

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCIÓN DE POST-GRADO**



**EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERIA HIDRAULICA**

Ing. ELSA VICTORIA MINAYA ESPINOZA

LIMA – PERU

2005

**EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO
A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI**

Ing. ELSA VICTORIA MINAYA ESPINOZA

Presentado a la sección de post-Grado de la Facultad de Ingeniería Civil en cumplimiento
parcial de los requerimientos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA HIDRÁULICA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Marzo de 2005

© 2005, Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados

Autor:

ELSA VICTORIA MINAYA ESPINOZA

Facultad de Ingeniería Civil

Marzo de 2005

Recomendado por:

Dr. Julio Kuroiwa Zevallos

Profesor de Post-Grado

Asesor de Tesis

Aceptado por:

Dr. Jorge Alva Hurtado

Jefe de la Sección de Post-Grado

Tú eres mi Amigo

Amigo porque compartes con tus palabras y tu elocuente silencio.

Amigo porque siempre tienes una mirada comprensiva y llena de ternura donde me reflejo.

Amigo porque escuchas atento cuando hablo y nunca cuentas el tiempo.

Amigo porque corriges mis errores con respeto y no hieres mis sentimientos.

Amigo porque gozas conmigo el triunfo y lloras si vez mi fracaso.

Amigo porque no vacilas ni un instante en hacerte presente si te necesito.

Amigo porque conoces en profundidad mis valores y sabes promoverlos.

Amigo porque confías en mi lealtad sin temor a que te defraude.

Amigo porque deseas mi libertad, abres puertas y ventanas en mi camino.

Amigo porque con una chispa de luz logras disipar las tinieblas de mi espíritu.

Amigo porque a diario me ofreces tu mano sincera.

Amigo porque me enseñas a descubrir que la vida sin amor no tiene sentido.

¡Gracias DIOS!

Anónimo

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Julio Kuroiwa Zevallos por el asesoramiento y mejor disposición para el desarrollo de este tema de investigación. Así también por la amistad que me brinda.

Al Ing. Francisco Coronado del Aguila, ex-Director del Laboratorio Nacional de Hidráulica, quién permitió hiciera uso de las instalaciones del mismo para el desarrollo del modelo físico de mi investigación, también por sus consejos y críticas constructivas que me permitieron entender y mejorar el estudio. Así mismo, al personal Técnico y Administrativo de dicha institución, por su apoyo en la etapa constructiva y de pruebas.

Al Dr. Carlos Zavala Toledo, ex-Director del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil. U.N.I.; por el apoyo financiero para el desarrollo de la investigación y como persona por brindarme su amistad y ser un excelente profesional.

A la Comisión Nacional de Ciencias y Tecnología (CONCYTEC) por el apoyo económico brindado al desarrollo de mi investigación y por promover ésta en el Perú.

Al Ing. Wilfredo Gutiérrez L., Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil – U.N.I., quién me facilitó la ejecución de las pruebas de la especialidad.

A los Ing. Petronila Ibáñez, Américo Rosas y Miguel Zubiaur por apoyarme con su experiencia en el desarrollo del modelo físico, para lograr un mejor trabajo en mi investigación.

A mis profesores de la Sección de Postgrado por sus enseñanzas y palabras de aliento para estar siempre aprendiendo en esta rama de la ingeniería hidráulica y en general de la ingeniería civil. Así mismo a la Sra. Marisol y José Luis por su apoyo en las coordinaciones de la investigación y por su amistad.

A mis profesores, compañeros y amigos del Departamento de Hidráulica e Hidrología de la Facultad de Ingeniería Civil – U.N.I., en particular al Ing. Alfredo Mansen V., Jefe del Departamento por brindarme su confianza y amistad.

La AMISTAD, es un gran tesoro que se debe cuidar y agradecer a Dios por permitir conocerlo y tenerlo, por ello, Dalia, Belí, Susana, Yowana, María, Charo, Hilda, Blanca, Corín, Lidia, Flor, Miriam, Liz, Ada, Paty, Mario, Jaime y Jorge, les agradezco y reconozco en ustedes esa amistad que me brindaron en los momentos que yo necesitaba de un amigo. Se que cuento con ustedes en las buenas y en las malas.

A los Bachilleres Yesenia y Juan por su apoyo en la etapa del desarrollo e investigación del modelo físico. Así mismo, a José por el apoyo en la culminación de la elaboración de las láminas, a Ever por el apoyo en todo el proceso de edición del estudio y a todas aquellas personas que de algún modo u otro me apoyaron con sus palabras de aliento para terminar este trabajo.

Elsa V. Minaya Espinoza

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A DIOS, gracias a EL, estoy aquí.

A mis padres, Elsa y José, quienes sembraron y cultivaron en mi las mejores semillas para saber desarrollarme como ser humano espiritual y profesional. Gracias padres.

A mis hermanas y hermanos quienes con su ejemplo, palabras y apoyo me permiten avanzar. A mis cuñados, cuñadas, sobrinas y sobrinos quienes me brindan su amistad y apoyo espiritual en cada actividad que inicio.

Elsa

RESUMEN

La mayoría de los estudios acerca del proceso de erosión en suelos no cohesivos debido al impacto de un chorro, a la salida de un vertedero de una presa, en el lecho del cuenco son empíricos, debido a la complejidad de los procesos físicos involucrados en este fenómeno.

En el presente estudio se ha utilizado un modelo físico consistente en un chorro de agua que sale de un vertedero en rápida con una estructura terminal tipo salto de ski (el ángulo de despegue del ski es de 35°), que impacta en un cuenco conformado con material no cohesivo. El área del modelo físico fue de 10 m de largo por 5 m de ancho. La profundidad máxima de erosión (h_s) en el área de impacto ha sido estimada teniendo en cuenta los siguientes parámetros: la altura H , diferencia entre el nivel de agua del reservorio y el nivel del colchón de agua en el cuenco; el ángulo de incidencia (θ_i) que hace el eje del chorro en el momento del impacto con el eje horizontal; la descarga (q) por unidad de longitud del chorro (0.033, 0.0667, 0.1 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$); d_{50} y d_{85} , el diámetro representativo de las partículas usadas en cada prueba, arena gruesa: $d_{50} = 1.60$ mm, $d_{85} = 4.81$ mm; grava media: $d_{50} = 17.88$ mm, $d_{85} = 23.43$ mm; y canto rodado: $d_{50} = 49.08$ mm, $d_{85} = 70.53$ mm; y la profundidad del colchón de agua (h_{CA}): 0.05 m, 0.10 m, 0.25 m y 0.50 m.

La relación funcional entre las variables del fluido, flujo y material del lecho ha sido obtenida con la aplicación del análisis adimensional (Teorema Pi de Buckingham), posteriormente se hizo un análisis lineal de regresión múltiple, esto permitió definir la relación matemática que permitirá predecir la profundidad de erosión máxima.

El estudio ha determinado que las variables que afectan más sensiblemente el proceso de erosión son: la gradación del material (d_{85}/d_{50}), la energía potencial (z), la descarga o caudal unitario (q), densidad relativa o gravedad específica (G) considerada en el parámetro de iniciación de movimiento de una partícula, la energía del chorro al incidir con el colchón de agua expresada por el número de Froude ($V_i/(gy_i)^{0.5}$), la longitud de desarrollo que genera el chorro dentro del

colchón de agua ($h_{CA}/\text{sen}\theta_i$) considerando así la altura de éste y finalmente la carga total (H).

La ecuación obtenida del análisis anterior fue validada con los valores medidos por tres investigadores, tales como: Hallmark (1955), Lencastre (1961) y Thomas (1953), los resultados fueron relativamente óptimos ya que se tuvo un coeficiente de correlación R^2 de 0.70, 0.78 y 89, respectivamente. Así mismo, se compararon los valores medidos de la investigación con los valores calculados, en base a los datos de este estudio, por las relaciones matemáticas de otros investigadores como, Martins (1975), Veronese (1937), Veronese – Yildiz (1994), Mason – Arumugan (1985), Okyay (1973) y Kuroiwa (1998). Los resultados obtenidos explicaron que la diferencia que se obtiene se debe al tipo de variables que cada investigador considera como importante en el proceso de erosión y también al tipo de estructura de salida de una presa, modelado, en el caso de Martins, Okyay y Kuroiwa, fueron chorro inclinados o en caída libre, mientras que los restantes utilizaron vertederos con deflectores tipo salto de ski.

Los resultados obtenidos justifican uno de los objetivos de la investigación, demostrar que el tamaño de la partícula y la profundidad del colchón de agua son importantes considerar en este tipo de análisis de erosión. Es con el material mas fino (arena) y la menor profundidad de colchón de agua (0.05 m) que se obtiene la mayor profundidad de erosión, mientras que con los materiales mas gruesos (grava y canto) y mayor colchón de agua (0.50 m) se obtiene erosión nula. Así mismo, se ha realizado un análisis preliminar para determinar un límite de la profundidad de colchón de agua que hace cero la profundidad de erosión. Es necesario complementar este análisis con la ejecución de más pruebas, en las que el intervalo de la variable profundidad de colchón de agua sea más pequeño. Durante el desarrollo de esta investigación complementaria, también se podría analizar la influencia del parámetro adimensional de disipación de energía en el colchón de agua ($H/h_{CA}/\text{sen}\theta_i$), de modo de precisar su índice exponencial presentado en la ecuación (6.1) de este estudio.

ABSTRACT

Most of the studies related to scour in non-cohesive soils due to the impact of a jet spillway released by a ski jump, are empirical because of the complexity of the physical processes involved. A physical model consisting of a spillway with a ski jump at the end (angle of 35°) and a stilling pool is used. The physical model was 10 m. long and 5 m wide. The maximum scour depth (h_s) in the location of jet impact is estimated using different parameters such as: H : difference between the water level at the reservoir level; θ_i : the angle of attack (measured from the x-axis) that the jet forms in the stilling pool, q : the discharge per length, 0.033, 0.0667 and 0.01 m³/s/m; d_{50} and d_{85} : the representative sediment diameter used in the experiments, thick sand: $d_{50} = 1.60$ mm, $d_{85} = 4.81$ mm, medium gravel: $d_{50} = 17.88$ mm, $d_{85} = 23.43$ mm, and medium stone: $d_{50} = 49.08$ mm, $d_{85} = 70.53$ mm, and the tailwater level (h_{CA}): 0.05 m, 0.10m, 0.25m and 0.50 m.

A dimensional analysis (Pi Buckingham theorem) and linear multiple regressions are performed to obtain a mathematical equation that predicts the final scour depth considering the functional relationship between the fluid, flow and bed particles.

This investigation showed that certain parameters greatly affect the process, such as: soil of gradation (d_{85}/d_{50}), the potential energy (z) of the jet at the exit of the ski jump, the relative density or specific gravity (G) considered in the parameter of the movement threshold of a particle, the jet energy when impinging the tailwater expressed by the Froude number ($Vi/(g yi)^{0.5}$), the development length generated by the jet in the tailwater ($h_{CA}/\sin\theta_i$); that way we consider its depth and the total head (H).

The equation obtained from the previous analyses was supported by the results obtained by different researchers such as: Hallmark (1955), Lencastre (1961) and Thomas (1953). The results in these cases were relatively optimistic because of a correlation coefficient R^2 out of 0.70, 0.78 and 89. Similarly, the measured outputs of the investigation were compared with the calculated outputs, according to the data of this study, stated by the mathematical relations stated by such other researchers like Martins (1975), Veronese (1937), Veronese-Yildiz (1994), Mason

& Arumugan (1985), Okyay (1973) and Kuroiwa (1998). The results obtained were useful to explain that the differences in results are caused by the kind of variable considered by each researcher to be the most important part in the scour process, and also the kind of issuance section of the dam, modeled in the cases of Martins, Okyay and Kuroiwa, according to free falling jets with deflection, while the others used spillways with a ski jump at the end.

The results support one of the objectives of the investigation. They showed that particle size and depth of the tailwater are important in this kind of scour analysis. By using a thinner material (sand) and a shallower tailwater depth (0.05 m) a greater scour depth was obtained, whereas by using thicker materials (gravel and round rock) and a bigger tailwater (0.50 m) scour is null. Also, a preliminary analysis has been conducted to determine a limit on the depth of the tailwater which causes no scour. It is necessary to complete this analysis with the execution of further tests where the period of the deepness variable of the tailwater would be smaller.

It is necessary to conduct additional experiments to study the influence of a dimensionless parameter of energy dissipation in the tailwater ($H/h_{CA}/\sin\theta_i$) so that a more realistic exponent can be obtained in Equation (6.1) .

INDICE

	Página
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 2 ANTECEDENTES.....	4
2.1 Teoría de Chorro	4
2.1.1 Esquema de un chorro plano libre	4
2.1.2 Chorro circular de flujo radial	6
2.2 Fluctuación de la presión inducida por el impacto de un chorro	8
2.3 Estructuras terminales	11
2.3.1 Trampolín o salto de ski	11
2.4 Estudios experimentales de erosión debido al impacto de un chorro en materiales no cohesivos	14
CAPITULO 3. CONSIDERACIONES TEORICAS.....	27
3.1 El Proceso de erosión	27
3.2 Cinemática de la trayectoria del chorro	30
3.3 Influencia de la Carga Total y de la Longitud del Chorro en la energía del Chorro	34
3.4 Mecanismo de disipación de la turbulencia del chorro en el colchón de agua.....	35
3.5 Iniciación de movimiento de la partícula	38
3.6 Análisis adimensional - formulación general	41
CAPITULO 4 CONSTRUCCION DEL MODELO, DESCRIPCION DEL EQUIPO Y DESARROLLO DE LAS FASES DE PRUEBAS.....	47
4.1 Construcción del modelo	47
4.1.1 Planeamiento y diseño	47
4.1.2 Representación de la estructura del prototipo	48
4.1.3 Instalaciones auxiliares	52
4.1.4 Detalles del proceso constructivo	52
4.2 Equipo para la adquisición de datos y desarrollo de las pruebas	54

6.6 Predicción de la profundidad de erosión	91
6.7 Prueba de validación de la ecuación para la predicción de la profundidad de erosión	93
6.8 Comparación de los resultados medidos con los calculados aplicando fórmulas de profundidad de erosión	95
CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
7.1 Conclusiones	102
7.2 Recomendaciones	104
REFERENCIAS	105
ANEXOS:	
ANEXO A Láminas del Modelo Hidráulico y estructura de la Rápida en Planta y Perfil.	
ANEXO B Datos de la Rápida y Trampolín tipo Ski.	
ANEXO C Datos recolectados en el proceso de erosión y Análisis de Regresión.	
ANEXO D Datos de velocidades en el Cuenco.	
ANEXO E Análisis del Tiempo vs Profundidad de Erosión.	
ANEXO F Granulometría de los Materiales.	
ANEXO G Resultados del Proceso de Erosión. Geometría de la poza de erosión	
ANEXO H Prueba de validación de la ecuación (6.1) de la presente investigación con la ecuación de Hallmark, Lencastre y Tho- mas. Cálculo de los valores de profundidad de erosión h_s , con los datos de la investigación y las ecuaciones de Martins, Veronese, Veronese – Yildiz, Mason, Okyay y Kuroiwa.	
ANEXO I Fotos.	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1. Esquema de turbulencia de un chorro libre.
- Figura 2.2. Solución de Tollmien para la zona turbulenta de un chorro libre.
- Figura 2.3. Chorro de pared radial.
- Figura 2.4. Distribución de velocidad del chorro de pared radial.
- Figura 2.5. Distribución de velocidades del chorro esfuerzos de corte cerca de la pared.
- Figura 2.6. Trampolín o salto de ski.
- Figura 2.7. Variables de la trayectoria del chorro.
- Figura 2.8. Definición de regiones para un chorro que impacta en un suelo no cohesivo.
- Figura 3.1. Esquema del proceso de erosión.
- Figura 3.2. Distribución de las componentes de la trayectoria del chorro.
- Figura 3.3. Variables que intervienen en la deducción de la velocidad de incidencia (V_i).
- Figura 3.4. Volumen de Control
- Figura 3.5. Fuerzas que intervienen en la iniciación de movimiento de la partícula.
- Figura 3.6. Variables consideradas en el Análisis Adimensional.
- Figura 4.1. Colocación de bolas de colores en el cuenco.
- Figura 5.1. Esquema de toma de datos en la rápida.
- Figura 5.2. Esquema de colocación en planta de bolas de color en el cuenco.
- Figura 5.3. Esquema del Patrón de Flujo en el Cuenco.
- Figura 6.1abc. Variación del Colchón de agua vs Profundidad de erosión
- Figura 6.2.abc Extrapolación de la curva para determinar la profundidad máxima de colchón de agua (h_{CA}) para profundidades de erosión (h_s) nulas.
- Figura 6.3.abc Caudal unitario (q) vs Profundidad máxima de colchón de agua (h_{CA} máx.). Curva límite entre el proceso de No Erosión y Erosión para cada Fase.

- Figura 6.4 Curva de iniciación del Proceso de Erosión ($v_{T=20^{\circ}C}=1.01 \text{ E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$)
- Figura 6.5 a. Profundidad de erosión vs Tiempo para Colchón de agua = 0.05 m
- Figura 6.5 b. Profundidad de erosión vs Tiempo para Colchón de agua = 0.10 m
- Figura 6.5 c. Profundidad de erosión vs Tiempo para Colchón de agua = 0.25 m
- Figura 6.6. Variación entre la profundidad de erosión y el tamaño de la partícula
- Figura 6.7 Relación entre los valores medidos y pronosticados de h_s/y_i
- Figura 6.8 a. Valores medidos vs. Pronosticados de h_s con Hallmark A y ec. (6.1)
- Figura 6.8 b. Valores medidos vs. Pronosticados de h_s con Lencastre y ec. (6.1)
- Figura 6.8 c. Valores medidos vs. Pronosticados de h_s con Thomas I y ec. (6.1)
- Figura 6.9. Valores medidos en modelo de h_s (Fase I) vs valores calculados con las ecuaciones de Martins, Veronese y Veronese-Yildiz de h_s .
- Figura 6.10. Valores medidos en modelo de h_s (Fase II) vs valores calculados con las ecuaciones de Martins, Veronese y Veronese-Yildiz de h_s .
- Figura 6.11. Valores medidos en modelo de h_s (Fase III) vs valores calculados con las ecuaciones de Martins, Veronese y Veronese-Yildiz de h_s .
- Figura 6.12. Valores medidos en modelo de h_s vs valores calculados con la ecuación de Mason & Aramugan de h_s .
- Figura 6.13. Valores medidos en modelo de h_s vs valores calculados con la ecuación de Okyay de h_s .
- Figura 6.14. Valores medidos en modelo de h_s vs valores calculados con la ecuación de Kuroiwa de h_s .
- Figura F-0A. Granulometría de los Materiales de la Fase I.
- Figura F-0B. Granulometría de los Materiales de la Fase II.
- Figura F-0C. Granulometría de los Materiales de la Fase III.
- Figura F.1. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+120.
- Figura F.2. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y secciones transversales 0+120 - 0+150.
- Figura F.3. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y secciones transversales 0+120 - 0+150.

- Figura F.4. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+165.
- Figura F.5. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.6. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.7. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.8. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.9. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+150.
- Figura F.10. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+150.
- Figura F.11. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.12. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.13. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.14. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.15. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.16. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.
- Figura F.17. Fase III. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180.

LISTA DE LAMINAS

Lámina A-01	Planta del modelo físico.
Lámina A-02	Perfil en el eje de la rápida.
Lámina A-03	Perfil longitudinal de la rápida.
Lámina D-01	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina D-02	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina D-03	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina D-04	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,50m
Lámina D-05	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,50m
Lámina D-06	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,50m
Lámina D-07	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,02m ³ /s, C.A.:0,10m
Lámina D-08	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina D-09	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina D-10	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina D-11	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina D-12	Velocidades en el Cuenco, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-01-A	Fase I, Prueba 1, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-01-B	Fase I, Prueba 1, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,10m (Volumétrico)
Lámina G-02-A	Fase I, Prueba 2, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-02-B	Fase I, Prueba 2, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,25m (Volumétrico)
Lámina G-03	Fase I, Prueba 4, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-04-A	Fase I, Prueba 5, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-04-B	Fase I, Prueba 5, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,05m (Volumétrico)
Lámina G-05	Fase I, Prueba 6, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-06	Fase I, Prueba 7, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,25m

Lámina G-07	Fase I, Prueba 9, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-08-A	Fase I, Prueba 10, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-08-B	Fase I, Prueba 10, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m (Volumétrico)
Lámina G-09	Fase I, Prueba 11, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-10-A	Fase I, Prueba 12, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,50m
Lámina G-10-B	Fase I, Prueba 12, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,50m (Volumétrico)
Lámina G-11	Fase II, Prueba 1, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-12-A	Fase II, Prueba 2, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-12-B	Fase II, Prueba 2, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,10m (Volumétrico)
Lámina G-13-A	Fase II, Prueba 5, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-13-B	Fase II, Prueba 5, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,05m (Volumétrico)
Lámina G-14	Fase II, Prueba 6, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-15-A	Fase II, Prueba 8, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-15-B	Fase II, Prueba 8, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,25m (Volumétrico)
Lámina G-16	Fase II, Prueba 9, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-17-A	Fase II, Prueba 10, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-17-B	Fase II, Prueba 10, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m (Volumétrico)
Lámina G-18	Fase II, Prueba 11, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-19	Fase III, Prueba 1, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-20	Fase III, Prueba 2, Caudal:0,02m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-21	Fase III, Prueba 6, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-22	Fase III, Prueba 7, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-23	Fase III, Prueba 8, Caudal:0,04m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-24	Fase III, Prueba 9, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,05m
Lámina G-25	Fase III, Prueba 11, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,25m
Lámina G-26-A	Fase III, Prueba 12, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m
Lámina G-26-B	Fase III, Prueba 12, Caudal:0,06m ³ /s, h _{CA} :0,10m (Volumétrico)

LISTA DE CUADROS

- Cuadro 4.1 Caudales utilizados en las pruebas.
- Cuadro 4.2 Matriz de Pruebas.
- Cuadro 5.1 Características Físicas.
- Cuadro 6.1 Valores máximos del colchón de agua ($h_{CA}^{máx}$) para profundidades de erosión (h_s) nulas
- Cuadro 6.2 Resultados de la granulometría de la poza.
- Cuadro 6.3 Geometría de la poza de erosión.
- Cuadro 6.4 Valores de los parámetros de la ecuación (6.1).
- Cuadro 6.5 Fórmulas presentadas por otros investigadores sobre chorros en caída libre y a la salida de vertederos con terminal tipo trampolín o skí.
- Cuadro B.1 Velocidades en la Rápida registradas con Tubo de Pitot, $Q=0.02$ m³/s.
- Cuadro B.2 Velocidades en la Rápida registradas con Tubo de Pitot, $Q=0.04$ m³/s.
- Cuadro B.3 Velocidades en la Rápida registradas con Tubo de Pitot, $Q=0.06$ m³/s.
- Cuadro B.4 Datos del Chorro, Fase I.
- Cuadro B.5 Datos del Chorro, Fase II.
- Cuadro B.6 Datos del Chorro, Fase III.
- Cuadro B.7 Velocidades en el Labio del Ski registrados con el Tubo de Pitot. Fase I.
- Cuadro B.8 Velocidades en el Labio del Ski registrados con el Tubo de Pitot. Fase II.
- Cuadro B.9 Velocidades en el Labio del Ski registrados con el Tubo de Pitot. Fase III.
- Cuadro C.1 Datos usados en la Investigación.
- Cuadro C.2 Datos ordenados para calcular los parámetros estadísticos de la ecuación (6.1)
- Cuadro C.3 Valores Pronosticados de h_s/y_i usando la ec.6.1 y valores medidos de h_s/y_i .

