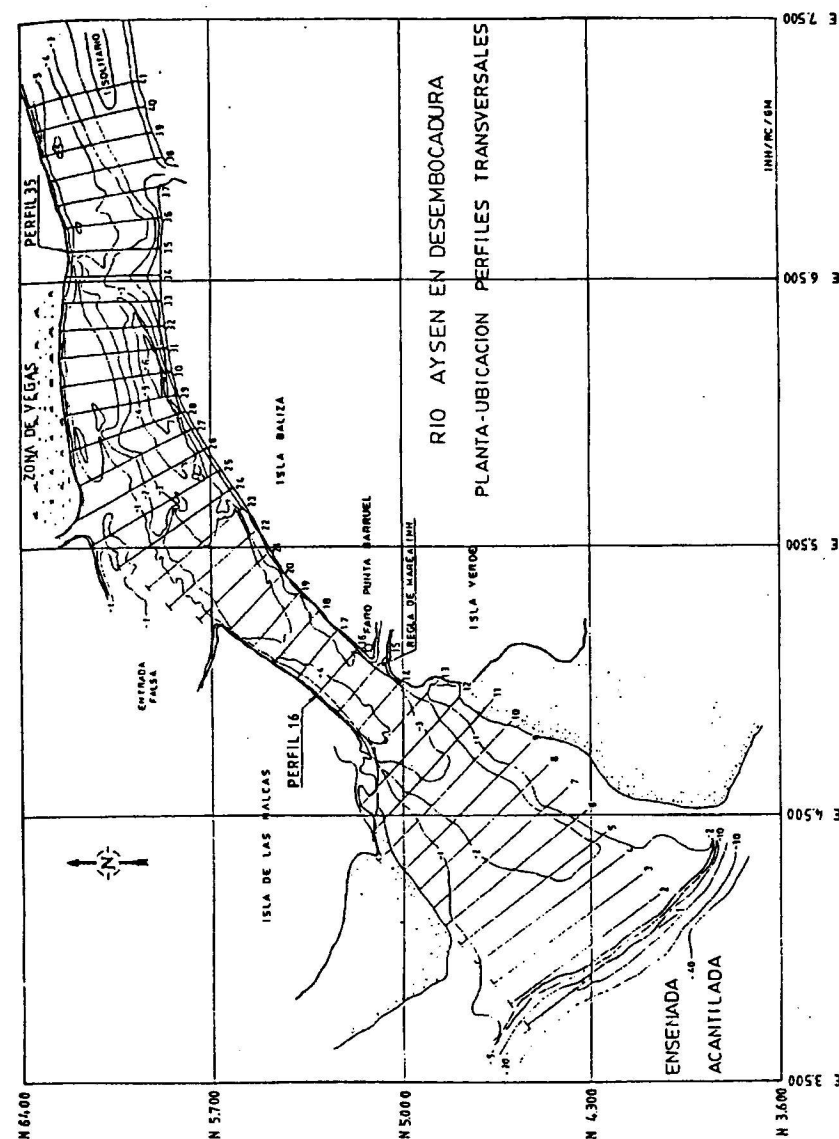


FIGURA N° 1

Figura N° 1

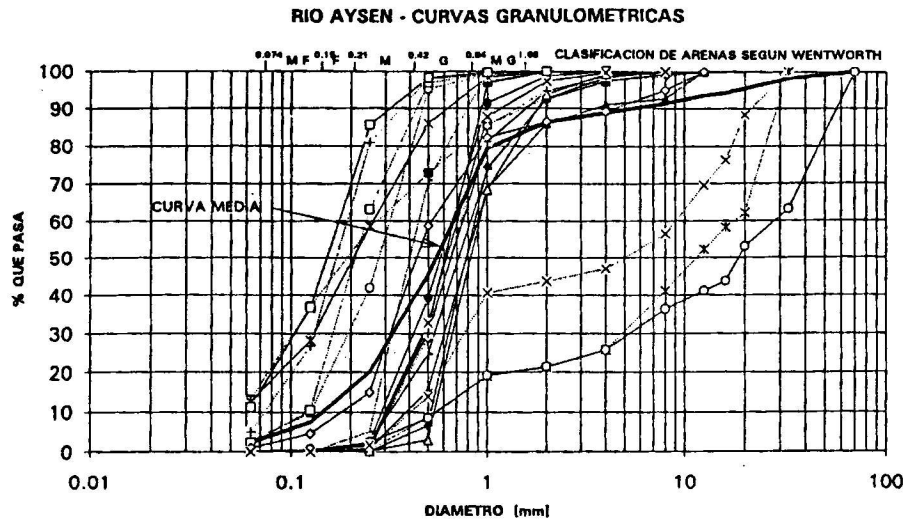


Figura N° 2

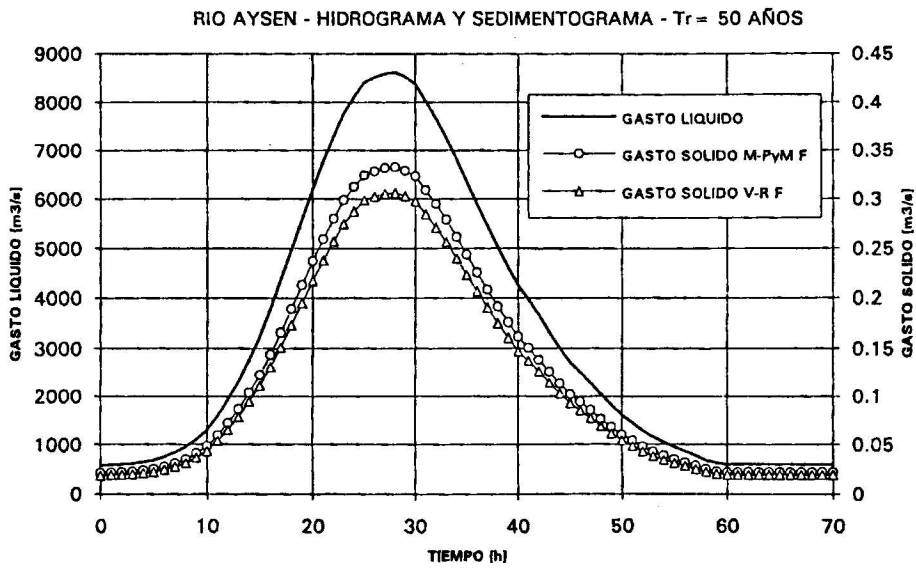


Figura N° 3

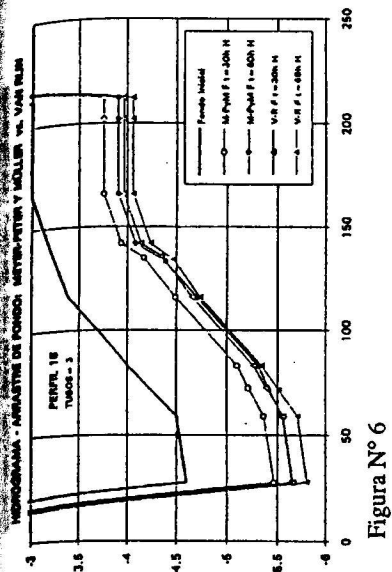


Figura N° 6

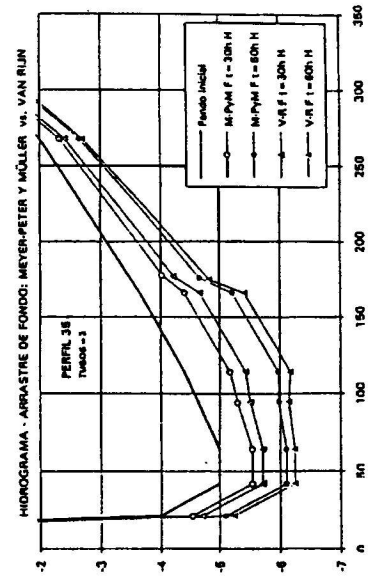


Figura N° 7

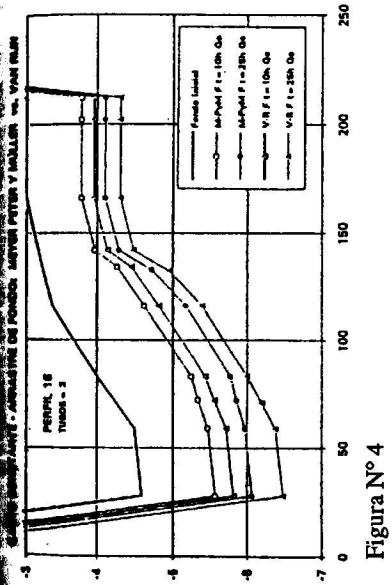


Figura N° 4

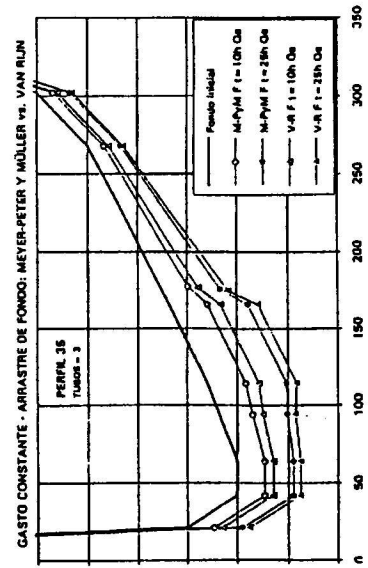


Figura N° 5

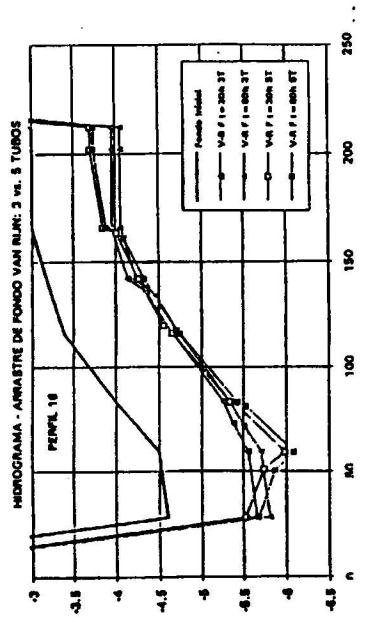