- Cuadro C.4 Valores Pronosticados de h_s usando la ec.6.1 y valores medidos de h_s .
- Cuadro D.1 Velocidades Medias en el cuenco, Fase I.
- Cuadro D.2 Velocidades Medias en el cuenco, Fase II.
- Cuadro D.3 Velocidades Medias en el cuenco, Fase III.
- Cuadro E.1 Datos registrados de la profundidad de erosión en el tiempo, Fase I.
- Cuadro E.2 Datos registrados de la profundidad de erosión en el tiempo, Fase II.
- Cuadro E.3 Datos registrados de la profundidad de erosión en el tiempo, Fase III.
- Cuadro E.4 Datos para la relación de Tiempo acumulado(t_{ac}) vs. Profundidad erosión (h_p) para el caudal de 0.06 m³/s.
- Cuadro F.1 Fase I. Análisis Granulométrico del material de acorazamiento.
- Cuadro F.2 Fase II y III. Análisis Granulométrico del material de acorazamiento.
- Cuadro G.1 Altura de la profundidad de erosión al término de cada prueba.
- Cuadro H.1 Cálculo de h_s con datos de Hallmark A. (1955) y ecuación (6.1).
- Cuadro H.2 Cálculo de h_s con datos de Lencastre (1961) y ecuación (6.1).
- Cuadro H.3 Cálculo de h_s con datos de Thomas (1953) y ecuación (6.1).
- Cuadro H.4 Fase I. Valores de profundidad de erosión calculados con las ecuaciones de Martins (1975), Veronese (1937) y Veronese – Yildiz (1994).
- Cuadro H.5 Fase II. Valores de profundidad de erosión calculados con las ecuaciones de Martins (1975), Veronese (1937) y Veronese – Yildiz (1994).
- Cuadro H.6 Fase III. Valores de profundidad de erosión calculados con las ecuaciones de Martins (1975), Veronese (1937) y Veronese – Yildiz (1994).
- Cuadro H.7 Valores de profundidad de erosión calculados con la ecuación de P. J. Mason (1985).
- Cuadro H.8 Valores de profundidad de erosión calculados con la ecuación de Okyay (1973).
- Cuadro H.9 Valores de profundidad de erosión calculados con la ecuación (6.7) de J. Kuroiwa (1998).

LISTA DE SIMBOLOS

Los siguientes símbolos han sido usados en la investigación:

B	ancho del canal de la rápida (L)
H	diferencia entre el nivel de agua del reservorio y el nivel de agua del colchón de agua (L)
h_s	profundidad máxima de erosión (L)
h_{CA}	profundidad de colchón de agua (L)
d_{50}	diámetro nominal por el cual pasa el 50% del material (L)
d_{85}	diámetro nominal por el cual pasa el 85% del material (L)
g	aceleración de la gravedad (LT^{-2})
Q	descarga del agua (L^3T).
q	descarga unitaria ($L^3T^{-1}L^{-1}$)
y	tirante del chorro a la salida de la compuerta en el embalse (L)
y_o	tirante del chorro a la salida del salto de ski (L)
y_i	tirante del chorro en el momento del impacto con el colchón de agua (L)
V	velocidad del chorro a la salida de la compuerta en el embalse (LT^{-1})
V_o	velocidad del chorro a la salida del salto de ski (LT^{-1})
V_i	velocidad del chorro en el momento del impacto con el colchón de agua (LT^{-1})
z	distancia desde el nivel del colchón de agua al labio del salto de ski (L)

Alfabeto Griego:

ϕ	ángulo de reposo del material (grado)
ν	viscosidad cinemática del agua (L^2T^{-1})
θ_i	ángulo con el que el eje del chorro impacta en el colchón de agua (medido desde el eje X horizontal del nivel de agua) (grados)
θ_o	ángulo de despegue del salto de ski (grados)
ρ_w	densidad del agua (ML^{-3})
ρ_s	densidad del sólido (ML^{-3})

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La predicción de la forma y dimensiones del hoyo de erosión que se desarrolla aguas abajo de las estructuras hidráulicas juegan un papel importante en el diseño, puesto que puede afectar la cimentación de dichas estructuras; por lo que resulta indispensable predecir dicha erosión y en especial la profundidad máxima de socavación para minimizar los riesgos de falla.

Una de estas estructuras es un aliviadero en rápida con el denominado salto de ski, cuyo chorro impacta con altas velocidades que pueden alcanzar los 20 m/s, 35 m/s y aún mas, con gran capacidad de producir erosión, a menos que el suelo sobre el que yace la estructura sea lo suficientemente duro como para controlar está acción. En general la profundidad de erosión depende del momento de impacto del chorro, el tiempo de duración del flujo, de las características del suelo y de la profundidad de agua en la zona de impacto.

El objetivo principal de la presente investigación es el de buscar una expresión matemática basada en observaciones de laboratorio para predecir la profundidad máxima de erosión (h_s) en el área de impacto sobre un suelo cohesivo debido al chorro producido por la operación de un aliviadero en rápida con salto de ski, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: la altura H , diferencia de energía entre el nivel de agua del reservorio y el nivel del colchón de agua en el cuenco; la profundidad del colchón de agua (h_{CA}); el ángulo de ingreso (θ_i) que hace el eje del chorro en el momento del impacto con la horizontal; la descarga (q) por unidad de longitud del chorro, y el tamaño (d_i) de las partículas del suelo que conforman un lecho no cohesivo.

La investigación comprenderá el estudio del patrón de erosión producido por el chorro aguas abajo del vertedero, para determinar la geometría del hoyo de erosión.

La investigación se desarrolló en modelo físico. Se construyó un aliviadero en rápida con salto de ski; así mismo, su respectivo cuenco, observando la erosión sobre tres tipos de suelos: arena gruesa, grava media y en roca (canto).

En el *Capítulo 2 Antecedentes*, se presenta la información recopilada de la teoría de "Chorros" y de investigaciones realizadas sobre el tema de erosión en lechos no cohesivos debido al impacto de chorros verticales originados por la rotura de una presa y/o a la salida del vertedero de la misma; como también investigaciones correspondientes a chorros inclinados.

El *Capítulo 3 Consideraciones Teóricas*, explica inicialmente el proceso de erosión debido al impacto de un chorro en un lecho con un cierto colchón de agua, así también, criterios teóricos sobre la cinemática de la trayectoria y características del chorro, cantidad de movimiento en el mecanismo de disipación de la turbulencia del chorro en el colchón de agua, iniciación de movimiento de la partícula y finalmente la concepción del análisis adimensional de la presente investigación.

El *Capítulo 4 Construcción del Modelo*, descripción del equipo y desarrollo de las fases de prueba, explica el planteamiento y diseño del modelo, el cual consistió de una rápida con terminal en salto de ski y/o trampolín y el cuenco amortiguador; así también se muestra la matriz de pruebas bajo la cual se desarrollaron las 36 pruebas. Dichas pruebas consistieron de tres fases. El material utilizado en la Fase I fue arena gruesa con $d_{50} = 1,60$ mm, $d_{85} = 4.81$ mm y $d_{90} = 5,96$ mm, para la Fase II se utilizó la grava media con $d_{50} = 17,88$ mm, $d_{85} = 23.43$ mm y $d_{90} = 24,22$ mm la forma de la roca fue del tipo angulosa, y finalmente, para la Fase III fue roca con $d_{50} = 49,08$ mm, $d_{85} = 70.53$ mm y $d_{90} = 70,53$ mm, la forma de esta fue tipo redondeada, denominada boleó. Finalmente se hace una descripción general del modo como fueron desarrolladas cada una de las pruebas, indicando las condiciones iniciales, toma de datos durante el proceso y al final de la prueba.

En el *Capítulo 5 Datos Recolectados*, se describe el modo en que se obtuvieron cada uno de los datos. En la estructura de la rápida con su terminal en ski, se tomaron velocidades con el Tubo de Pitot; en el Chorro de agua, se midieron la longitud del salto, el ángulo de incidencia y la altura de la parábola; en el cuenco, el

patrón de flujo y las velocidades del flujo con sus respectivas orientaciones. Así mismo, se describen las características del material del lecho, como la ejecución de ensayos de Mecánica de Suelos realizados para caracterizar el material, obteniendo el d_{50} y d_{85} , y la gravedad específica para cada material. Finalmente, del proceso de erosión, datos como tiempo versus profundidad de erosión, la forma del hoyo de erosión, taludes aguas abajo y arriba y la ubicación de la profundidad máxima de erosión.

En el *Capítulo 6 Análisis y Discusión de los Resultados*, se presenta el análisis entre los datos obtenidos de las variables estudiadas y su comportamiento. Por ejemplo, se ha encontrado que la profundidad de erosión se incrementa al disminuir la altura del colchón de agua, respecto a esto, se ha hallado por un análisis de tendencia la altura de colchón de agua necesaria para que una determinada descarga no produzca erosión en el lecho del cuenco. Así también, la profundidad de erosión tiene un crecimiento logarítmico respecto al tiempo. Otra de las variables estudiadas es la relación entre el d_{50} y d_{85} como un parámetro indicativo de la distribución granulométrica del material y su influencia directa en la altura de la profundidad de erosión. Con las variables del fluido, flujo y material se realizó el Análisis Adimensional y se obtuvo la relación matemática que permitirá deducir profundidades de erosión bajo las condiciones de la presente investigación.

Finalmente en el *Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones*, se presentan las conclusiones a las cuales se ha llegado con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y se formulan las recomendaciones para la realización de estudios que continúen y/o profundicen la investigación sobre el tema.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

En el presente capítulo se presenta información sobre los chorros y sus tipos, y el desarrollo de un proceso de erosión en lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro inclinado.

2.1 Teoría de chorro

2.1.1 Esquema de un chorro plano libre.

Consideremos un chorro de agua saliendo del plano de un orificio de altura b_0 y entrando a una masa de agua sin movimiento. Esta acción produce una mezcla violenta y difusión del chorro que incorpora masa de agua impactada aumentando el espesor del chorro y disipación de su velocidad. En la figura 2.1 se puede apreciar una representación esquemática del chorro, conocida como el *plano de turbulencia de un chorro libre*. De acuerdo a observaciones experimentales se ha determinado la formación de dos regiones: la primera, la más cercana al orificio, se conoce comúnmente como la *región del flujo en desarrollo*, así la turbulencia penetra en dirección del eje central X , entonces al final de esta región se presenta la velocidad máxima que es igual a U_0 . Inmediatamente después del desarrollo de ésta, va la región denominada *flujo totalmente desarrollado*, la turbulencia ha penetrado en dirección axial y como resultado la velocidad máxima va disminuyendo.

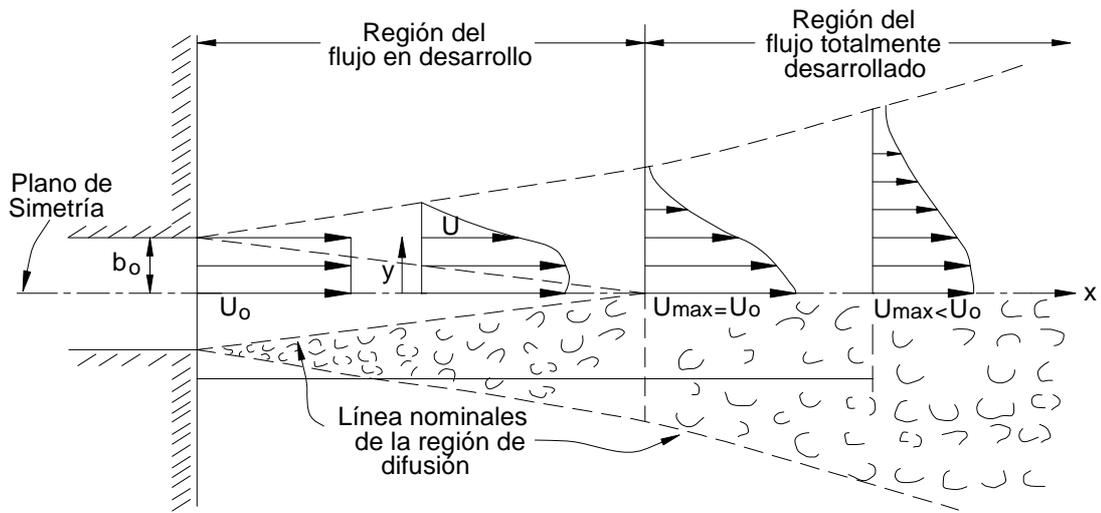


Figura 2.1 Esquema de turbulencia de un chorro libre

Uno de los primeros investigadores en desarrollar la distribución de velocidades del chorro en forma numérica, a través del planteamiento de una ecuación diferencial de segundo orden fue Tollmien (1926), (Rajaratman,1983). Para ello hizo uso de las ecuaciones de movimiento, ecuación de la integral de momento, ecuación de la integral de energía y la longitud de mezcla de Prandtl. Luego con el uso del teorema Pi y el principio de conservación de momento a lo largo del flujo, propuso la siguiente ecuación:

$$\frac{U_m}{U_o} = \frac{1,21}{\sqrt{\frac{a}{x}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

donde:

- U_m, velocidad en la línea central del chorro
- U_o, velocidad promedio a la salida del chorro
- a, constante
- X, distancia desde el punto de salida
- b_o, altura del orificio

La figura 2.2 muestra la solución de Tollmien para la distribución de velocidad del plano de turbulencia de un chorro libre. (Adaptado por Abramovich, 1963)

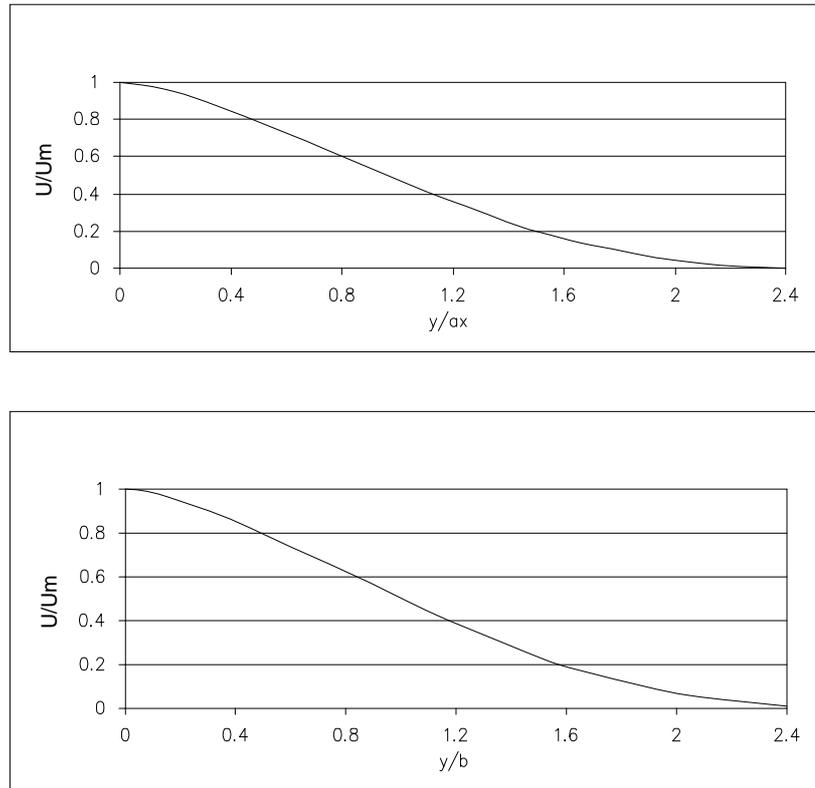


Figura 2.2 Solución de Tollmien para la zona turbulenta de un chorro libre.

2.1.2 Chorro circular de flujo radial.

A un flujo creado por un chorro vertical que impacta sobre una superficie plana y se distribuye radialmente hacia los costados o bordes se le conoce como chorro de flujo radial. (Rajaratman,1976).

Bakke (1957) fue el primer investigador en estudiar experimentalmente este caso. El determinó la distribución de velocidad U en la dirección z , para diferentes distancias radiales tomadas desde el origen. En la figura 2.3, U_m es la velocidad máxima, b es la altura correspondiente a la mitad de la velocidad máxima y r es la distancia radial desde el eje del orificio.

En sus estudios experimentales consideró el espesor inicial del flujo radial b_0 de 15 mm y el radio de la circunferencia de impacto del chorro de 63 mm. Las distribuciones de velocidades medidas en nueve posiciones fueron similares, como se muestra en la figura 2.4. Además observó que la variación de la longitud b

respecto de r es lineal, mientras que $1/U_m$ varía linealmente con r . De acuerdo a los resultados obtenidos por Bakke se puede expresar que: $b = 0.078 r$, donde r es la distancia radial medida desde el origen.

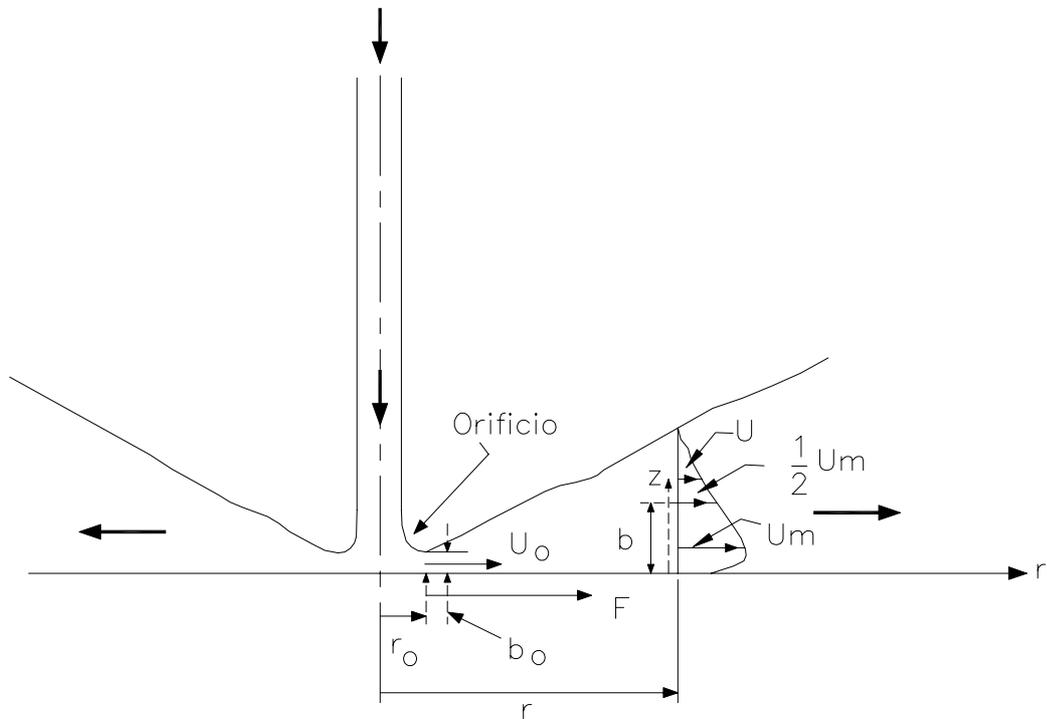


Figura 2.3 Chorro de pared radial.

La expresión hallada por Bakke para la distribución radial fue:

$$\frac{U_m}{U_o} = \frac{C_1}{\sqrt{\left(\frac{r}{r_o}\right)\left(\frac{r}{b_o}\right)}} \dots\dots\dots (2.2)$$

donde, U_o es la velocidad radial del chorro, r_o es el radio y b_o es la altura de la ranura para la posición r_o . El valor de la constante C_1 es de 3.5 (valor considerado también para el caso de un chorro libre).

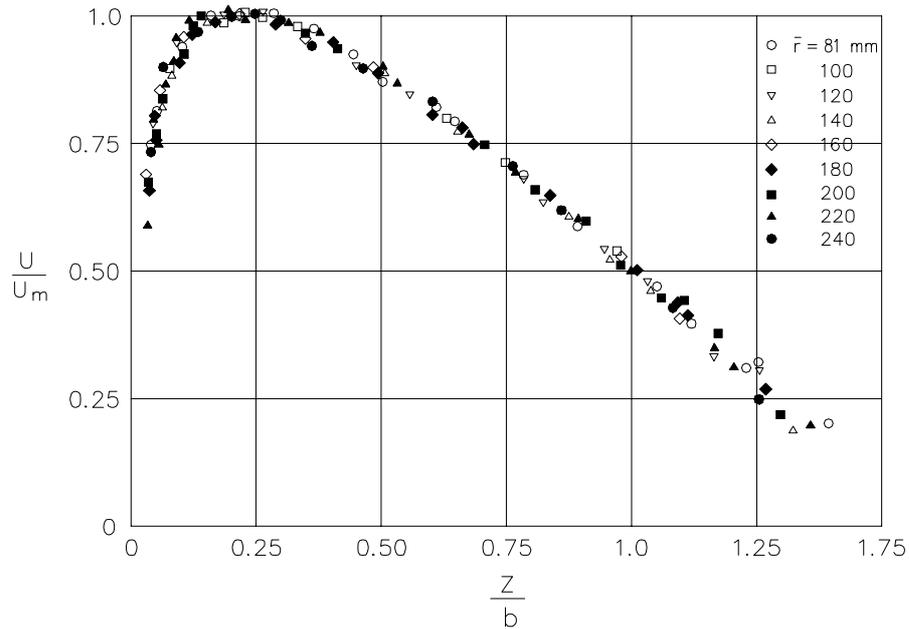


Figura 2.4 Distribución de velocidad del chorro de pared radial.

2.2 Fluctuación de la presión inducida por el impacto de un chorro.

Este tipo de chorro circular descargando verticalmente a una altura H sobre un plano circular de gran diámetro y la condición $d = 2r_o$ fue establecido por varios investigadores como Poreh y Cermak (1959), Bradshaw y Love (1961), Tani y Komatsu (1964), Poreh et al. (1967) y Beltaos y Rajaratman (1974).

Beltaos y Rajaratman (1974) establecieron en el chorro tres regiones. La primera inmediatamente a la salida del chorro como región libre. La segunda como la zona de impacto donde el chorro se acomoda al plano de impacto encontrando que la región de impacto en la cercanía a la pared se inicia para $x/H > 0.86$, donde H es la distancia del orificio al plano horizontal y x es la distancia medida a lo largo de la línea central del eje del chorro. En la tercera región se observa que el chorro descarga radialmente sobre la pared. En la Figura 2.5 se puede apreciar dichas regiones.

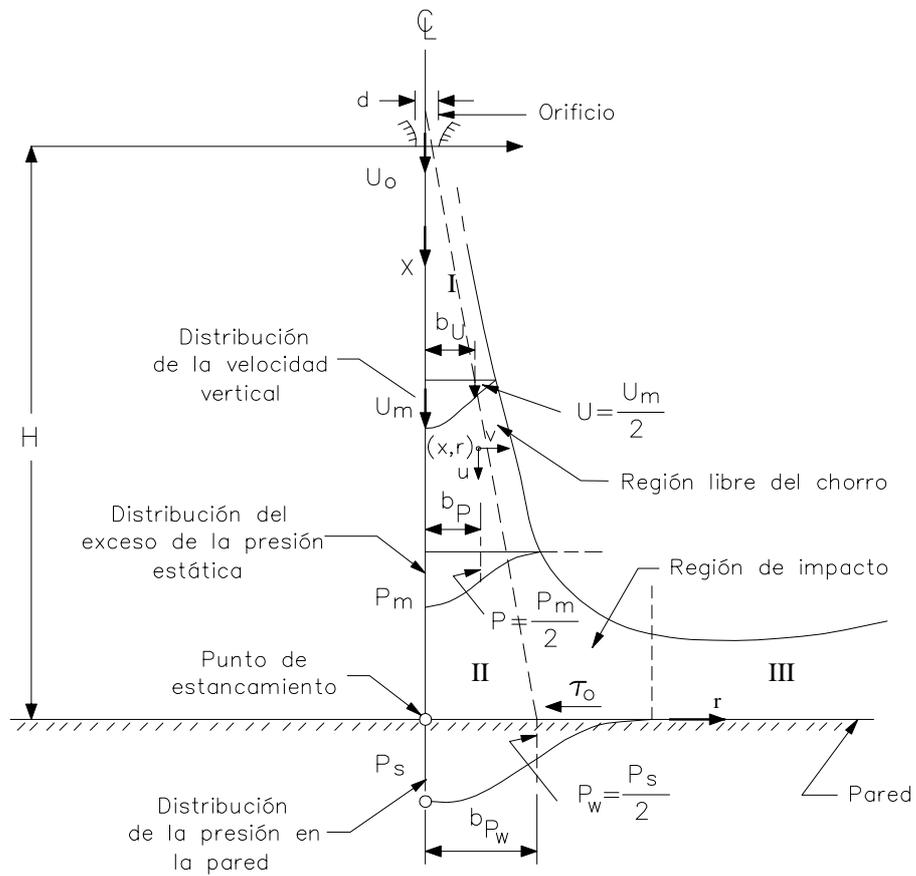
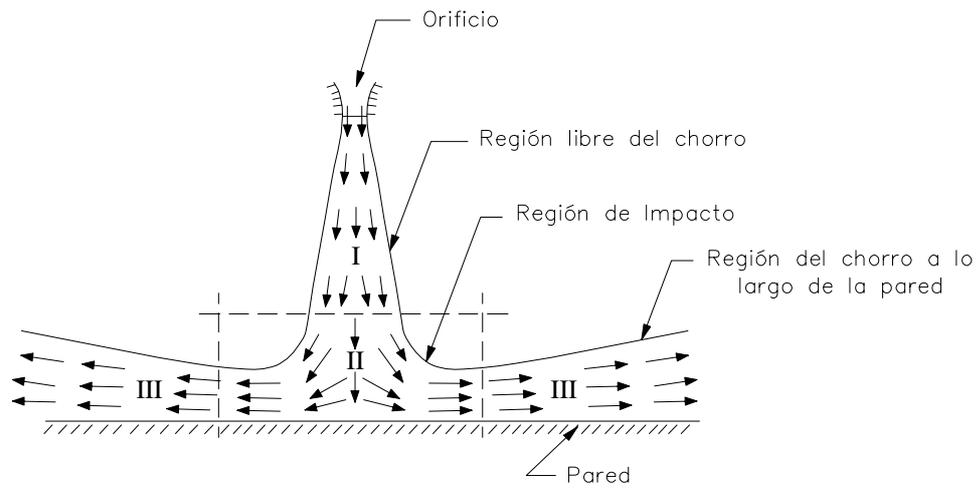


Figura 2.5 Distribución de velocidades del chorro y esfuerzos de corte cerca de la pared.

La distribución de la velocidad en la región libre propuesta en este caso fue:

$$\frac{U_{mi}}{U_m} = 3,1 \frac{x}{H} \left(x - \frac{x}{H}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.3)$$

y el máximo esfuerzo de corte en la región de impacto (τ_m) es:

$$\tau_m = 0.166 \frac{\rho U_o^2}{\left(\frac{H}{d}\right)^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

donde,

U_m = velocidad en el eje del chorro de la región libre.

U_{mi} = velocidad máxima en la región de impacto

d = diámetro del chorro en la sección de emisión

U_o = velocidad del chorro a la salida del orificio.

H = Distancia entre el orificio y el plano horizontal

Así mismo, encontraron una expresión para representar la distribución de presión sobre la pared:

$$\frac{p_w}{p_s} = \exp\left[-114\left(\frac{r}{H}\right)^2\right] \dots\dots\dots (2.5)$$

Donde:

p_w es el exceso de presión sobre la pared debido a la presión relativa.

p_s presión en el punto de estancamiento

$$p_s \cong \frac{50}{\left(\frac{H}{d}\right)^2} \frac{\rho U_o^2}{2} \dots\dots\dots (2.6)$$

Las ecuaciones presentadas para el impacto de un chorro solo es válida para grandes alturas de impacto tal que H/d sea mucho mas grande que 8.

2.3 Estructuras terminales

Cuando la descarga del vertedero se hace directamente al cauce, se produce erosión al pie de la estructura. Para disminuir los efectos se consideran por ejemplo estructuras terminales que permitan proyectar el chorro lo mas lejos posible del pie de la estructura, como los *deflectores terminales* o *trampolines*.

2.3.1 Trampolín o Salto de ski.

Los términos *trampolín* o *salto de ski* (Bureau of Reclamation, Monograph N°25; Rouse, 1951) corresponden a una estructura terminal del tipo deflector (Fig. 2.6). Estos deflectores imponen cambios en la dirección con la que sale el flujo de la estructura vertedora. El chorro es arrojado al aire para luego caer en un punto predeterminado. Una pequeña cantidad de energía es disipada por la fricción a través del trampolín. Durante su viaje a través del aire el chorro se expande debido a la masa de aire que entra en contacto con el chorro. Este efecto disipa otra porción de energía del chorro. Finalmente, la disipación total de la energía del chorro se produce principalmente en el colchón de agua del cuenco.

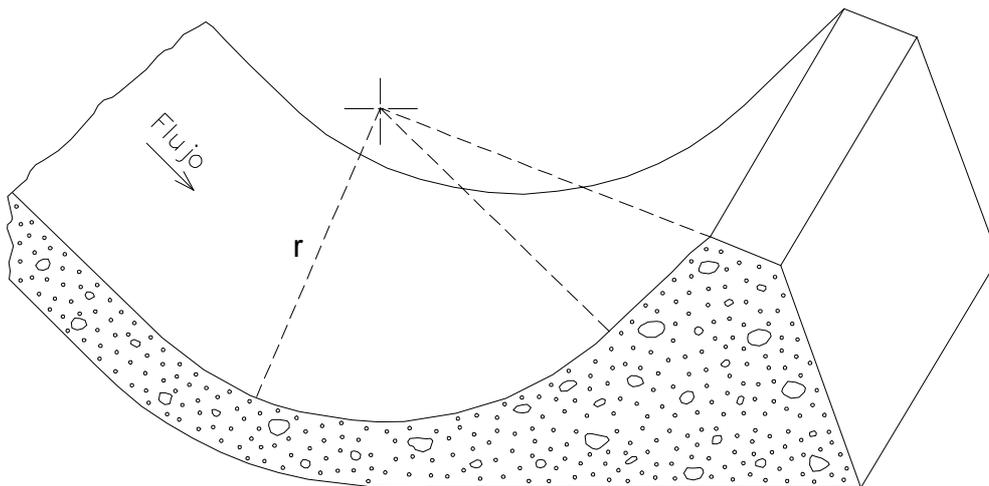


Figura 2.6. Trampolín o salto de ski

Los parámetros geométricos requeridos para el diseño de un trampolín o flip bucket son: el radio del trampolín r , la altura mínima del labio del trampolín h_{min} , el ángulo de la trayectoria ubicado al final del trampolín θ_o y el alineamiento planimétrico del trampolín. La Figura 2.7 muestra las variables involucradas en el diseño del deflector o trampolín.

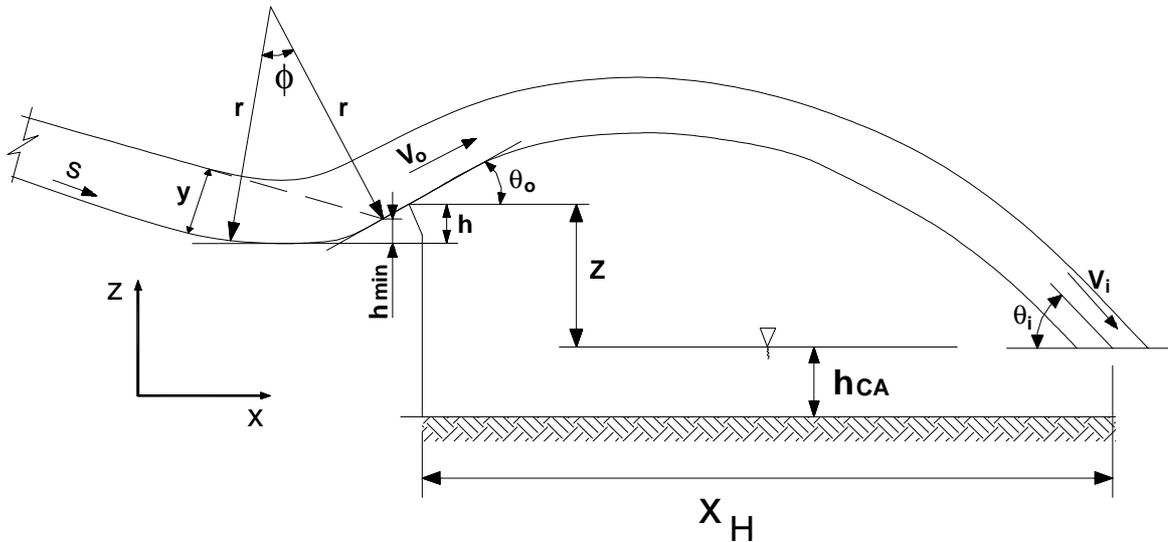


Figura 2.7 Variables de la trayectoria del chorro.

El radio del trampolín debe ser lo suficientemente largo para mantener una corriente concéntrica al moverse el agua alrededor de la curva, el radio mínimo puede obtenerse de la siguiente relación:

$$r_{min} = \frac{\rho V_o^2 y}{p - \gamma y} \dots\dots\dots (2.7)$$

donde :

- r_{min} = radio de la curvatura mínimo
- V_o = velocidad del flujo en el vertedero
- y = tirante del flujo en el vertedero
- p = presión dinámica normal ejercida sobre el piso
- ρ = Densidad del agua
- γ = Peso Específico del agua

Las experiencias sugieren que el radio del trampolín sea al menos cuatro veces el tirante máximo del flujo que se desarrolla antes de salir del trampolín.

La altura mínima (h_{\min}), es la requerida por el trampolín para asegurar que el flujo siga la curvatura del trampolín y viene dada por la siguiente ecuación:

$$h_{\min} = r - r \cos(\phi - \tan^{-1} s) \dots\dots\dots (2.8)$$

Y:

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{[y(2r - y)]^{1/2}}{r - y} \right\} \dots\dots\dots (2.9)$$

donde :

ϕ = mínimo ángulo de la deflexión

s = pendiente del vertedero adjunta al trampolín

El ángulo de la trayectoria es el ángulo que hace el labio del ski respecto a la horizontal. Este ángulo es un factor determinante en la distancia de la trayectoria del chorro y de las características hidráulicas en el área de impacto. Un ángulo igual a 45° generaría la máxima distancia horizontal de la trayectoria del chorro. La altura requerida del labio del trampolín o ski, h , medida desde la parte inferior de la curvatura del trampolín, de modo de satisfacer la trayectoria deseada θ_o , puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$h = r - r \cos \theta_o \dots\dots\dots (2.10)$$

La distancia horizontal de la trayectoria del chorro X_H depende de la velocidad del flujo en el momento que sale del trampolín V_o , del ángulo de la trayectoria θ_o y de la distancia vertical que existe entre el labio del trampolín y la superficie del colchón de agua z , este valor es determinado por la siguiente ecuación:

$$X_H = \frac{V_o^2}{2g} \sin 2\theta_o + 2 \cos \theta_o \left[\frac{V_o^2}{2g} \left(\frac{V_o^2}{2g} \sin^2 \theta_o + z \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.11)$$

Cuando el valor de z es igual a cero, la ecuación se reduce a:

$$X_H = \frac{V_o^2}{2g} \text{sen } 2\theta_o \dots\dots\dots (2.12)$$

Elevatorski (1959) sugiere que para compensar la reducción de la velocidad y la pérdida de energía del chorro durante su viaje, se haga uso de la siguiente ecuación para hallar la longitud real de la trayectoria del chorro:

$$\frac{X_H}{H} = 1,9 \frac{h}{H} \text{sen } 2\theta_o \dots\dots\dots (2.13)$$

El ángulo que hace el chorro en el momento del impacto θ_i con la superficie del colchón de agua, es descrito por la siguiente relación:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[\sec \theta_o \left(\text{sen}^2 \theta_o + \frac{z}{V_o^2/2g} \right)^{1/2} \right] \dots\dots\dots (2.14)$$

La ecuación se reduce a $\theta_i = \theta_o$ cuando z es igual a cero

2.4 Estudios experimentales de erosión debido al impacto de un chorro en materiales no cohesivos.

Mason & Arumugan (1985) realizó un trabajo en el cual recopiló diferentes tipos de ecuaciones para determinar la profundidad de erosión debido al impacto de chorros libres aguas abajo de las presas como también de los deflectores tipo salto de ski.

En el Cuadro N°2.1 se observa dicha lista agrupada en ocho grupos, los cinco primeros fueron planteados por Mason & Aruguman hasta la fecha indicada anteriormente, mientras que los tres restantes se ha complementado con investigaciones hasta el año 2000.

Cuadro 2.1 Ecuaciones planteadas por diferentes investigadores

Grupo	Investigador	Fórmula	Año	
I	Schoklitsch	$h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z}$	1932	
	Veronese - (A)		1937	
	Veronese - (B)		1937	
	Eggenburger		1944	
	Hartung		1959	
	Franke		1960	
	Damle - (A)		1966	
	Damle - (B)		1966	
	Damel - (C)		1966	
	Chee and Padiyar		1969	
	Bisaz and Tschopp*		$h_s = Kq^x H^y - K' d$	1972
	Chee and Kung		$h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z}$	1974
Martins - (B)	1975			
Taraimovich	1978			
Machado	1980			
SOFRELEC	1980			
INCYTH	1981			
Yildiz	$h_s = 1.32 H^{0.225} q^{0.54} \text{sen } \theta_i$	1994		
II	Jaeger	$h_s = 0.6q^{0.50} H^{0.25} \left(\frac{h_{CA}}{d} \right)^{0.333}$	1939	
	Martins - (A)	$h_s = 0.14N - 0.73 \frac{h_{CA}^2}{N} + 1.7h_{CA}$	1973	
	Mason	$h_s = 3.27 \frac{q^{0.60} H^{0.05} h_{CA}^{0.15}}{g^{0.30} d^{0.10}}$	1984	
III	Cola		1965	
	Davis and Sorenson		1969	
	Hartung and Haustler		1973	
IV	Mikhalev	$h_s = \frac{1.804q \text{sen } \theta_i}{(1 - 0.215 \cot \theta_i)} \left(\frac{1}{d_{90}^{0.33} h_{CA}^{0.50}} - \frac{1.126}{H} \right)$	1960	
	Rubinstein	$h_s = h_{CA} + 0.19 \left(\frac{H + h_{CA}}{d_{90}} \right)^{0.75} \left(\frac{q^{1.20}}{H^{0.47} h_{CA}^{0.33}} \right)$	1965	

//.....Cont.

Grupo	Investigador	Fórmula	Año
IV	Solovyeva		1965
	Yuditsky		1965
	Mirtskhulava - (A)	$h_s = \left(\frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \operatorname{sen} \theta_i}{1 - 0.175 \cot \theta_i} + 0.25 h_{CA}$	1967
	Mirtskhulava - (B) Mirtskhulava - (C) Zvorykin et al.		1967 1967 1975
V	Thomas	$h_s = h_{CA} + \frac{2h_{CA}}{3} \left(\frac{q}{HW_m} \right)^{2/3} \left(\frac{H}{h_{CA}} \right)^{2(q/HW_m)^{1/6}}$	1953
	Ofwona	$\frac{dV}{dt} = 3 \left(\frac{V_\infty}{mK} \right)^{1/3} \frac{V^{2/3}}{t}$	1965
VI *	Okyay	$\frac{h_s}{y} = \frac{30.67 \left(\frac{V_0}{W_m} \right)^{2.01} \left(\frac{d_{50}}{y} \right)^{1.28}}{Fr^{1.119} \left(\frac{h_{CA}}{y} \right)^{0.431}}$	1973
	Stein and Julien	$h_s = \frac{C_d^2 C_f V_i^2 y_i \operatorname{sen} \theta_i}{\tau_c}$	1994
	Kuroiwa	$\frac{h_s}{y_c} = 0.965 \frac{\left[\frac{V_i}{\sqrt{g y_i}} \right]^{0.72}}{\left(\frac{h_{CA} / \operatorname{sen} \theta_i}{y_i} \right)^{0.12} \left(\frac{W_m}{\sqrt{g y_i}} \right)^{1.26}}$	1998
VII *	Borman and Julien	$h_s = \left[\frac{0.611}{[\operatorname{sen} (0.436 + \beta')]^{0.8}} q^{0.6} \frac{V_o}{g^{0.8} d_{90}^{0.4}} \operatorname{sen} \beta' \right] - z$	1991
VIII *	D'Agostino-Ferro	$\frac{h_s}{z} = 0.540 \left(\frac{b}{z} \right)^{0.593} \left(\frac{h_{CA}}{H} \right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.751}$	2000

(*) Fórmulas incorporadas por la autora.

Cuadro 2.2 Coeficientes Usados en la Ecuación : $h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z}$

Autor	K	x	y	z	d
Schoklitsch	0.521	0.57	0.20	0.32	d ₉₀
Veronese - (A)	0.202	0.54	0.225	0.42	d _m
Veronese - (B)	1.90	0.54	0.225	0	-
Eggenburger	1.44	0.60	0.50	0.40	d ₉₀
Hartung	1.40	0.64	0.36	0.32	d ₈₅
Franke	1.13	0.67	0.50	0.50	d ₉₀
Damle - (A)	0.652	0.50	0.50	0	-
Damle - (B)	0.543	0.50	0.50	0	-
Damel - (C)	0.362	0.50	0.50	0	-
Chee and Padiyar	2.126	0.67	0.18	0.063	d _m
Bisaz and Tschopp*	2.76	0.50	0.25	1.00	d ₉₀
Chee and Kung	1.663	0.60	0.20	0.10	d ₉₀
Martins - (B)	1.50	0.60	0.10	0	-
Mason	3.27	0.6	0.05	0.10	d _m
Taraimovich	0.633	0.67	0.25	0	-
Machado	1.35	0.50	0.3145	0.0645	d ₉₀
SOFRELEC	2.30	0.60	0.10	0	-
INCYTH	1.413	0.50	0.25	0	-

(*) Ecuación con diferente expresión

Las ecuaciones que estiman la profundidad de erosión en lechos no cohesivos han sido presentadas por autor y de forma cronológica dentro de los ocho grupos que ha continuación se describe:

El Grupo I, son aquellas ecuaciones que expresan la profundidad de erosión (h_s), en términos de la carga de agua (H), diferencia de nivel entre el reservorio y el colchón de agua, la descarga unitaria del chorro en el punto de impacto (q) y en algunos casos el diámetro característico del material del lecho (d). La forma general que toma la ecuación (2.15) es la siguiente:

$$h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

en la cual: K, x, y, z son las constantes para las ecuaciones planteadas del Grupo I.

Una excepción a esta ecuación es la planteada por Bisaz & Tschopp, plantea una ecuación similar a la de Veronese (B) disminuyendo la profundidad de erosión con un coeficiente K' , la cual se expresa a través de la ecuación (2.16)

$$h_s = Kq^x H^y - K'd \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

En el Cuadro N°2.2 se muestran los valores de los coeficientes K, x, y, z los cuales han sido propuestos de acuerdo a las condiciones de flujo y diámetro de la partícula utilizada en cada investigación experimental.

Damle (1966) consideró la estimación de la profundidad de socavación tanto para modelo como para prototipo. La primera ecuación expresa el máximo valor sea modelo o prototipo, la segunda un valor medio en el caso que sea para modelo y la tercera un valor medio en el caso que sea para prototipo.

Yildiz (1994) consideró que la ecuación de Veronese fue desarrollada para casos donde el ingreso del chorro al colchón de agua es bastante cercano al ángulo vertical, lo cual podría ocurrir en los vertederos de presas de arco. De este modo, Yildiz sugirió que la profundidad de erosión podría estar dada por la siguiente ecuación (2.17):

$$h_s = 1.32 H^{0.225} q^{0.54} \text{sen } \theta_i \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

donde:

θ_i es el ángulo con el que incide el chorro en la superficie del colchón de agua.

Las ecuaciones del Grupo II consideran además de las variables q, H y d también la altura del colchón de agua (h_{CA}). Jaeger basado en el trabajo de Veronese, planteó la siguiente ecuación (2.18):

$$h_s = 0.6q^{0.50} H^{0.25} \left(\frac{h_{CA}}{d} \right)^{0.333} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

La segunda expresión fue desarrollada por Martins en 1973, la cual derivó de experimentos con chorro concentrado actuando sobre un lecho considerablemente ancho y conformado por cubos colocados uno tras otro en estructura compacta. La ecuación (2.19) es la siguiente:

$$h_s = 0.14N - 0.73 \frac{h_{CA}^2}{N} + 1.7h_{CA} \dots\dots\dots (2.19)$$

Donde:

$$N = 7 \sqrt{\frac{Q^3 H^{1.5}}{d^2}} \dots\dots\dots (2.20)$$

Aquí se puede substituir Q por q debido a que se asume que esta expresión puede ser aplicable para grandes láminas de flujo.