Figura N° 8

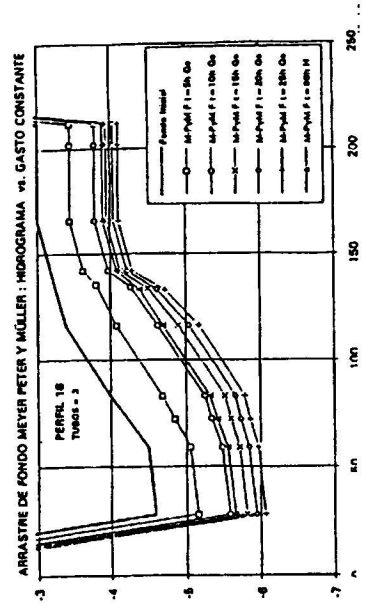


Figura N° 10

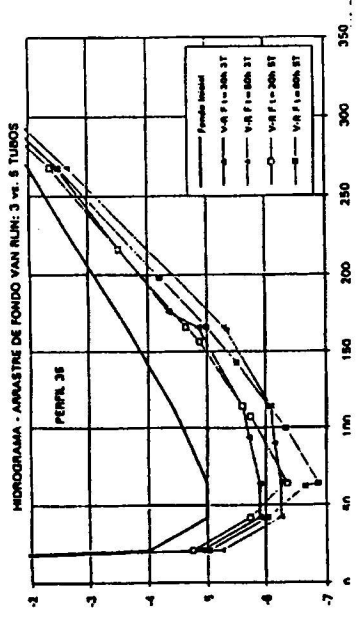


Figura N° 9

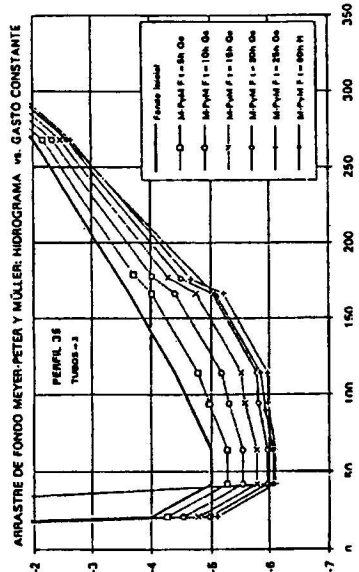


Figura N° 11