Mason (1984) basado en la ecuación de Jaeger incluyo el parámetro de la altura del colchón de agua (h_{CA}) para obtener una mejor aproximación de la profundidad de erosión, siendo esta de la siguiente forma:

$$h_s = K \frac{q^x H^y h_{CA}^w}{g^v d^z} \dots\dots\dots (2.21)$$

Sobre la base de datos obtenidos de estudios experimentales en modelo presentó la siguiente ecuación:

$$h_s = 3.27 \frac{q^{0.60} H^{0.05} h_{CA}^{0.15}}{g^{0.30} d^{0.10}} \dots\dots\dots (2.22)$$

El diámetro de la partícula utilizado fue el d_m en vez del d_{90} .

Mason también investigó este fenómeno de erosión en prototipos. Sin embargo la ecuación (2.22) no dio buenos resultados en este caso. Luego, de los estudios realizados observó que era necesario variar los valores de los exponentes x e y.

Finalmente presento una relación para la constante y exponentes que podían ser aplicados para modelos y prototipos, siendo los siguientes:

$$\begin{aligned}
 K &= (6.42 - 3.10 H^{0.10}) \\
 v &= 0.30 \quad ; \quad w = 0.15 \\
 x &= (0.60 - H/300) \\
 y &= (0.15 - H/200) \\
 z &= 0.10
 \end{aligned}$$

En caso de prototipo se debe asumir como constante el valor de $d_m = 0.25$ m.

El Grupo III considera ecuaciones que han sido planteadas de un modo original y se les considera altamente simplificadas. Cola planteó que la máxima profundidad de erosión que pueden producir grandes flujos estaría entre 40 veces el ancho del chorro. Davis & Sorensen sugiere que la profundidad de erosión sería los dos tercios de la altura de caída. Hartung & Haustler continua el trabajo de Cola y plantea que para un chorro concentrado (circular) la profundidad de erosión sería 20 veces el diámetro del chorro.

Las ecuaciones del Grupo IV están compuestas de autores rusos. Estas ecuaciones consideran el ángulo con el que incide el chorro sobre el colchón de agua (θ_i). Según Mason las que se pueden aplicar con mayor confiabilidad de todo el grupo son las siguientes:

- Ecuación de Mikalev:

$$h_s = \frac{1.804q \operatorname{sen} \theta_i}{(1 - 0.215 \cot \theta_i)} \left(\frac{1}{d_{90}^{0.33} h_{CA}^{0.50}} - \frac{1.126}{H} \right) \dots\dots\dots (2.23)$$

- Ecuación de Rubinstein:

$$h_s = h_{CA} + 0.19 \left(\frac{H + h_{CA}}{d_{90}} \right)^{0.75} \left(\frac{q^{1.20}}{H^{0.47} h_{CA}^{0.33}} \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

- Ecuación de Mirskhulava - (A):

$$h_s = \left(\frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \operatorname{sen} \theta_i}{1 - 0.175 \cot \theta_i} + 0.25 h_{CA} \quad \dots\dots (2.25)$$

Las ecuaciones del Grupo V, considera el parámetro del tiempo (T) en el proceso de erosión. En 1950 Hunter Rouse comento que " la socavación era proporcional a la media geométrica del tiempo y como tal el equilibrio final de la profundidad no puede ser estimada". Doddiah en 1953 (D'Angostino -Ferro) mostró que la siguiente relación:

$$\frac{h_s}{h_{CA}} = k_1 + k_2 \log \left(\frac{QT}{Bz} \right) \quad \dots\dots(2.26)$$

Donde: k_1 y k_2 son constantes, B es el ancho del vertedero y z la altura de caída. Thomas que también participó con Doddiah en las investigaciones, adaptó la ecuación anterior para grandes periodos de tiempo y además consideró para diferentes tipos de material del lecho, así tenemos la ecuación (2.27):

$$h_s = h_{CA} + \frac{2h_{CA}}{3} \left(\frac{q}{HW_m} \right)^{2/3} \left(\frac{H}{h_{CA}} \right)^{2(q/HW_m)^{1/6}} \quad \dots\dots (2.27)$$

Donde: W_m es la velocidad de caída de la partícula con diámetro medio.

Ofwona (1965), también consideró el tiempo de el proceso de erosión a la salida de una alcantarilla, el propósito del estudio fue investigar dos ecuaciones básicas del fenómeno de erosión: la variación de la socavación respecto del tiempo y determinar el limite del proceso de socavación; y a la vez, determinar expresiones empíricas para la variación de la socavación y su relación con las variables pertinentes como la velocidad y diámetro del sedimento.

Las siguientes son las relaciones propuestas:

- Ecuación diferencial para el proceso de socavación:

$$\frac{dV}{dt} = 3\left(\frac{V_\infty}{mK}\right)^{1/3} \frac{V^{2/3}}{t} \dots\dots\dots (2.28)$$

donde:

V_∞ = volumen al término del proceso erosivo

V = volumen en el tiempo t

dV/dt = variación del volumen en el tiempo t

m = gradiente de la curva: $Ln(t)$ v.s. $\left[\frac{(Vd)^{1/3}}{D(V_x - V_c)^{2/3}} \right]$

K = constante

V_x = Velocidad promedio a la salida

V_c = Velocidad crítica al inicio de la erosión

D = Diámetro del tubo

d = Tamaño de la partícula

- Ecuación diferencial para la variación de la socavación respecto al tiempo:

$$V = V_\infty \left[1 - e^{-\frac{At^{1/3}}{V_\infty}} \right] \dots\dots\dots (2.29)$$

donde:

A = constante dimensional

t = tiempo en minutos

Las ecuaciones del Grupo VI, además de considerar las variables mencionadas anteriormente, propone los siguientes parámetros como: el espesor del chorro a la salida del vertedero (y) y en la zona de impacto (y_i). Así mismo la velocidad con la que sale del vertedero (V_o) y con la que impacta (V_i), finalmente la velocidad de caída de la partícula (W_m).

Okyay (1973) investigó en laboratorio usando el principio de conservación de masa, por ejemplo la ecuación de continuidad de los sedimentos. El desarrollo un método semiempírico para determinar la variación de la profundidad de socavación producida por la acción de un chorro vertical, luego la ecuación que propuso fue:

$$\frac{h_s}{y} = \frac{30.67 \left(\frac{V_0}{W_m} \right)^{2.01} \left(\frac{d_{50}}{y} \right)^{1.28}}{Fr^{1.119} \left(\frac{h_{CA}}{y} \right)^{0.431}} \dots\dots\dots (2.30)$$

Stein and Julien (1994) derivaron una ecuación para calcular la profundidad máxima del hueco de erosión producida por el impacto de un chorro a la salida de un vertedero. Basados en los trabajos de Albertson et al. (1950) y Beltaos and Rajaratman (1974), asumieron que el chorro tiene una zona de establecimiento. Luego relacionaron parámetros adimensionales como el volumen de socavación, concentración de sedimentos, profundidad máxima de socavación y el tiempo en que se obtuvo esta profundidad. Encontraron que el volumen de socavación por unidad de ancho es dos veces el cuadrado de la profundidad máxima para un tiempo. La profundidad de socavación por debajo de la altura de agua en el lecho h_s se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_s = \frac{C_d^2 C_f V_i^2 y_i}{\tau_c} \text{sen } \theta_i \dots\dots\dots (2.31)$$

donde:

C_d = coeficiente de difusión

C_f = coeficiente de fricción = $0.22/8 (q/v)^{-0.25}$

v = viscosidad cinemática

τ_c = esfuerzo de corte crítico para el arrastre de una partícula característica.

En la Figura 2.8 se observa el esquema que muestra las consideraciones para el planteamiento de la ecuación (2.31).

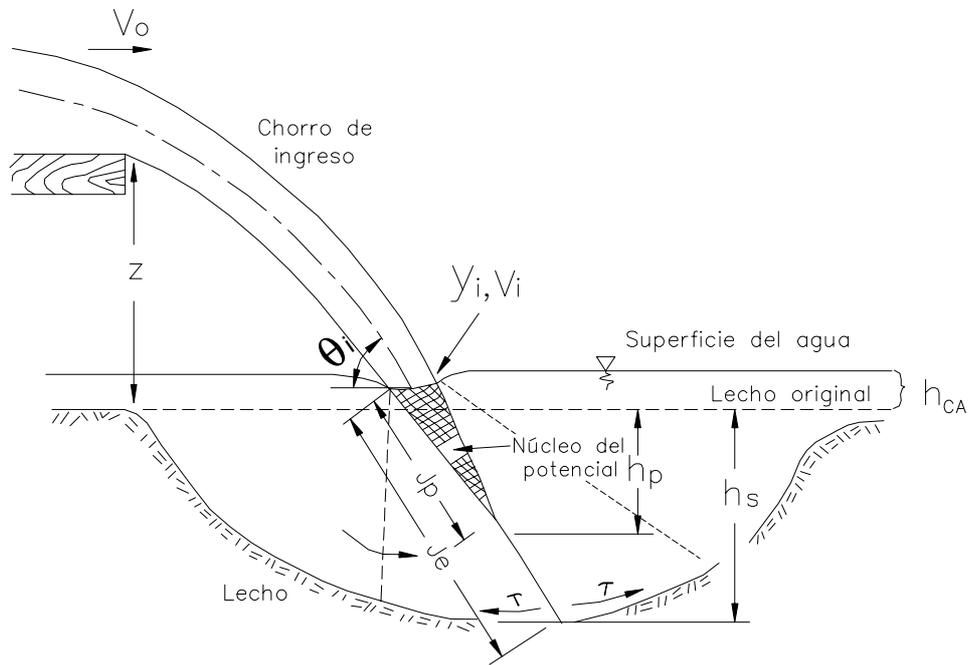


Figura 2.8 Definición de regiones para un chorro que impacta en un suelo no cohesivo.

Kuroiwa, J. (1998) realizó un trabajo de investigación sobre la erosión al pie de una presa en lecho no cohesivo (grava y roca fracturada), debido a un chorro originado por el colapso de una presa. El trabajo consistió en un modelo a escala 1:1, donde obtuvo una cantidad suficiente de datos con lo cual pudo relacionar parámetros adimensionales como las características del fluido, suelo y la fuerza de los chorros impactantes. Así mismo consideró el fenómeno de aireación, cuyos parámetros son la densidad del aire y la viscosidad del aire.

La ecuación 2.32 fue planteada para determinar la profundidad de socavación debido al efecto del impacto del chorro:

$$\frac{h_s}{y_c} = 0.965 \frac{\left[\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right]^{0.72}}{\left(\frac{(h_{CA} / \text{sen } \theta_i)}{y_i} \right)^{0.12} \left(\frac{W_m}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.26}} \dots\dots\dots (2.32)$$

Donde : el tirante crítico esta dado por:

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} \dots\dots\dots (2.33)$$

donde:

$h_{CA}/\text{sen } \theta_i$ corresponde a la longitud de penetración del chorro sobre el eje central.

En el Grupo VII se considera a la investigación realizada por Borman & Julien en 1991 (D'Angostino-Ferro). Ellos calibraron una ecuación basada en la estabilidad de la partícula y para una amplia variedad de condiciones como: chorros verticales, chorros de flujo radial, chorros producto de avenidas, chorros sumergidos y flujos sobre estructuras a gran escala. De acuerdo a sus resultados ellos estimaron la profundidad de erosión de acuerdo a la ecuación (2.34):

$$h_s = \left[\frac{0.611}{[\text{sen}(0.436 + \beta')]^{0.8}} q^{0.6} \frac{V_o}{g^{0.8} d_{90}^{0.4}} \text{sen } \beta' \right] - z \dots\dots\dots (2.34)$$

Donde: β' es el máximo ángulo del talud de aguas arriba del hoyo de erosión (rad).

Ellos infirieron una relación para este ángulo:

$$\beta' = 0.316 \text{sen } \lambda + 0.15 \ln \left(\frac{z + y_o}{y_o} \right) + 0.13 \left(\frac{h}{y_o} \right) - 0.05 \ln \left(\frac{V_o}{\sqrt{g y_o}} \right) \dots\dots\dots (2.35)$$

Donde: λ , es el ángulo de la cara de aguas abajo de la estructura de control (rad) y y_o es la altura de agua sobre la cresta del vertedero.

En el Grupo VIII, se tiene a la investigación realizada por D'Angostino & Ferro en el 2000. Ellos realizaron un análisis denominado "self-similarity" con los datos de Veronenese (1937), Borman & Julien (1991), D'Angostino (1994) y Mossa (1998). Como trabajan con diferentes tipos de granulometría, consideraron el parámetro

(d_{90}/d_{50}) para caracterizar mejor el material del lecho. Luego la ecuación que propusieron fue:

$$\frac{h_s}{z} = 0.540 \left(\frac{b}{z} \right)^{0.593} \left(\frac{h_{CA}}{H} \right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.751} \dots (2.36)$$

y :

$$A_{50} = \frac{Q}{bz \left[gd_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{1/2}} \dots (2.37)$$

Donde :

b = ancho del vertedero

B = ancho del canal

ρ_s = densidad del sólido

ρ = densidad del agua

CAPITULO 3

CONSIDERACIONES TEORICAS

3.1 El Proceso de Erosión

En la figura 3.1 se muestra el esquema del proceso de erosión de un lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro inclinado, a la salida de un vertedero. A la región directamente erosionada, como resultado del impacto del chorro, se le conoce como *poza u hoyo vivo de erosión* y al área circundante a ésta, producido debido a las corrientes recirculantes o deflectadas, se le conoce como *zona de erosión exterior*.

La profundidad final del hoyo de erosión se debe a la magnitud de la descarga del vertedero una vez alcanzado el equilibrio, el cual es función del tiempo que el chorro se encuentra impactando en el cuenco y de las condiciones geológicas del estrato del cuenco.

De los estudios realizados por Supr. (1985), Gis (1998), Kuroiwa (1999) y Yafei (2001) sobre este tema se ha podido clasificar al proceso de erosión en las siguientes etapas (ver Figura 3.1): La primera, correspondiente a la trayectoria y caída libre del chorro; la segunda, el impacto y disipación del chorro dentro del colchón de agua; y la tercera, la interacción entre el impacto del chorro y el lecho del cuenco. También se tratará sobre la erosión en la zona circundante al área de impacto.

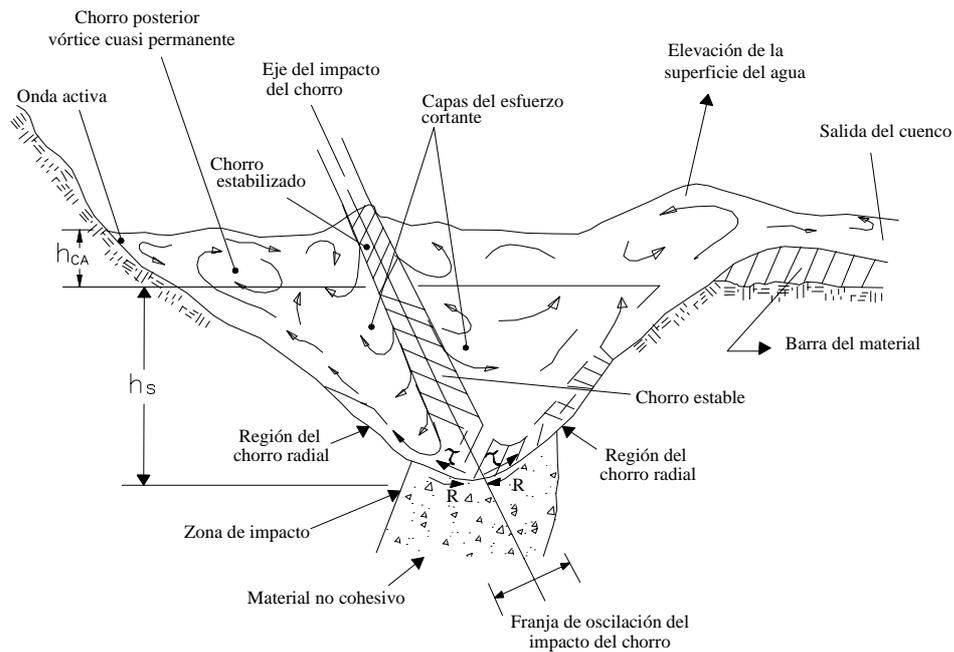


Figura 3.1 Esquema del proceso de erosión.

Etapa 1. Trayectoria y Caída Libre del chorro.

El potencial erosivo de un chorro podría ser descrito por la energía por unidad de área impactada, como también por la presión dinámica que ejerce sobre el lecho del cauce. Durante la trayectoria del chorro en el aire, la energía de éste se disipa gradualmente. Los factores que influyen en este proceso son:

- Durante el trayecto en ascenso en un salto de skí, el chorro incrementa de sección transversal, éste se debe a la resistencia del aire; luego en el trayecto de descenso, el chorro tiende a concentrarse en la parte central. La longitud de la trayectoria del chorro incide en la energía de erosión con la que llega al cuenco.
- El aire atrapado por el chorro durante su trayectoria hacia el cuenco disminuye la resultante de las fluctuaciones de la presión dinámica y de la erosión local.

Etapa 2. Impacto y Difusión del chorro dentro del colchón de agua.

Una vez que el chorro de agua ingresa y atraviesa el colchón de agua, las capas exteriores de éste son separadas por el esfuerzo de corte que se produce entre el chorro y el agua quieta del colchón, creando el efecto vorticoso. Cuando la zona de aguas arriba del lecho del cuenco es confinada, se forma un vórtice de eje horizontal entre el estrato confinado y el chorro. Este vórtice es permanentemente alimentado por las corrientes que se separan del chorro en el momento del impacto. Luego, como el vórtice crece en tamaño y fuerza, esto permite que el nivel de agua de la parte de atrás del chorro se eleve, forzando a que el chorro tienda ir hacia aguas abajo, moviendo la posición original del punto de impacto.

Una vez que el tamaño del vórtice es mayor al crítico, éste se vuelve inestable rompiendo parcialmente y su fuerza es pasada al chorro, el cual es desplazado lateralmente. Como el nivel del agua de la parte de atrás del chorro, baja parcialmente, el chorro retorna a su posición original y el proceso oscilatorio comienza nuevamente. La inestabilidad del chorro en el punto de contacto con la superficie del lecho, incrementa los esfuerzos de corte hidráulico que actúan sobre las paredes del hoyo causando una erosión local.

Como el impacto del chorro sumergido es deflectado ascendentemente, forma hacia aguas abajo una superficie de borboteo o ebullición. El ángulo de deflexión del chorro dentro del agua está en función del ángulo de incidencia y del perfil stratigráfico del lecho. El punto de impacto está definido en relación al punto de estancamiento. Cuando el nivel del borboteo o ebullición de aguas abajo es mayor que el nivel de agua de la parte posterior del chorro, el flujo de aguas arriba retorna circulando alrededor del chorro hacia la parte posterior del cuenco.

Inicialmente, cuando la diferencia de los niveles de agua es grande, este retorno del flujo actúa como un flujo altamente turbulento, el cual induce a intensos esfuerzos de corte hidráulico sobre las paredes del cuenco originando erosión. La gran mezcla que se produce entre el chorro y su difusión va ensanchando y profundizando el hoyo; así que el nivel del borboteo o ebullición aguas abajo y la

intensidad del esfuerzo de corte disminuirá hasta eventualmente llegar a alguna forma de equilibrio.

Etapa 3. Interacción hidráulica con el lecho del cuenco.

El impacto del chorro sobre el lecho del cuenco origina una combinación de fuerzas y si la potencia del chorro es suficiente para remover las partículas se formará un hoyo. La carga disponible (H), el ancho característico del chorro (b), el diámetro característico de la partícula del lecho (d_n) y su coeficiente de arrastre (C_d), entre otras variables, determinarán la profundidad que ha erosionado por debajo del lecho original. Cabe indicar que la profundidad de erosión varía con el tiempo, porque las fuerzas disponibles en la superficie del terreno al inicio del proceso son muy altas y la variación de la erosión también es alta. Luego, esta variación decrece con el tiempo.

3.2 Cinemática de la trayectoria del chorro

En el presente trabajo de investigación, para la determinación de la máxima profundidad de erosión, se considera un chorro compacto; es decir no se tendrá en consideración el fenómeno de aireación del mismo.

Se trata de un chorro que sale de una estructura denominada *trampolín* o *flip bucket* o *salto de ski*. (Rouse, 1951). De allí que el chorro desarrolla una trayectoria curvilínea con régimen permanente y superficie libre, lo cual quiere decir que la presión atmosférica actúa en cualquier punto del chorro.

La velocidad de incidencia (V_i) con la cual ingresa el chorro a la superficie del colchón de agua (h_{CA}) se deduce utilizando los conceptos de cinemática de partículas en movimiento curvilíneo y energía.

De la Figura 3.2, se puede observar que la velocidad inicial o de salida, V_o , en cualquier punto se puede descomponer en sus componentes horizontal y vertical

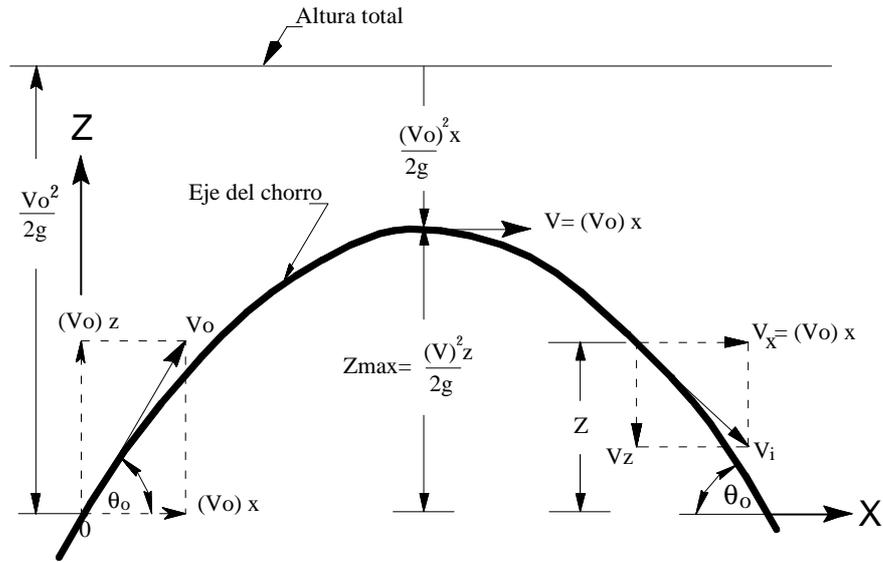


Figura 3.2 Distribución de las componentes de velocidad de la trayectoria del chorro.

$$V_x = V_{ox} \cos \theta_o \qquad V_z = V_{oz} \text{sen} \theta_o \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

y

$$V_o = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

El vector aceleración puede también descomponerse en componentes cuyas magnitudes son:

$$a_x = \frac{dV_x}{dt} = 0 \qquad a_z = \frac{dV_z}{dt} = g \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

dado que la única fuerza actuante es el peso propio del chorro.

Según la descripción de la trayectoria y el sistema de ejes asumidos en la figura 3.2, la aceleración en el eje z tendrá signo negativo en el tramo ascendente de la curva y signo positivo en el tramo descendente de la curva. Como la velocidad de incidencia se encuentra en el tramo descendente, para el siguiente desarrollo se utilizará el signo positivo.

La integración de las ecuaciones (3.3) con respecto al tiempo nos conducirá a expresiones que den las componentes del vector velocidad en cualquier punto en función del tiempo invertido por una partícula en desplazarse desde el punto de referencia:

$$V_x = C_1 = (V_o)_x \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$V_z = gt + C_2 = (V_o)_z + gt \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

Como $v_x = dx/dt$ y $v_z = dz/dt$, una nueva integración dará por resultado las expresiones de las distancias x y z recorridas en las dos direcciones, encontrándose que la trayectoria de cualquier elemento fluido es de forma parabólica:

$$x = (v_o)_x t \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$z = (v_o)_z t + \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

De la ecuación (3.7) despejamos "t", obtenemos

$$t = \frac{-V_o \text{sen} \theta_o + \sqrt{V_o^2 \text{sen}^2 \theta_o + 2gz}}{g} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

Finalmente, al combinar las ecuaciones (3.5) y (3.7) podrá verse que, en cualquier instante,

$$V_z^2 = (V_o)_z^2 + 2gz \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

Luego, la magnitud escalar de la velocidad de incidencia (V_i) será:

$$V_i = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

Reemplazando en la ecuación (3.10) las ecuaciones (3.1) y (3.9) se tiene:

$$V_i = \sqrt{V_o^2 \cos^2 \theta_o + V_o^2 \text{sen}^2 \theta_o + 2gz} \quad \dots\dots(3.11)$$

Ordenando la ecuación y sabiendo que : $\text{sen}^2 \theta_o + \cos^2 \theta_o = 1$, tenemos:

$$V_i = \sqrt{V_o^2 + 2gz} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

La ecuación (3.12) también puede ser escrita como:

$$V_i = \sqrt{2g\left(\frac{V_o^2}{2g} + z\right)} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

Como se mencionó anteriormente se trata de una corriente con superficie libre, luego la presión actuante es atmosférica (nula manométricamente). Entonces, en la ecuación de Bernoulli el término carga de presión desaparece. De la figura 3.3, y aplicando la ecuación de Energía se observa que la carga total (H) esta dada por:

$$H = z + \frac{V_o^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

donde:

z, es la altura que hay entre el eje de la salida del chorro y la superficie del colchón de agua y

$V_o^2/2g$ es la carga cinética. Se considera que las pérdidas de carga locales son despreciables.

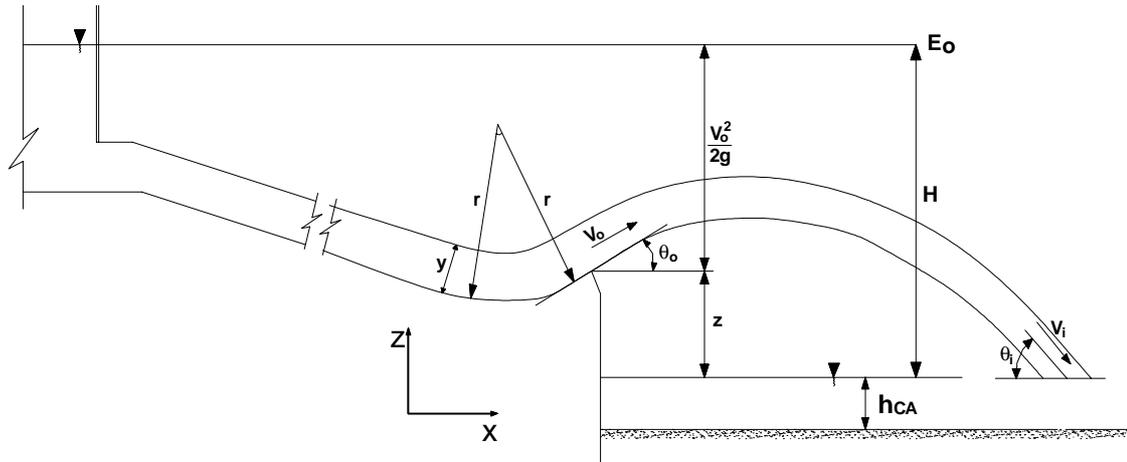


Figura 3.3 Variables que intervienen en la deducción de la velocidad de incidencia (V_i).

Reemplazando la ecuación (3.14) en la ecuación (3.13), obtenemos:

$$V_i = \sqrt{2gH} \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

3.3 Influencia de la Carga Total y de la Longitud del Chorro en la energía del Chorro

En el capítulo 2, ítem 2.3 se han descrito las relaciones que componen la trayectoria del chorro. De las variables señaladas en la figura 2.7, la ecuación 2.12 se puede transformar, dividiéndola entre la carga total H , en la siguiente ecuación adimensional:

$$\frac{X_H}{H} = 2 \frac{h}{H} \text{sen } 2\theta_o \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

Así mismo, Elevatorski (1959) presenta la siguiente ecuación para hallar la longitud real de la trayectoria del chorro:

$$\frac{X_H}{H} = 1,9 \frac{h}{H} \text{sen } 2\theta_o \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

De igual modo se puede determinar la componente vertical o la altura de la trayectoria del chorro. Si la resistencia y perturbación del aire son despreciables, se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$z = \frac{V_o^2}{2g} \text{sen}^2 \theta_o \dots\dots\dots (3.18)$$

Como $V_o^2/2g$ es igual a "h", entonces la ecuación (3.18) se puede expresar adimensionalmente como:

$$\frac{z}{h} = \text{sen}^2 \theta_o \dots\dots\dots (3.19)$$

De estas deducciones, se encontró que al disminuir la potencia del chorro durante su trayectoria en el aire, entonces la velocidad de impacto en el colchón de agua es menor que la velocidad de impacto teórica.

3.4 Mecanismo de disipación de la energía del chorro en el colchón de agua.

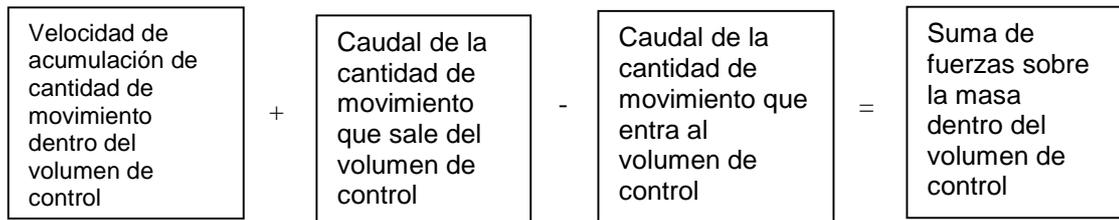
Cuando el chorro de agua impacta en el colchón de agua se pueden observar dos regiones distintas, como se explicó en el Capítulo 2 (Ver Figura 2.1). Así tenemos la zona o región del flujo en desarrollo y la otra del flujo totalmente desarrollado (Rajaratman, 1976). La región del flujo en desarrollo toma la forma de una cuña, en la cual la velocidad del flujo iguala a la velocidad de emisión. En la región de flujo totalmente desarrollado, la velocidad en la parte central del chorro decrece.

Para explicar el mecanismo de disipación de la turbulencia del chorro, cuando este impacta en el colchón de agua, se utiliza la ecuación de cantidad de movimiento o segunda ley del movimiento de Newton para un fluido que atraviesa un volumen de control finito. Esta ecuación nos permite calcular interacciones entre un fluido en movimiento y objetos sólidos en contacto con él.

La ecuación de cantidad de movimiento lineal viene dada por la siguiente expresión (Gerahd, Gross, Hochtein, 1995):

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho \vec{V} dV + \int_{A_{sal.}} \rho \vec{V} (V_r) dA - \int_{A_{ent}} \rho \vec{V} (V_r) dA = \sum \vec{F} \dots\dots\dots(3.22)$$

La expresión verbal del teorema de la cantidad de movimiento lineal es:



El término acumulación de cantidad de movimiento para el presente caso es igual a cero, debido a que el flujo es permanente. Además, el término suma de fuerzas considera "todas las fuerzas" y todas las localizaciones donde estas actúan. Así tenemos que las fuerzas que actúan son las fuerzas de gravedad (fuerza de masa); las fuerzas de presión y cortante, denominadas también fuerzas intrínsecas o fuerzas de superficie, ya que actúan sobre la masa en la superficie de control, donde forman una interfaz con el material externo.

Luego la expresión que se utilizará será la siguiente:

$$M_{sal} - M_{ent} = \Sigma F \dots\dots\dots (3.23)$$

En la figura 3.4 se muestra el volumen de control el cual es representativo del proceso de socavación aguas abajo del salto de skí. Las fuerzas y los momentos actuantes sobre este volumen de control son (Meilan-Tanaka, 2000): en la sección 1-1, de ingreso del flujo, el momento M_1 ; en la sección 2-2 de salida del flujo, el momento M_2 y a ambos lados del volumen de control las fuerzas hidrostáticas, debido al colchón de agua, las fuerzas F_1 y F_2 ; así también la fuerza de gravedad, debido al peso del agua (W), finalmente la fuerza dinámica (R), la cual agrupa a las fuerzas mecánicas, normales y de corte que se presentan a lo largo del lecho del pozo de erosión.

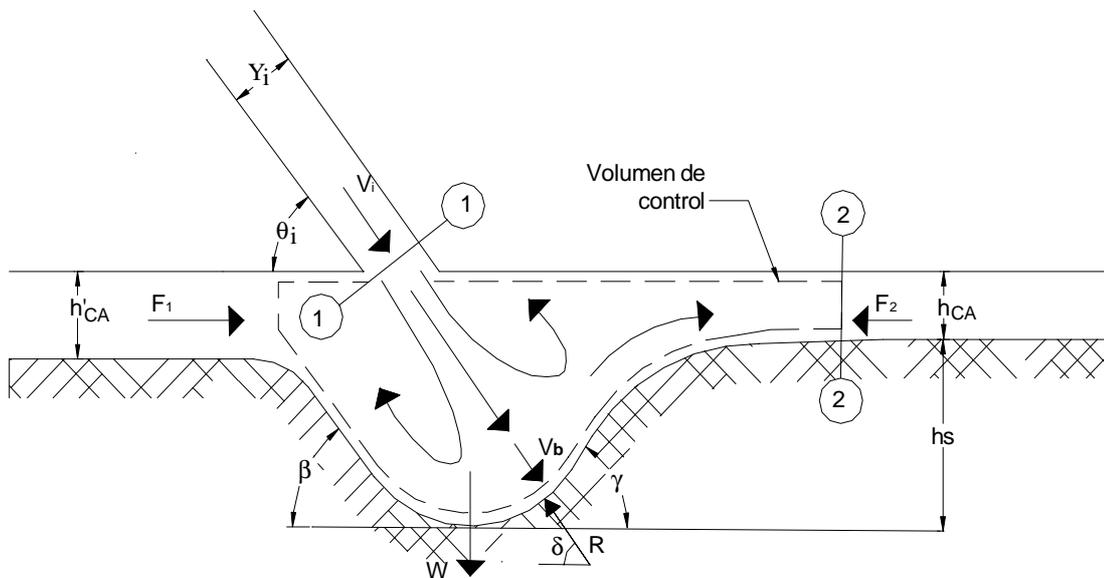


Figura 3.4. Volumen de Control

Como se sabe la ecuación de cantidad de movimiento trata cantidades vectoriales (fuerza y cantidad de movimiento). Aplicando la ecuación (3.23) para la fase de equilibrio del proceso de socavación (por unidad de ancho), tenemos:

$$\text{Eje X: } F_1 - F_2 - R \cos\delta - \rho q V_2 + \rho q V_i \cos\theta_i = 0 \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

$$\text{Eje Y: } -W + R \text{sen}\delta - \rho q V_i \text{sen}\theta_i = 0 \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

Donde los parámetros conocidos son: y_1 , espesor del chorro; g , aceleración de la gravedad; V_i , velocidad media de incidencia, como se dedujo en el ítem 3.2, viene dada por $V_i = \sqrt{2gH}$; V_2 es la velocidad media a la salida (sección 2-2); δ , es el ángulo entre R y la horizontal; θ_i , es el ángulo de impacto y ρ_w , es la densidad del agua. Mientras que los parámetros no conocidos son: W , R y δ . Por lo tanto se presentan dos ecuaciones con tres incógnitas, los mismos que pueden ser resueltas si y solo si se asume uno de los parámetros desconocidos, los cuales deben estar relacionados al equilibrio del proceso de erosión.

Así por ejemplo, según el trabajo de Gis & Hoffman (1985), el peso del agua podría expresarse como:

$$W = \rho_w g A \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

donde A, área del volumen de control.

De la figura 3.4, puede relacionarse el área del volumen de control con la profundidad de equilibrio de la erosión (h_s) y el tirante del colchón de agua (h_{CA}), obteniéndose la siguiente expresión:

$$A = \frac{h_s^2}{2} (\cot \beta - \cot \gamma) + h_s (h'_{CA} \cot \beta + h_{CA} \cot \gamma) + \frac{(h_{CA}^2 - h_s^2)}{2} \cot \beta \quad \dots (3.27)$$

En la zona del flujo totalmente desarrollado, la razón por la cual decrece la velocidad del chorro depende de la forma de este (chorro circular o rectangular).

De la ecuación (3.24), solo se puede asumir que las fuerzas hidrostáticas son iguales si el tirante del flujo aguas abajo de la estructura hidráulica es aproximadamente igual al tirante del colchón de agua, en caso contrario, por ejemplo un chorro inestable, no se puede aplicar este criterio.

3.5 Iniciación de movimiento de la partícula

Un flujo de agua que fluye sobre un lecho compuesto de diferentes tipos de partículas no cohesivas, ejerce fuerzas sobre estas. Dicha fuerza puede ser de tal magnitud, que empieza a moverlas, llamando a esta condición, la condición crítica. Las arenas, gravas y cantos rodados, resisten con su peso la tendencia al movimiento. (Rocha, 1998), (Vanoni, 1975).

Las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la partícula de sedimento son las fuerzas de gravedad (F_W), la fuerza de levantamiento (F_L) perpendicular al fondo del cauce y la fuerza de arrastre (F_D) paralela al cauce. Cuando se está en la condición crítica estas fuerzas tienden a estar en equilibrio. En la figura 3.5 se puede observar la distribución de fuerzas sobre la partícula, la cual yace sobre un lecho cuya pendiente está dada por el ángulo ϕ y θ es el ángulo de reposo del sedimento. Las fuerzas entre partículas son despreciadas, debido que se trata de suelos no cohesivos.

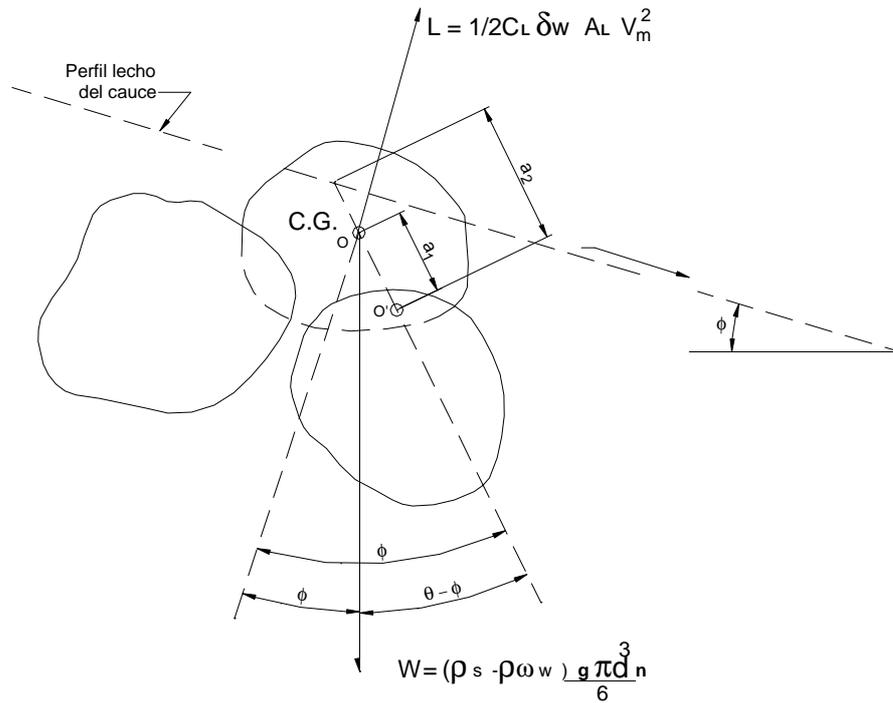


Figura 3.5 Fuerzas que intervienen en la iniciación de movimiento de la partícula.

Tomando momentos en el punto de apoyo (O') entre las dos partículas, tenemos la siguiente expresión:

$$F_w \cos \phi a_1 \sin \theta = F_w \sin \phi a_1 \cos \theta + F_D a_2 \cos \theta + F_L a_1 \sin \theta \quad \dots\dots (3.28)$$

realizando las operaciones y ordenando la expresión tenemos:

$$F_D + F_L \frac{a_1}{a_2} \operatorname{tg} \theta = F_w \frac{a_1}{a_2} (\cos \phi \operatorname{tg} \theta - \sin \phi) \quad \dots\dots (3.29)$$

Como se sabe las fuerzas de sustentación (F_L), arrastre (F_D) y peso (F_w) vienen dadas por las siguientes expresiones (Coronado, 1971):

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_w A V_m^2 \quad \dots\dots (3.30)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w A V_m^2 \dots\dots (3.31)$$

$$F_W = (\rho_s - \rho_w) \frac{g \pi d_n^3}{6} \dots\dots (3.32)$$

Donde:

C_d - Coeficiente de resistencia de arrastre

C_L - Coeficiente de levantamiento

ρ_s - Densidad del sólido

ρ_w - Densidad del fluido (agua)

V_m - Velocidad media del flujo

d_m - Diámetro medio

A - Area de la cara transversal de la partícula $\left(\frac{\pi d_n^2}{4}\right)$

Reemplazando las ecuaciones (3.30), (3.31) y (3.32) en (3.29) se obtiene:

$$\left[\frac{1}{2} C_d \rho_w \left(\frac{\pi d_n^2}{4} \right) V_m^2 \right] + \left[\frac{1}{2} C_L \rho_w \left(\frac{\pi d_n^2}{4} \right) V_m^2 \right] \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \operatorname{tg} \theta = \left[(\rho_s - \rho_w) \left(\frac{g \pi d_n^3}{6} \right) \right] \left(\frac{a_1}{a_2} \right) (\cos \phi \operatorname{tg} \theta - \operatorname{sen} \phi)$$

..... (3.33)

La fuerza de levantamiento depende de un factor de forma y de un Número de Reynolds, de la misma manera que la fuerza de arrastre, por lo tanto el coeficiente de levantamiento puede ser expresado en función del coeficiente de la fuerza de arrastre, como $C_L = p C_D$. El valor del coeficiente "p" varia entre 0.1 y 0.4 (Kuroiwa, 1999).

La expresión de la ecuación (3.33), puede ser simplificada y expresada de la siguiente manera:

$$V_p = V_m = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_m g}{C_d} \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) - 1 \right] \left[\frac{\left(\frac{a_1}{a_2} \right) \cos \phi \operatorname{tg} \theta - \operatorname{sen} \phi}{1 + p \operatorname{tg} \theta \left(\frac{a_1}{a_2} \right)} \right]} \dots\dots\dots (3.34)$$

La partícula que se encuentra dentro de un fluido en movimiento, adopta una velocidad cercana a la velocidad del fluido, por lo tanto la velocidad del fluido expresada en la ecuación (3.34) se asumiría como la velocidad de la partícula. Además, se puede asumir, bajo condiciones críticas, que el esfuerzo de corte crítico (τ_c) dado por la fuerza de arrastre, sea similar a la V_m^2 del fluido cerca al lecho. El coeficiente de arrastre (C_d) depende del número de Reynolds y de la forma de la partícula. De investigaciones anteriormente se ha encontrado que el coeficiente de arrastre para gravas y otras piedras grandes está alrededor de 1.5. Según Vanoni, si la partícula, en condiciones críticas, está sometida a un flujo turbulento, el valor de a_1 se aproxima al valor de a_2 . Por el contrario, cuando actúan fuerzas viscosas, el valor de a_2 se hace mayor que a_1 . De los experimentos de laboratorio, White (1940) encontró que la relación entre a_1/a_2 estaba entre 1.7 y 2.0 veces mayor que en los casos en que el flujo era laminar. Considerando que el esfuerzo cortante crítico tiene un valor constante, determinado para un flujo laminar, luego $a_1/a_2 = 0.18$. Simons y Stevens (1971) asumen que la razón entre a_1/a_2 es igual a la unidad (Kuroiwa, 1999).

3.6 Análisis adimensional - formulación general.

El proceso de erosión debido a la acción erosiva del agua puede ser expresada en función a las variables que intervienen en las tres etapas que fueron descritas en el ítem 3.1; es decir, relacionando propiedades de fluidos y sólidos. Estas variables se pueden expresar en la siguiente relación funcional:

$$F_1 (h_s, H, h_{CA}, z, q, V_i, y_i, \theta_i, d_{50}, d_{85}, g, \rho_s, \rho_w) = 0 \dots\dots\dots (3.35)$$

En la cual F = símbolo de la función, h_s = variable de máxima socavación, ρ_w = densidad del agua y ρ_s = densidad de la partícula, d_{50} = diámetro por el cual el 50% de material pasa y d_{85} = diámetro por el cual el 85% de material pasa.

Ya que la relación funcional representa un fenómeno físico que no depende de las unidades de las dimensiones, de acuerdo al Teorema Π (Barenblatt 1987) (Salas & Lescano, 1965), (Vicenzo & Vito, 2004), la ecuación (3.36) puede ser expresada adimensionalmente del siguiente modo:

$$\Pi_1 = \Phi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}) \quad \dots (3.36)$$

En el cual $\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots, \Pi_9, \Pi_{10}$ son los grupos adimensionales y Φ es el símbolo funcional.