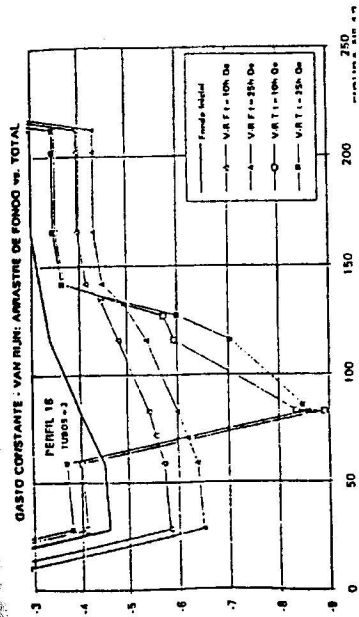


Figura N° 12

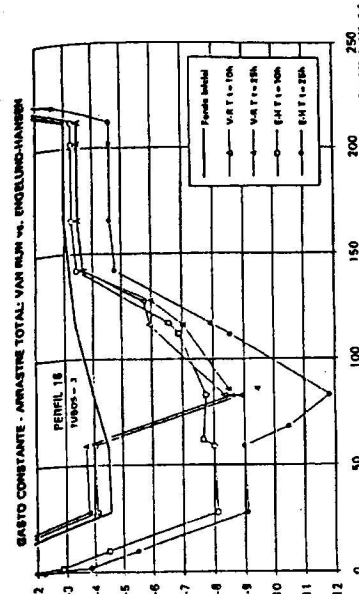


Figura N° 14

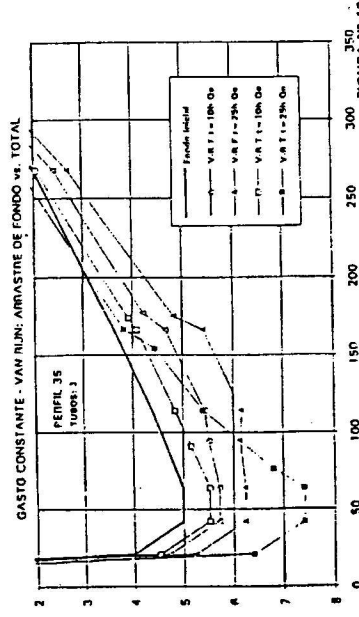


Figura N° 13

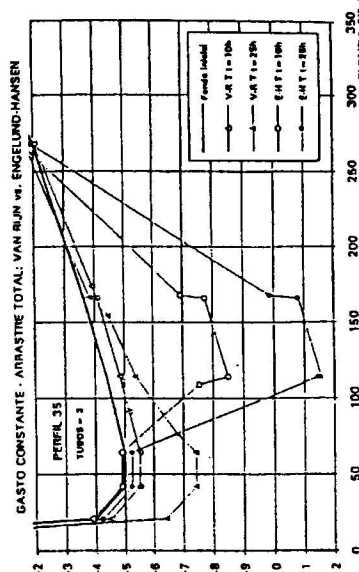


Figura N° 15