Se escogieron como variables repetitivas y_i, q y ρ_w ; deduciendo los siguientes grupos adimensionales $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, 8, 9, 10)$:

$$\Pi_1 = \frac{hs}{y_i} \quad \dots (3.37)$$

$$\Pi_2 = \frac{H}{y_i} \quad \dots (3.38)$$

$$\Pi_3 = \frac{z}{y_i} \quad \dots (3.39)$$

$$\Pi_4 = \frac{V_1 y_i}{q} \quad \dots (3.40)$$

$$\Pi_5 = \frac{h_{CA}}{y_i} \quad \dots (3.41)$$

$$\Pi_6 = \frac{d_{50}}{y_i} \quad \dots (3.42)$$

$$\Pi_7 = \frac{d_{85}}{y_i} \quad \dots (3.43)$$

$$\Pi_8 = \frac{g y_i^3}{q^2} \quad \dots (3.44)$$

$$\Pi_9 = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \dots (3.45)$$

$$\Pi_{10} = \theta_i \quad \dots (3.46)$$

Tomando la ecuación (3.46), se forma el siguiente grupo

$$\Pi_{10} = \theta_i \quad \rightarrow \quad \Pi_{11} = \text{sen } \theta_i \quad \dots (3.47)$$

Combinando las ecuaciones (3.41) y (3.47), obteniendo el siguiente grupo adimensional:

$$\frac{\Pi_5}{\Pi_{11}} \rightarrow \Pi_{12} = \frac{h_{CA}}{y_i \text{sen } \theta_i} \quad \dots (3.48)$$

Combinando las ecuaciones (3.42) y (3.43), se obtiene el siguiente grupo adimensional:

$$\frac{\Pi_7}{\Pi_6} \rightarrow \Pi_{13} = \frac{d_{85}}{d_{50}} \dots (3.49)$$

Combinando las ecuaciones (3.38) y (3.39), se obtiene el siguiente grupo adimensional:

$$\frac{\Pi_3}{\Pi_2} \rightarrow \Pi_{14} = \frac{z}{H} \dots (3.50)$$

Combinando las ecuaciones (3.40) y (3.44), se obtiene el siguiente grupo adimensional conocido como el Número de Froude:

$$\frac{\Pi_4^2}{\Pi_8} \rightarrow \Pi_{15} = \frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \dots (3.51)$$

Combinando las ecuaciones (3.38) y (3.48), se obtiene el siguiente grupo adimensional

$$\frac{\Pi_2}{\Pi_{12}} \rightarrow \Pi_{16} = \frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen } \theta_i}\right)} \dots (3.52)$$

Combinando la ecuación (3.45), se obtiene el siguiente grupo adimensional:

$$\Pi_9 - 1 \rightarrow \Pi_{17} = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = (G - 1) \dots (3.53)$$

Combinando las ecuaciones (3.39), (3.42), (3.44) y (3.53), se obtiene el siguiente grupo adimensional

$$\frac{1}{\Pi_3} \left(\frac{1}{\Pi_6 \Pi_8 \Pi_{17}} \right) \rightarrow \Pi_{18} = \frac{q}{z((G - 1)gd_{50})^{1/2}} \dots (3.54)$$

Finalmente, la relación funcional (3.36) puede ser re escrita de la siguiente forma:

$$\frac{h_s}{y_i} = \phi \left(\frac{z}{H}, \frac{d_{85}}{d_{50}}, \frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}}, \frac{V_i}{\sqrt{gy_i}}, \frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen}\theta_i}\right)} \right) \dots (3.55)$$

Expresando la relación funcional (3.53) como la ecuación (3.54)

$$\frac{h_s}{y_i} = \alpha \left(\frac{z}{H} \right)^a \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^b \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^c \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^d \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen}\theta_i}\right)} \right)^e \dots (3.56)$$

Donde: α , a , b , c , d y e son constantes numéricas a ser determinadas a través del análisis de regresión múltiple.

La ecuación (3.56) incluye términos del material del lecho, del fluido, del chorro y de la energía de disipación en el colchón de agua.

El parámetro $\left(\frac{z}{H}\right)$ es un indicador que mide la influencia de la energía potencial (z) en la carga total (H). Por lo tanto, cuando esta relación es grande, mayor de 0.5, se espera más profundidad de erosión.

El parámetro adimensional $\left(\frac{d_{85}}{d_{50}}\right)$ es un coeficiente que caracteriza la distribución granulométrica del material del lecho. Para materiales uniformes este coeficiente tiende a la unidad; mientras que para materiales con amplia distribución de tamaños de sedimentos este valor tiende a incrementarse fuertemente. Sobre la elección del diámetro característico no hay un criterio definido entre los investigadores, si usar el d_{50} ó d_{85} ó d_{90} del material.

Otro parámetro adimensional es $\left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}}\right)$, el cual contiene al sub parámetro $((G-1)gd_{50})^{1/2}$ considerado en el análisis de iniciación de movimiento de

una partícula a través del esfuerzo de corte crítico (τ_c). Entre las variables que conforman este análisis tenemos a la gravedad específica del material del lecho (G), como se sabe, este término se considera en las propiedades de resistencia del material del lecho y el tamaño de la partícula con el diámetro d_{50} .

El parámetro que representa el nivel de energía del chorro por unidad de descarga en el contacto con la superficie del colchón de agua es el denominado el Número de Froude del chorro de impacto y viene dado por $\left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)$.

La energía del chorro que llega a la superficie del lecho es un porcentaje de la energía con la que el chorro ingresa al colchón de agua y permanece a lo largo de una distancia $h_{CA} / \text{sen} \theta_i$. Luego el parámetro adimensional que considera la disipación de la energía del chorro dentro del colchón de agua es $\left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen} \theta_i} \right)} \right)$.

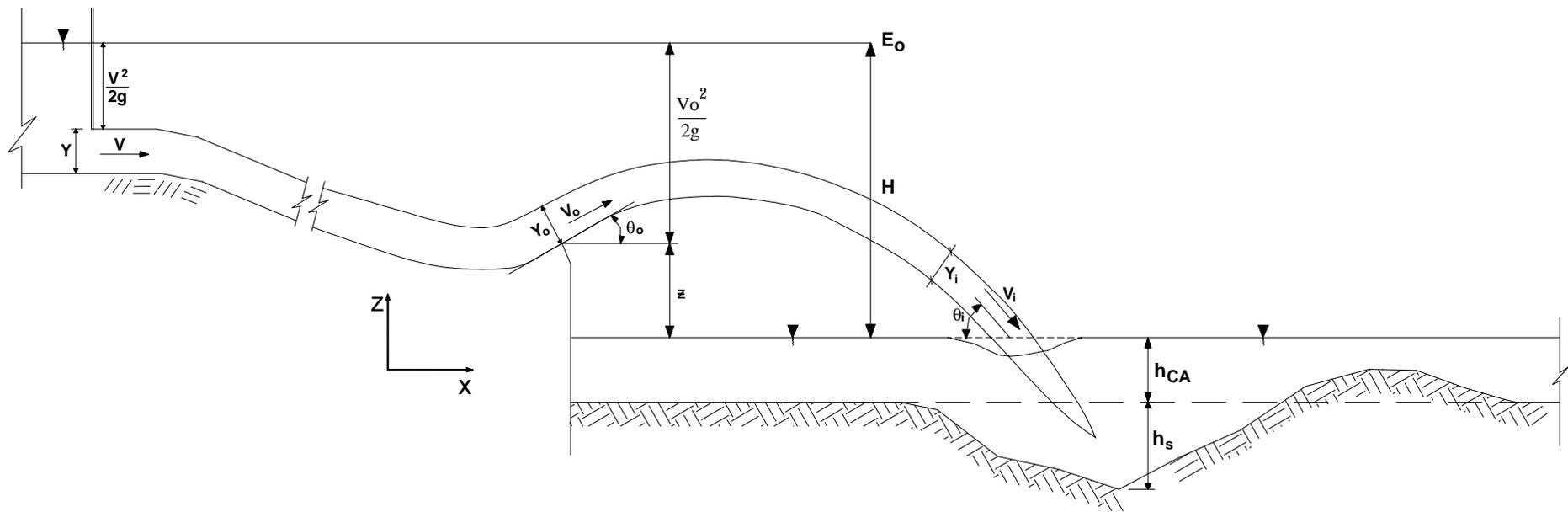


Figura 3.6 Variables consideradas en el Análisis Adimensional.

CAPITULO 4

CONSTRUCCION DEL MODELO, DESCRIPCION DEL EQUIPO Y DESARROLLO DE LAS FASES DE PRUEBAS.

4.1 Construcción del Modelo

A continuación se describen las etapas que comprende el proceso constructivo del modelo físico.

4.1.1 Planeamiento y Diseño

Para la construcción del modelo se ha seleccionado un área a cielo abierto, dentro de la zona de experimentación que posee el Laboratorio Nacional de Hidráulica, ocupando una extensión aproximada de 50 m², como se muestra en la foto 4.1.



Foto 4.1: Proceso constructivo: Vista del replanteo del área del vertedero (rápida) y cuenco.

La delimitación del modelo se realizó bajo las siguientes consideraciones:

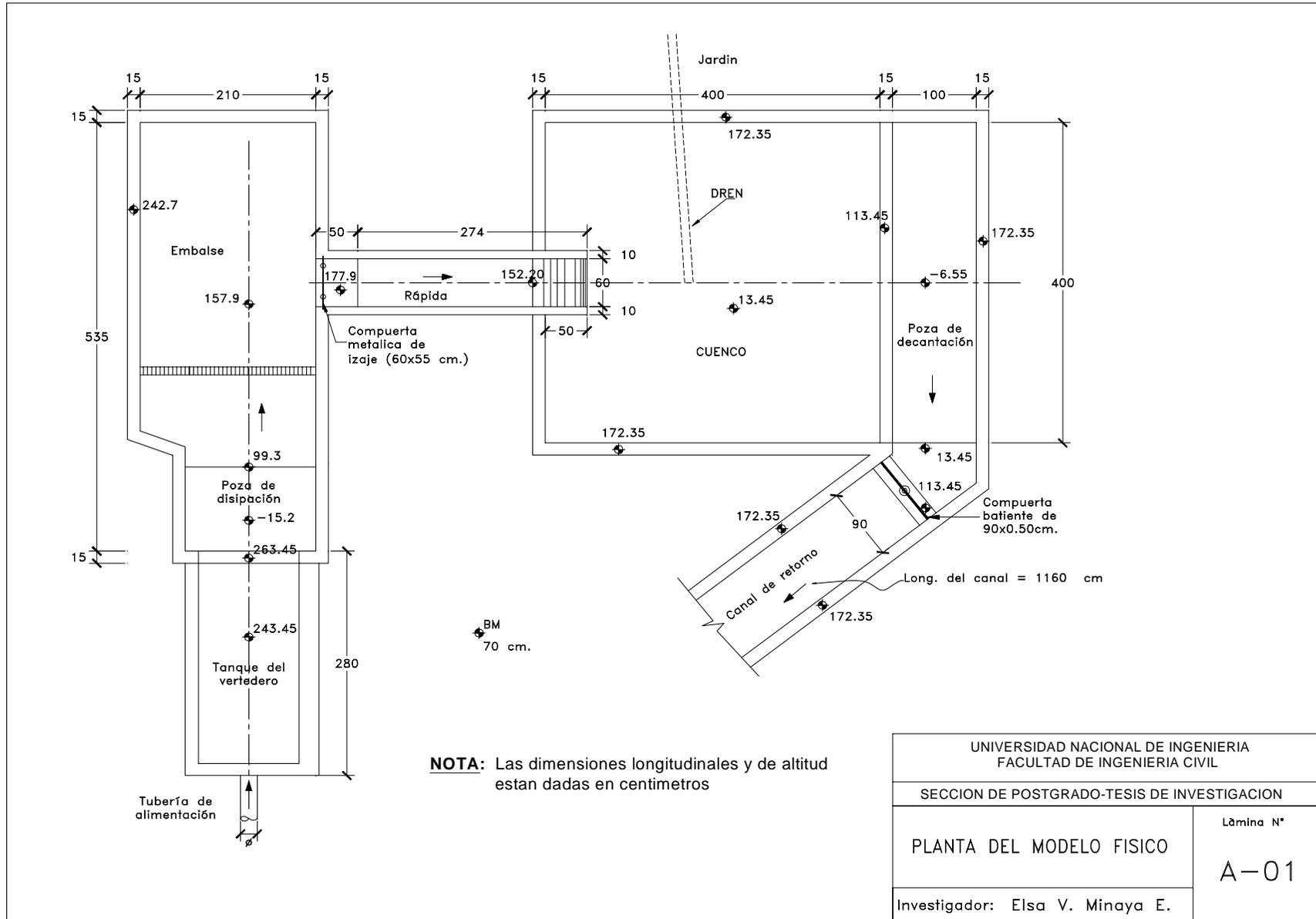
- Se ha representado un embalse de 3,5 m de largo y 1,5 m de ancho, con descarga en rápida y remate en salto de ski. El nivel de agua del embalse se controló con una compuerta metálica plana ubicada al ingreso de la rápida, de 0,60 m de ancho y 0,55 de alto, y con izaje mecánico (Ver Anexo A, Láminas A-01 y A -02).
- Al pie del salto de ski se ha representado la zona del cuenco amortiguador en un área de 4,0 m de ancho por 4,0 m de largo y 1.0 m de profundidad, además una poza de salida de 1,0 m de ancho, 4,0 m de largo y 1.20 m de profundidad. Para controlar el nivel del colchón de agua se colocó una compuerta metálica de 0,80 m de ancho y 0,55 m de alto, del tipo batiente, ubicada a un lado de la poza de salida. (Ver Anexo A, Láminas A-01, A-02 y A-03).
- El lecho que conforma el cuenco fue del tipo *móvil*.

Los trabajos se dividieron en obras de albañilería y obras mecánico eléctricas. En la Lámina A-01 se muestra los límites del área de estudio y en la Lámina A-02 se muestra el perfil en el eje de la rápida del modelo.

4.1.2 Representación de la estructura del prototipo

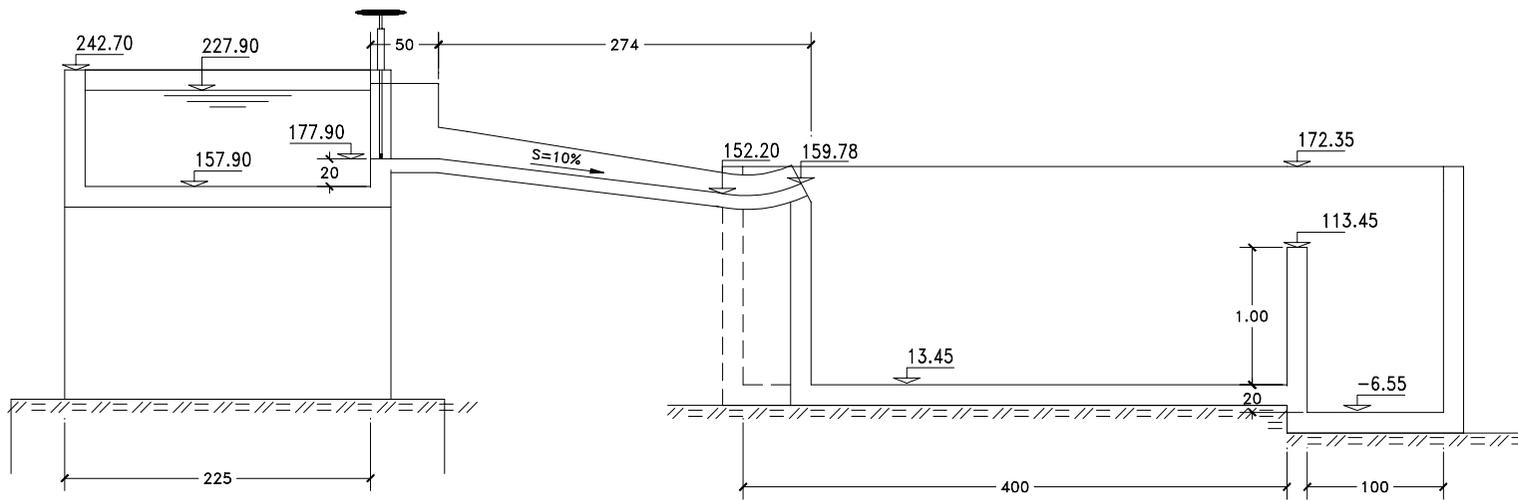
La representación de la rápida y salto de ski se efectuó en base a los planos del aliviadero de compuertas y de la rápida de descarga de la presa Poechos - Proyecto Especial Chira - Piura (PECHP) (Laboratorio Nacional de Hidráulica, 2001). La estructura del vertedero está constituida por una rápida, con pendiente del 10%, al final lleva una estructura tipo salto de ski, con ángulo de 35°. (Ver Lámina A-03).

Estas estructuras fueron construidas con concreto vaciado in situ y en la superficie se dio un acabado del tipo pulido. La compuerta fue confeccionada con planchas metálicas de fierro.

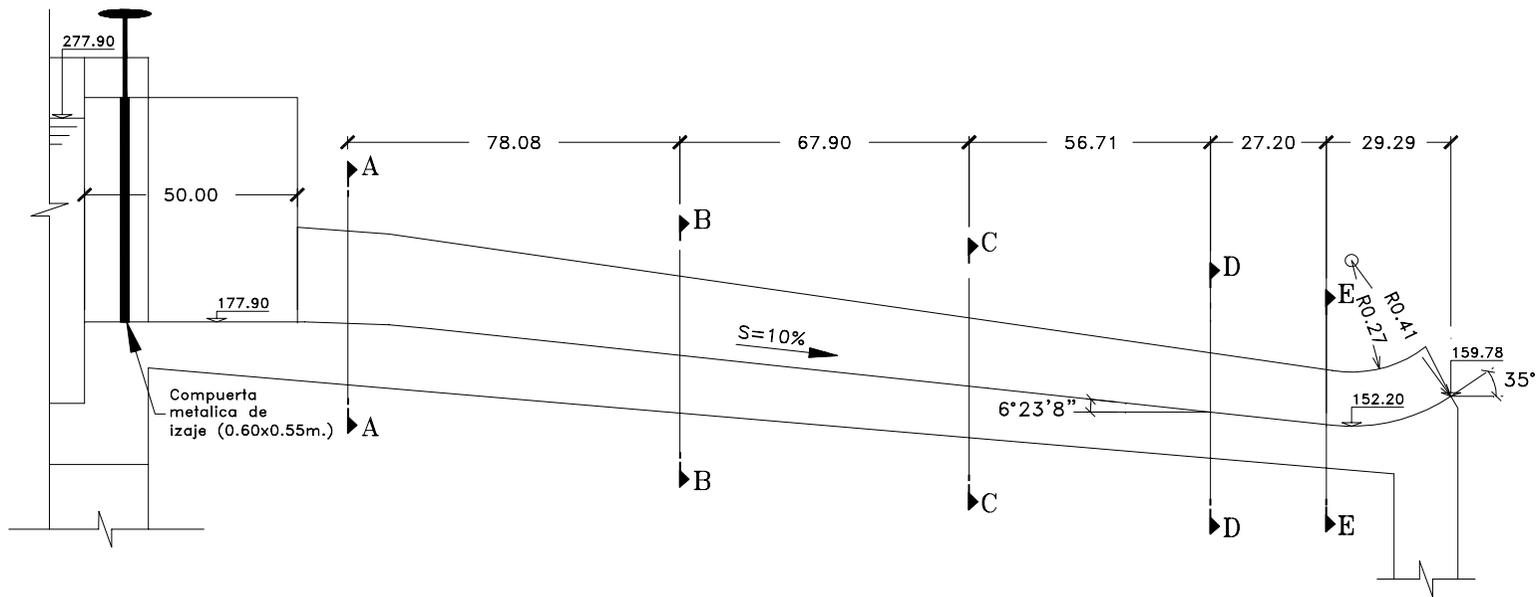


NOTA: Las dimensiones longitudinales y de altitud estan dadas en centímetros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION	
PLANTA DEL MODELO FISICO	Lámina N° A-01
Investigador: Elsa V. Minaya E.	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION	
PERFIL EN EL EJE DE LA RAPIDA	Lamina N° A-02
Investigador: Elsa V. Minaya E.	



NOTA: Las dimensiones longitudinales de altitud estan dadas en centimetros.

REF: DEPECH, LNH (2001).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION	
PERFIL LONGITUDINAL DE LA RAPIDA	Lamina N° A-03
Investigador: Elsa V. Minaya E.	

4.1.3 Instalaciones Auxiliares

El modelo es abastecido desde la cisterna del Laboratorio por medio de 4 bombas centrífugas que impulsan hasta 0.30 m³/s. La tubería de alimentación al modelo se inicia en una válvula de compuerta de 14", ubicada en la tubería vertical de 14" de diámetro a la salida del reservorio elevado de concreto armado de 27m³ de capacidad y cuyo espejo o superficie libre se mantiene constante a 5,80 m.

La tubería de alimentación es de acero de 14" de diámetro interior en una longitud de 30 m, de ella nace la tubería de 8", la cual termina alimentando a un tanque metálico de aforos.

La regulación del caudal en el tanque de aforos se realiza mediante una válvula de compuerta de 8" que controla la alimentación del modelo que actúa como válvula general de corte.

En el tanque metálico se ha instalado un vertedero triangular de bronce para medir caudales, el cual está provisto de un limnómetro de gancho tipo Neypric para la lectura de cargas, que permite medir niveles con 0,1 mm de precisión.

Con el objeto de afinar el control de los caudales en la tubería de acceso se instaló una tubería by-pass de 4" provista de una válvula de compuerta.

Se construyó una poza de decantación con la finalidad de retener el sedimento transportado por el flujo. Las aguas vuelven a la cisterna por un canal de retorno construido en concreto, de sección rectangular (Ver Anexo Foto N° 05).

Aguas abajo del modelo, a la salida de la poza de decantación e ingreso al canal de retorno se ha instalado una compuerta con la cual se mantendrá el nivel del colchón de agua del cuenco (Ver Anexo Foto N° 05).

4.1.4 Detalles del proceso constructivo

Los trabajos empezaron con la limpieza del área seleccionada, para luego seguir con la delimitación del modelo mediante muros perimetrales de ladrillo y mortero de cemento-arena, revestidos con tarrajeo pulido para evitar la filtración del agua, como se muestra en la Foto 4.1.

El modelo se levantó sobre una losa de concreto de 0,15 m de espesor, para conseguir la impermeabilización del fondo.

Para el control altimétrico se estableció un BM en las proximidades del modelo, con cota 70,00 cm. Dada la precisión que se requiere en este tipo de trabajos, el control vertical se realizó empleando un nivel y una mira metálica con graduación al milímetro.

En la siguiente foto se muestra el modelo terminado, al fondo se observa tanque del vertedero triangular de 90°, la poza de almacenamiento, la rápida con terminal en ski y su compuerta plana, poza del cuenco y la compuerta del canal de retorno.



Foto 4.2: Vista panorámica del modelo físico

4.2 Equipo para la adquisición de datos y desarrollo de las pruebas

4.2.1 Ingreso y medición de caudales.

El vertedero que se ha considerado para la medición de las descargas es un vertedero tipo pared delgada, en forma de V con ángulo de 90°. Los niveles de la carga "h" son medidos en el limnómetro, el cual va colocado a un lado del tanque del vertedero. Dicho instrumento previamente ha sido nivelado respecto al vértice del triángulo, es decir en el limnómetro se colocó el cero respectivo. La ecuación (4.1) determina la descarga para estos vertederos triangulares:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_D h^{\frac{5}{2}} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

donde:

- Q = Descarga (m³/s)
- C_D = Coeficiente de descarga (adimensional)
- h = Carga de agua respecto al vértice del vertedero triangular (m).
- g = Aceleración debido a la gravedad (m/s²)

Las descargas que se usaron en la investigación fueron: 0,020 m³/s (20 L/s), 0,040 m³/s (40 L/s) y 0,060 m³/s (60 L/s). De acuerdo a estos datos se determinó la carga "h" en el vertedero, para ello de la ecuación (1), despejamos "h", obteniendo la ecuación (4.2);

$$h = \left(\frac{15}{8} \frac{Q}{C_D \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Con la ecuación 4.2 y los valores de C_D (tabla N°2.1- Albertson-Dai-Rouse,1950), obtenemos el cuadro 4.1., con la cual se controló los caudales que se utilizaron en el modelo.

Cuadro 4.1. Caudales utilizados en las pruebas

Q (m ³ /s)	Q (L/s)	h (mm)
0.020	20	183.20
0.040	40	285.10
0.060	60	319.60

Adicionalmente, para comprobar los caudales que ingresan a la rápida, en el marco de la compuerta se ha instalado una cinta métrica que permitió medir la abertura de ésta y con la relación de velocidad en un orificio ($V = C_v \sqrt{2g\Delta h}$, donde $C_v \cong 1$) (Rouse, Hunter, 1951) se determinó el caudal.

4.2.2 Equipo para toma de datos de velocidades

Para la toma de datos de la velocidad del flujo en el cuenco se ha utilizado un correntómetro de copas, TU - 5566, cuya ecuación de calibración es:

$$V = 0.30N + 0.0242 \pm 0.019 \dots\dots (4.3)$$

donde:

N = Número de vueltas / 30s

V = Velocidad (m/s)

4.2.3 Instrumento para la toma de velocidades en la estructura de la rápida y del ski.

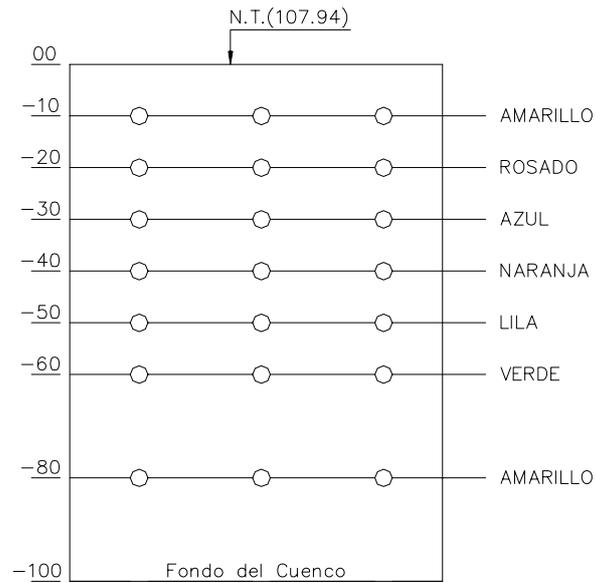
Para obtener las velocidades que se presentan en la rápida y a la salida del ski se ha utilizado un *Tubo de Pitot*. Este instrumento ha sido colocado sobre la ranura del labio del ski, siguiendo la inclinación del trampolín y en la dirección del flujo. Luego se tomó lectura del valor de Δh y con la ecuación de la velocidad en un orificio, se obtuvo la velocidad de salida del chorro.

4.2.4 Acondicionamiento del cuenco

Así mismo se dibujaron las reglas limnimétricas, al centímetro, en la zona del embalse (0 cm - 50 cm), donde se mantendrá una carga de agua de 50 cm y en el cuenco (0 cm - 60), donde se hará variar el colchón de agua de 5 cm hasta 50 cm,

medidos a partir del nivel 107,94 cm, que indica la superficie del suelo. (Ver Anexo Foto N° 06)

Para determinar visualmente si el proceso erosivo ha llegado a la estabilizarse, se decidió colocar por capas bolas de plástico (tipo ping - pong) de distintos colores. A continuación se muestra el esquema de su colocación:



* Cotas dadas en centímetros.

Figura 4.1 Colocación de bolas de colores en el cuenco.

En la Foto 4.3 se observa la colocación de las bolas de color en tres ejes paralelos a la rápida. La exposición de estas bolas indicará la profundidad que va alcanzando la erosión.



Foto 4.3: Vista de la colocación de bolas amarillas a 10 cm. de la superficie del lecho del cuenco (00.0 cm).

4.3 Procedimiento general para la ejecución de las pruebas

4.3.1 Representación del material del lecho o cuenco

Se utilizaron tres tipos diferentes de materiales para la investigación: arenas gruesas, grava media y roca. Para identificarlas se trabajó con los diámetros d_{50} y d_{85} .

Se hicieron varias pruebas de granulometría con cada uno de los materiales, de modo de obtener los valores d_{50} y d_{85} representativos.

El material utilizado en la Fase I fue arena gruesa con $d_{50} = 1,60$ mm, $d_{85} = 4.81$ mm y $d_{90} = 5,96$ mm (ver Anexo F- Fig. F-0A y Foto N° 4.5), para la Fase II se utilizó la grava media con $d_{50} = 17,88$ mm, $d_{85} = 23.43$ mm y $d_{90} = 24,22$ mm la forma de la roca fue del tipo angulosa (ver Anexo F - Fig. F- 0B y foto N°4.6), y finalmente, para la Fase III fue roca con $d_{50} = 49,08$ mm, $d_{85} = 70.53$ mm y $d_{90} = 70,53$ mm, la forma de esta fue tipo redondeada, denominada canto rodado (Ver Anexo F - Fig. F-0C).

En la Fase I, por ser el material del tipo fino, fue necesario determinar la densidad del suelo. Es decir, una vez colocado y compactado por capas se hizo la prueba del Cono de Arena (Ver Anexo Foto N° 10). Esta labor estuvo a cargo del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería.

En las fotos 4.4, 4.5 y 4.6 se observan los materiales del lecho utilizados en las Fases I, II y III.



Fase I: Arena Gruesa



Fase II: Grava Media



Fase III: Canto Rodado

4.3.2 Matriz de pruebas

Para el desarrollo de los ensayos de investigación se han adoptado como variables el caudal (Q), el colchón de agua (h_{CA}) y la granulometría del material (d_{50} y d_{85}). Así mismo, se han considerado como constantes la carga de agua en el embalse, 0.50 m; el ángulo de salida del chorro, 34.9° , debido a que el ski ha sido construido con el ángulo mencionado.

En base a estas consideraciones generales se ha planteado la matriz de pruebas, considerando tres fases; cada fase corresponde a un tipo de granulometría, en la cual se alterna el caudal para distintas alturas del colchón de agua y así sucesivamente, haciendo un total de 36 pruebas, como se muestra en el Cuadro 4.2., de la Matriz de Pruebas.

En las pruebas de investigación se realizaron las siguientes mediciones:

- Nivel de agua en el reservorio.
- Caudal de ingreso.
- Velocidades a la salida del ski.
- Características del chorro (ángulo de incidencia, longitud del salto, altura de la cresta, velocidad con la que incide el chorro)
- Características hidráulicas del flujo aguas abajo del salto de ski (patrón de flujo, vórtices, concentración del flujo).
- Medición de velocidades en el cuenco amortiguador en magnitud y dirección.
- Tiempo en el cual se estabiliza el proceso erosivo en el cuenco.
- Forma y parámetros de erosión en el cuenco amortiguador

Cuadro 4.2. Matriz de Pruebas

Fase	Prueba	Q (m3/s)	h_{CA} (m)	d_{50} (mm)	d_{85} (mm)	Variables
I	1	0.02	0.10	1.60	4.81	Chorro: A.I. : Angulo de Incidencia Ls : Longitud del salto Hc : Altura de la cresta respecto a la cota del ski. Vr : Velocidad en la rápida Vi : Velocidad de incidencia Cuenco: T : Tiempo de erosión (estabilización del hueco). Z : Distancia entre el nivel de agua en el colchón de agua y el labio del ski . Vc : Velocidad en el cuenco Bat. : Levantamiento topográfico del cuenco después de la prueba.
	2	0.02	0.25	1.60	4.81	
	3	0.02	0.50	1.60	4.81	
	4	0.02	0.05	1.60	4.81	
	5	0.04	0.05	1.60	4.81	
	6	0.04	0.10	1.60	4.81	
	7	0.04	0.25	1.60	4.81	
	8	0.04	0.50	1.60	4.81	
	9	0.06	0.05	1.60	4.81	
	10	0.06	0.10	1.60	4.81	
	11	0.06	0.25	1.60	4.81	
	12	0.06	0.50	1.6	4.81	
II	1	0.02	0.05	17.88	23.43	
	2	0.02	0.10	17.88	23.43	
	3	0.02	0.25	17.88	23.43	
	4	0.02	0.50	17.88	23.43	
	5	0.04	0.05	17.88	23.43	
	6	0.04	0.10	17.88	23.43	
	7	0.04	0.50	17.88	23.43	
	8	0.04	0.25	17.88	23.43	
	9	0.06	0.05	17.88	23.43	
	10	0.06	0.10	17.88	23.43	
	11	0.06	0.25	17.88	23.43	
	12	0.06	0.50	17.88	23.43	
III	1	0.02	0.05	49.08	70.53	
	2	0.02	0.10	49.08	70.53	
	3	0.02	0.25	49.08	70.53	
	4	0.02	0.50	49.08	70.53	
	5	0.04	0.50	49.08	70.53	
	6	0.04	0.05	49.08	70.53	
	7	0.04	0.10	49.08	70.53	
	8	0.04	0.25	49.08	70.53	
	9	0.06	0.05	49.08	70.53	
	10	0.06	0.50	49.08	70.53	
	11	0.06	0.25	49.08	70.53	
	12	0.06	0.10	49.08	70.53	

4.3.3 Prueba de ajuste

La prueba de ajuste consistió en medir las velocidades del flujo en la rápida y compararlas con las teóricas. El cuenco fue llenado de agua y trabajaba como piscina. Las velocidades fueron medidas con un Tubo de Pitot, éste permite registrar velocidades del orden de 2 m/s a 4 m/s. Para la obtención de datos se optó por subdividir la rápida en cinco secciones transversales al eje, denominadas A, B, C, D. y E. Así mismo, en cada sección se registraron tres lecturas, dichos puntos fueron ubicados en el punto central de cada tercio. Los caudales que se ensayaron fueron 0.020 m³/s (20 L/s), 0.040 m³/s (40 L/s) y 0.060 m³/s (60 L/s). Los valores registrados difieren de los teóricos, en promedio, entre 10% a 20%. Cabe indicar que este tipo de información se repite en las siguientes pruebas, con la finalidad de ajustar el error.

4.3.4 Descripción general del proceso de ejecución de las pruebas realizadas en las Fases I, II y III

El proceso de ejecución de las 36 pruebas, agrupadas de acuerdo al tipo de material en tres Fases como se muestra en el Cuadro 4.2, fue similar y a continuación se describe brevemente:

- Condiciones iniciales. Están referidas a los valores iniciales de las variables del flujo: caudal Q, colchón de agua h_{CA} y el material del cauce granular no cohesivo correspondiente a cada Fase.
- El cuenco se llenaba colocando el material correspondiente a cada Fase, dejando el cauce al nivel de 107,94 cm. Para la Fase I, el material fue colocado en capas de 0,10 m y compactada con 3 golpes, con un pisón de 10 Kg, hasta alcanzar un espesor de 1,0 m. Para la Fase II, el material gravoso se colocó en espesores de 0,10 m acomodado con rastrillo hasta alcanzar un espesor de 0,60 m. Finalmente, el material tipo boleó de la Fase III, se colocó en un espesor de 0.40 m, también por capas de 0,10 cm y acomodado con rastrillo. Posteriormente, la poza de salida era llenada con agua hasta el nivel 107,94 cm para que luego entrara al lecho del cuenco suavemente, con la finalidad de reproducir la altura del colchón de agua que se requería según la prueba. Cabe indicar que el nivel del colchón de agua era controlado con la compuerta de salida, ubicada entre la poza de salida y el canal de retorno.

- Paralelamente, se llenaba el reservorio hasta el nivel 227.90 cm. Dando inicio a la prueba abriendo la compuerta de ingreso hasta una altura correspondiente al gasto o caudal de ingreso y manteniendo el nivel de agua en el reservorio en la cota mencionada. El tiempo se controlaba con un cronómetro. El tiempo total de cada prueba fue de dos horas aproximadamente.
- En primer lugar se registraba la profundidad de erosión respecto al tiempo, para ello se tomaba lectura del tiempo en que se descubrían en la superficie del cuenco las bolas de color que se habían colocado en los estratos. Este proceso demoraba, de acuerdo al material que se ensayaba, entre 15 y 30 minutos. La foto 4.7 muestra las bolas de color amarillo y rosado que emergieron a la superficie debido al proceso de erosión. (Ver Anexo E)



Foto 4.7: Fase I - Prueba 9. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60\text{mm}$ y $d_{85} = 4.81\text{mm}$. Se observa las bolas rosadas lo cual indica que la erosión ha llegado a 20 cm de profundidad, aproximadamente.

- Posteriormente se daba inicio a la toma de velocidades en el cuenco, de acuerdo a la cuadrícula, de 30 x 30 cm, trazada en el cuenco, como se muestra en las láminas del Anexo D. La foto 4.8 muestra el equipo del correntómetro de copas y veleta que indica la dirección del flujo, con el equipo se registran los datos de velocidad del flujo. Este proceso demoraba aproximadamente una hora.



Foto 4.8: Fase II - Prueba 5. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88$ y $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$). Vista de la toma de velocidad en la zona de impacto (en el eje).

- Paralelamente se observaba el comportamiento del patrón de flujo que se originaba debido al impacto del chorro de agua con el colchón de agua. Este patrón daba lugar a la formación de tres corrientes, dos de ellas forman vórtices, uno con sentido antihorario y ubicado a la izquierda de la rápida (en el sentido del flujo) y el otro a la derecha de la misma referencia, con sentido horario y finalmente la tercera corriente que continuaba hacia aguas abajo. La intensidad de cada uno de ellos

dependía del material del lecho, del caudal y de la altura de colchón de agua. La Foto 4.9 muestra el patrón de flujo. (Ver Anexo D).



Foto 4.9: Fase I - Prueba 10 ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$ y $d_{85} = 4.81 \text{ mm}$). Se observa la distribución de las líneas de corriente en el momento del impacto del chorro con el colchón de agua.

- También se observaba el comportamiento del chorro de agua que salía por la rápida con salto de ski, midiéndolo tanto de las velocidades en el labio del ski (este registro se hacía con un Tubo de Pitot), como se muestra en la siguiente foto; así como también la longitud del salto, la cota de la cresta, el ángulo de incidencia, para este registro se utilizaba un transportador fabricado en acrílico y finalmente el ancho del chorro cerca de la zona de impacto. La Foto 4.10. muestra la toma de datos de velocidad en el labio del ski de la rápida. (Ver Anexo B)



Foto 4.10: Fase I – Prueba 7 ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$ y $d_{85} = 4.81 \text{ mm}$). Toma de datos de velocidad en el labio del ski, con el Tubo de Pitot, en tres ejes en planta y en cada eje a dos profundidades.

- Una vez finalizada cada prueba se descargaba lentamente el agua del cuenco, para ello se abría la compuerta de salida y un subdren ubicado en el fondo del cuenco. Posteriormente se procedía al levantamiento batimétrico del cuenco, de acuerdo a la cuadrícula colocada en el mismo y en la zona de la poza de erosión así como también en sus alrededores de acuerdo al cambio del relieve del lecho. Las Fotos 4.11, 4.12 y 4.13 muestran el hoyo de erosión en el cuenco después de dos horas de prueba. (Ver Anexo G).



Foto 4.11: Fase I - Prueba 11($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mmy}$ $d_{85} = 4.81 \text{ mm}$). Vista del pozo de erosión después de 2 horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.349 m.



Foto 4.12: Fase II - Prueba 5. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$ y $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.273 m.



Foto 4.13: Fase III - Prueba 9 ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$ $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$ y $d_{85} = 70.53 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.166 m .

CAPITULO 5

DATOS RECOLECTADOS.

5.1 Generalidades

El presente estudio de investigación se desarrolló entre los meses de Marzo y Junio de 2003 utilizando un modelo físico construido en el área cedida por el Laboratorio Nacional de Hidráulica. Estuvo a cargo de los Investigadores de la especialidad de Hidráulica de la Sección de Postgrado de la facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

La etapa de campo consistió en desarrollar 36 pruebas de acuerdo a las condiciones mencionadas en el capítulo 4 y en el Cuadro 4.2; siguiendo el procedimiento para el registro de datos descrito en el ítem 4.3.1.

5.2 Velocidades en la Estructura del Vertedero

5.2.1 Velocidades en la Rápida

La estructura del vertedero tipo rápida presenta una pendiente de 10,2% y una longitud horizontal de 2.74 m como se puede apreciar en el Anexo A, Lámina A-O3.

Para el registro de velocidades en la rápida se optó por seleccionar cinco secciones A, B, C, D y E. Así mismo, dentro del canal de la rápida se trazaron tres ejes paralelos al eje longitudinal de la misma denominados: eje derecho, eje central y eje izquierdo, como se muestra en la Figura 5.1. Los datos se registraron con un Tubo de Pitot, esto por el tipo de flujo supercrítico que se registra en la rápida. En el Anexo B, se presentan los cuadros B.1, B.2 y B.3, los cuales contienen los valores de las velocidades en la rápida, obtenidas con la relación de velocidad a la salida de un orificio, $V = (2gh)^{1/2}$, donde "h" es la altura leídas con el Tubo de Pitot.

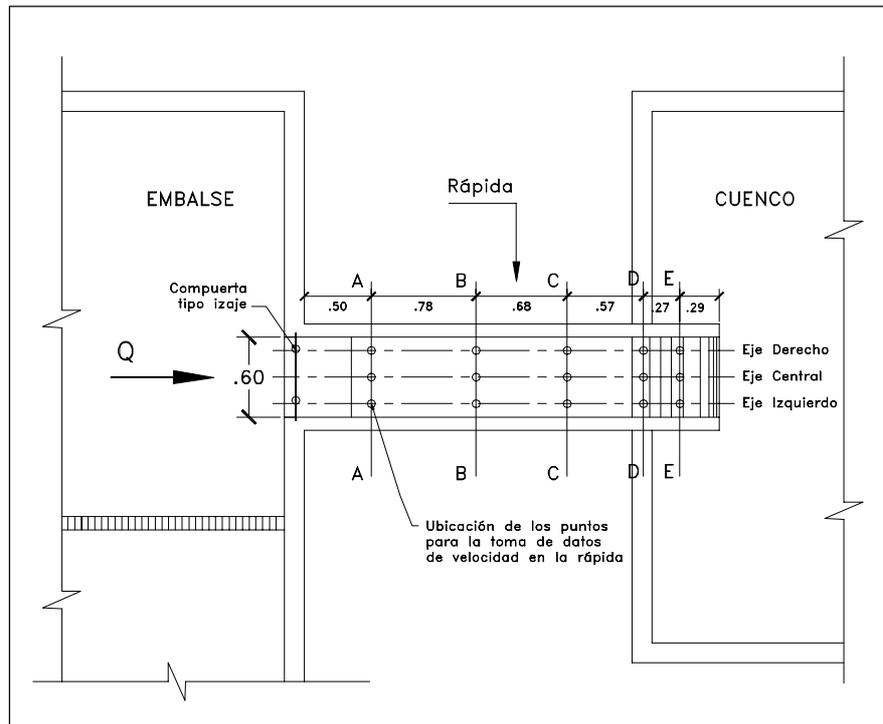


Figura 5.1 Esquema de toma de datos en la rápida.

5.2.2 Velocidades en el Labio del Ski

El terminal tipo trampolín o salto de ski, modelado para la investigación, presenta un radio de 0,41 m. Además, el ángulo que hace el labio del ski con la horizontal es de 35°. Para conocer la velocidad de salida del chorro de agua del trampolín se optó por registrar las velocidades del flujo en los tres ejes paralelos al eje de la rápida, según esquema de la Figura 5.1. Las mediciones se efectuaron con el Tubo de Pitot, orientándolo perpendicularmente a la dirección del flujo. Así mismo, las velocidades se registraron a 0,2 y 0,8 del tirante del chorro.

En el Anexo B, los cuadros B.7, B.8 y B.9 muestran los datos obtenidos. Se observa que para el caudal de 0.020 m³/s (20 L/s) la velocidad es de 1,2 m/s; para 0.040 m³/s (40 L/s) es de 1,8 m/s y para 0.060 m³/s (60 L/s) es de 2,1 m/s. (Ver Anexo I - Foto N°17).

5.3 Características del Chorro

El chorro de agua que sale por la estructura del vertedero tipo rápida con terminal tipo trampolín o salto de ski, presenta las siguientes características:

- Es un chorro compacto que por no alcanzar velocidades mas altas no llega ha atrapar aire. No presenta una expansión significativa del mismo.
- No es totalmente simétrico, debido a la ubicación de la rápida con el embalse, para caudales menores a $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$ (20 L/s) se observa que el flujo tiende hacer un mayor tirante hacia el lado derecho de la rápida y para caudales mayores se observa que el tirante se uniformiza, siendo leve la tendencia hacia el lado mencionado anteriormente.
- El chorro de agua a la salida mantiene el ángulo de salida del labio del ski que hace con la horizontal. El eje central del chorro describe una trayectoria tipo parábola, para caudales del orden de $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$ (60 L/s) se midió la longitud horizontal de la trayectoria y está en el orden de 1,15 m, para $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ (40 L/s) es de 1,1 m y para $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$ (20 L/s) es de 0,7 m.
- Otro dato que se tomó fue el de la cota de la cresta de la parábola y haciendo la diferencia con la cota del labio del skí, se puede determinar el parámetro "z" de la trayectoria del chorro, teoría presentada en el capitulo 3. El análisis teórico y práctico será desarrollado en el capitulo 6.
- Finalmente, se midió el ángulo de incidencia; es decir, el ángulo que hace el eje central del chorro con la vertical en el punto de contacto con el colchón de agua. Esta tarea se realizó con el transportador de acrílico, como se puede ver en el Anexo I - Foto N°27. Este equipo tiene su propio nivel luego el técnico lo mantiene nivelado y en ese momento se lee el ángulo de hace el borde superior del chorro, Posteriormente, en gabinete la foto es escaneada y se lleva el eje medido en campo al eje del chorro, verificando y corrigiendo el ángulo medido en campo. Así tenemos que los ángulos medidos para los caudales de $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$ (20 L/s), $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ (40 L/s) y $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$ (60 L/s) y colchones de agua de 0,05 m y 0.10 m., el ángulo oscila entre 49° y 50° . Para los mismos caudales, pero con colchones de agua de 0,25 m, el ángulo oscila entre 44° y 45° , y para colchones de agua de 0,50 m, los ángulos observados midieron entre 20° y 21° . (Ver Anexo C, Cuadro C.1)

5.4 Características Físicas del Tipo de Suelos Ensayados

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la profundidad de erosión debido a un chorro de agua, pero con tres diferentes tipos de materiales en la zona de impacto; es decir, con diferente diámetro representativo, que se seleccionó con el d_{50} . Los tres tipos de granulometrías ensayados fueron: la primera correspondiente a una arena gruesa, la segunda, grava media y la tercera, canto rodado. En el cuadro 5.1 se muestra un resumen de las características físicas de los materiales utilizados para el ensayo. En el Anexo F se muestran los resultados de los análisis de mecánica de suelos (granulometría, gravedad específica, peso unitario) realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Para el caso de la arena, previo al inicio de las pruebas se realizó una prueba de densidad de campo seca, estuvo también a cargo del Laboratorio de Mecánica de Suelos. La prueba se realizó para conocer el grado de compactación del suelo con el que se trabajaba y ver la influencia de la compactación en el proceso de erosión debido al impacto del chorro de agua. Del análisis, la máxima densidad seca de la arena es de $1,996 \text{ gr/cm}^3$, para un óptimo contenido de humedad de 8.6%.

Cuadro 5.1 Características Físicas

Característica Física	Tipo de Material		
	Arena	Grava	Boleo
d_{50} (mm)	1,60	17.88	49.08
d_{85} (mm)	4.81	23.43	70.53
d_{90} (mm)	5.96	24.22	70.53
Gravedad Específica (G)	2,73	2,76	2,66
Peso Unitario Suelto (gr/cm^3)	1,577	1,364	1,595

De la profundidad de erosión medida en cada prueba, de las tres fases, se observó, la influencia del diámetro y peso de la partícula en el proceso de erosión investigado. La teoría sobre la iniciación al movimiento de una partícula, nos dice que esta se presenta cuando la fuerza tractiva (τ_o) es mayor a la fuerza tractiva crítica ($\tau_o)_c$. La fuerza tractiva es una propiedad del flujo, mientras que la fuerza

tractiva crítica está en función al diámetro y para el caso de turbulencia desarrollada, la fuerza tractiva crítica se expresa como: $(\tau_o)_c = K^*(\gamma_s - \gamma)*d$, donde: K , es un factor dado por cada investigador; γ_s , es el peso específico del sólido; γ , es el peso específico del agua y d , es el diámetro de la partícula. Esta teoría explica porque para suelos finos, como la arena que tiene menor peso y diámetro que los suelos gravosos, su resistencia a ser movida es menor que la de suelos gruesos, y a su vez, este análisis se repite entre la grava y el canto rodado por presentar menor peso y diámetro que este último. En el Anexo G, cuadro G.1, se muestran los resultados de la profundidad de erosión para cada prueba ensayada.

Se tomó una muestra del material de canto rodado de la Fase III, para obtener su Factor de Forma, ya que la roca era redondeada. Los datos registrados fueron las dimensiones "a", "b" y "c", luego se utilizó la relación $F.F. = \frac{c}{\sqrt{ab}}$ (Rocha, 1998; Jullien P., 1995) obteniéndose el valor de 0.6.

5.5 Variación del Colchón de Agua

Como se manifestó anteriormente, el espesor del colchón de agua es una variable determinante de la profundidad de socavación del lecho. En tal sentido, se decidió trabajar con cuatro valores representativos: dos espesores pequeños de 0,05 m y 0,10 m, un espesor intermedio de 0,25 m y uno de 0,50 m, este último supuestamente debía absorber la energía del chorro de agua. La elección de estos valores estuvo en función de la disponibilidad de altura que existía entre el labio del ski y el lecho del cuenco, la cual era de 0,50 m.

Durante las pruebas se pudo apreciar que para alturas pequeñas de colchón de agua, la energía del chorro no era disipada en éste, por lo tanto la profundidad de erosión fue mayor; mientras que para mayores alturas de agua, el colchón cumplía la función de disipador de la energía del chorro de agua, obteniéndose valores de profundidad de erosión menor o casi nulos, en este último caso, la influencia del diámetro de la partícula también se debe considerar. En general, existe una altura de colchón de agua que permite la disipación de la energía del chorro. Así mismo, se pudo observar durante las pruebas que la altura inicial de los colchones de agua de 0,05 m y 0,010m no se mantenían, llegando después de un tiempo a

estabilizarse en 15 cm aproximadamente. Esta altura de colchón de agua se debe a que el material erosionado del lecho es depositado aguas abajo del hoyo, dando origen a que se forme una barra o jiba. Por ejemplo, con el lecho arenoso, la barra se forma en un tiempo menor que la grava y esta a su vez menor que el canto rodado.

5.6 El Tiempo en el Proceso de Erosión

En el presente trabajo se midieron las dimensiones de erosión durante todo el tiempo hasta llegar al equilibrio. Para esta medición se ubicaron bolas (tipo Ping-Pong) de colores a diferentes profundidades, como se mostró en la figura 4.1 del Capítulo 4 (Perfil) y en planta como se muestra en la Figura 5.2:

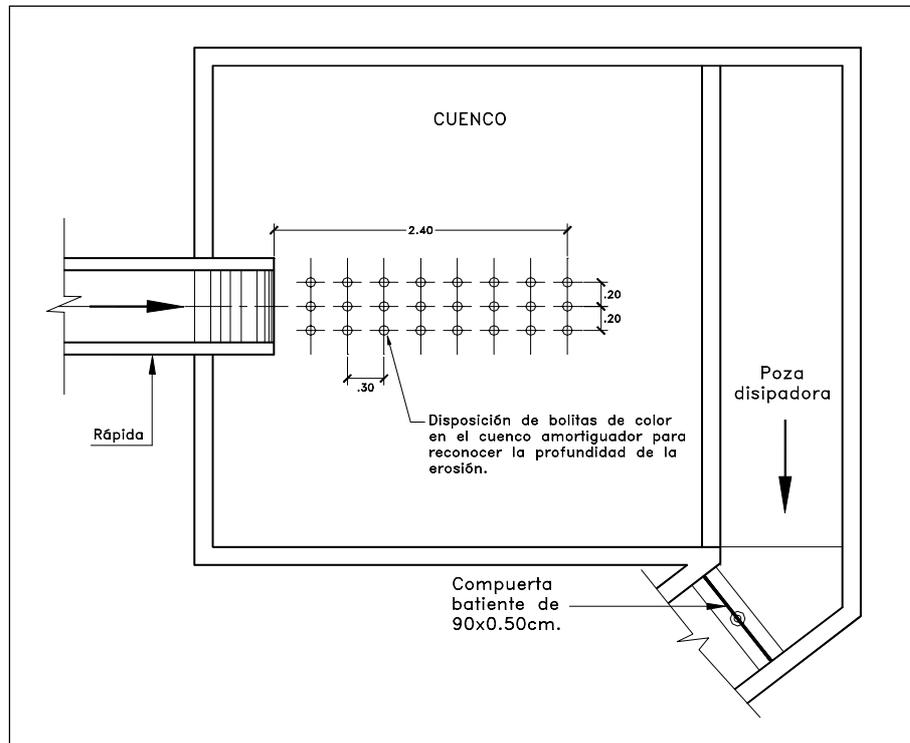


Figura 5.2 Esquema de colocación en planta de bolas de color en el cuenco

Se observó que el tiempo de erosión depende del diámetro de la partícula, de la profundidad del colchón de agua, del caudal y la velocidad de salida del chorro en el ski. En general, durante los primeros 5 a 10 minutos de la prueba se llegaba a los 20 cm y 30 cm de profundidad, siendo este el caso de la Fase I y II, para colchones de agua de 0,05 y 0,10 m y caudales de 0.040 m³/s (40 L/s) a 0.060 m³/s

(60 L/s). De modo similar, se observó en la Fase III, que a los 6 a 15 minutos de la prueba se llegaba a los 20 cm de profundidad. Cabe indicar que el tiempo de duración de la prueba fue de 2 horas (120 minutos). Los datos registrados se muestran en el Anexo E.

5.7 Velocidades en el Cuenco Amortiguador

La investigación comprendió las mediciones de la velocidad media del flujo en el impacto en el agua, la distribución de velocidades en el eje del chorro que se disipa; así como la dirección del flujo en cada punto. Para obtener estos valores, se optó por crear una cuadrícula en el cuenco, trazando ejes paralelos al eje de la rápida cada 0,15 m, con el valor cero en el eje de la rápida y ejes perpendiculares a estos también cada 0,15 m., encontrándose el eje 0+050 en la pared de la cara externa de la rápida, como se muestra en la Figura 5.3.

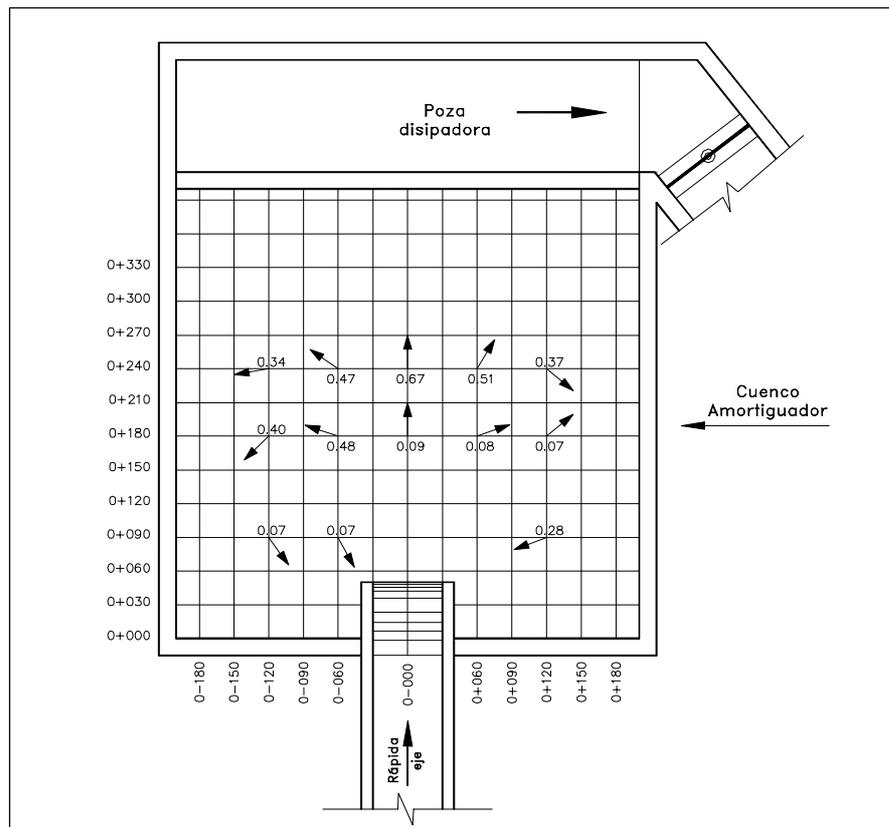


Figura 5.3 Esquema del Patrón de Flujo en el Cuenco.

5.8 Forma del Hoyo de Erosión

El hoyo de erosión presentó diferentes formas debido al tamaño y forma de las partículas. Así para la arena gruesa, el hoyo muestra una longitud en el eje focal de la elipse (sección transversal que se observa en la parte superior del cono invertido) mayor que la formada por la grava media y ésta a su vez mayor que la del canto rodado. También se observó que hay una mejor simetría en el hoyo cuando el material es el canto rodado que la grava; esto se debe a la forma de la partícula, la primera es redondeada mientras que la segunda es angular. En el Anexo G, las Láminas G-01 a G-26 muestran la planta y perfil de los hoyos de erosión para cada prueba de las distintas fases ensayadas.

5.8.1 Taludes aguas abajo y arriba de la Poza de Erosión

De la planimetría que se obtuvo después de realizar la batimetría en cada prueba, se procedió a medir los ángulos de los taludes en el eje longitudinal, aguas arriba y aguas abajo del punto de erosión, como en los taludes laterales en la sección transversal a la longitudinal. Para realizar la medición, se trazaron secciones tanto paralelas al eje de la rápida, como una sección transversal al eje de la rápida en el punto donde se registra la máxima profundidad de socavación. Esta información se presenta en el siguiente capítulo y en el Anexo G, láminas del G-01 al G-26.

5.8.2 Ubicación de la máxima profundidad de Erosión

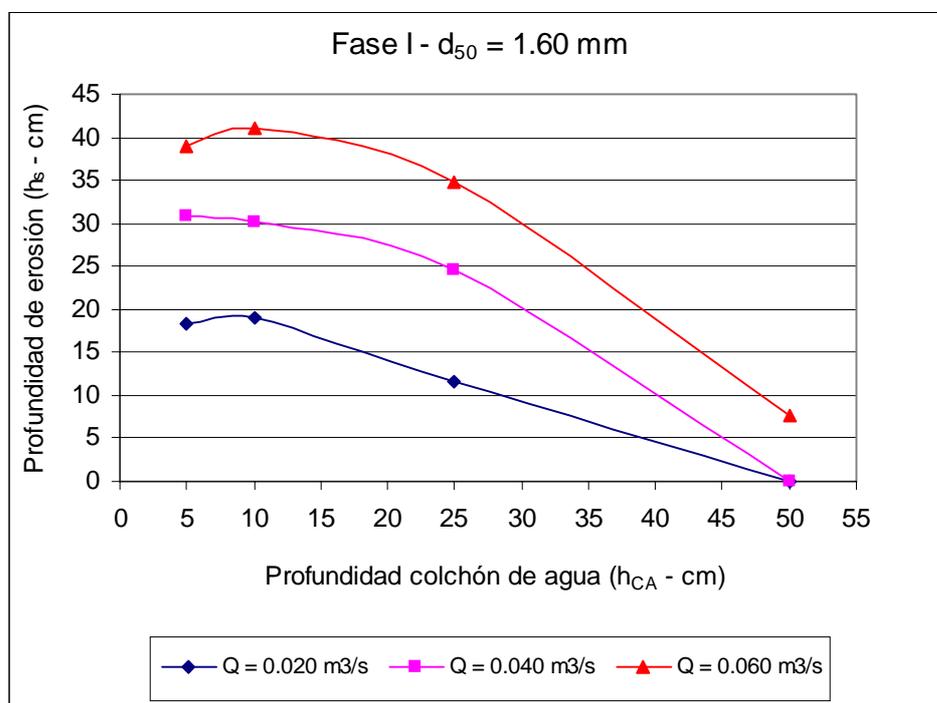
La ubicación de la profundidad máxima de socavación ha sido variable. Del resultado de las pruebas, se ha observado que este oscila entre un rango de +0.15 m y -0.15 m del eje de la rápida, como se aprecia en las secciones longitudinales en el Anexo G, láminas del G-01 al G-26.

CAPITULO 6

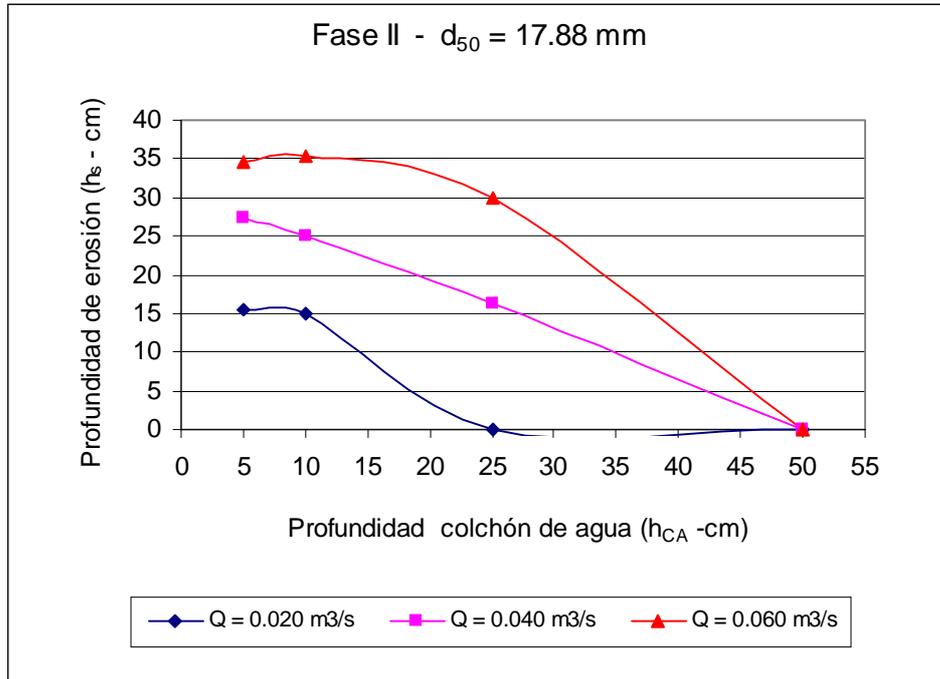
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 Relación entre la profundidad del colchón de agua y la de erosión.

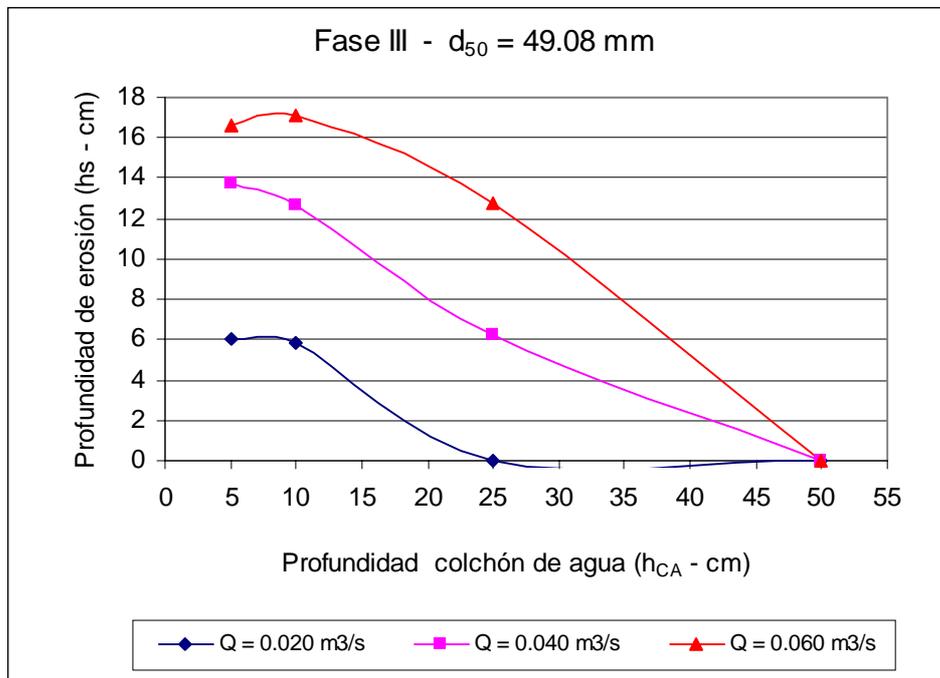
Para apreciar la influencia de la variable denominada Colchón de Agua (h_{CA}) en el proceso de erosión debido al chorro se realizaron 36 pruebas. Se consideraron cuatro valores de espesores de colchón de agua: 0.05 m, 0.10 m, 0.25 m y 0.50 m, tres descargas de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ (20 L/s), $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (40 L/s) y $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ (60 L/s) y tres granulometrías para el lecho con $d_{50} = 1.60\text{mm}$, 17.88mm y 49.08mm . Los resultados se muestran en las figuras 6.1.a, 6.1.b, y 6.1.c. Se aprecia que la profundidad de erosión disminuye al incrementarse la profundidad del colchón de agua. Esto se debe a que la energía de chorro de agua se disipa en el colchón y luego en el estrato.



6.1.a



6.1.b



6.1.c

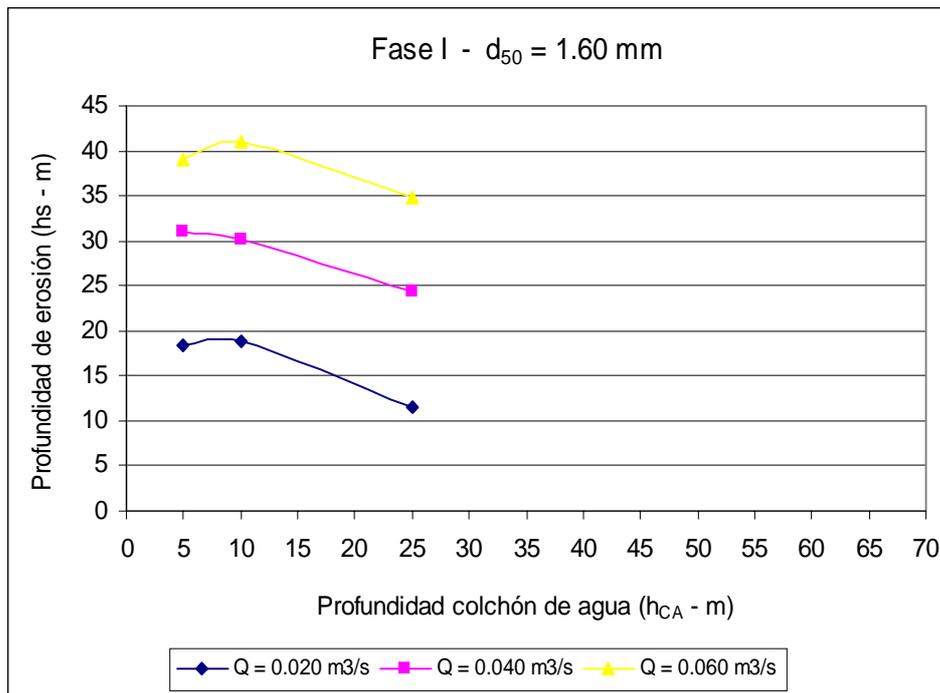
Figura 6.1 a,b,c. Variación de la profundidad del colchón de agua (h_{CA} - m) vs profundidad de erosión (h_s - m)

A continuación se ha realizado un análisis teórico para determinar la altura máxima del colchón de agua para la cual la profundidad de erosión es nula, este análisis debe ser complementado con investigaciones en modelos experimentales.

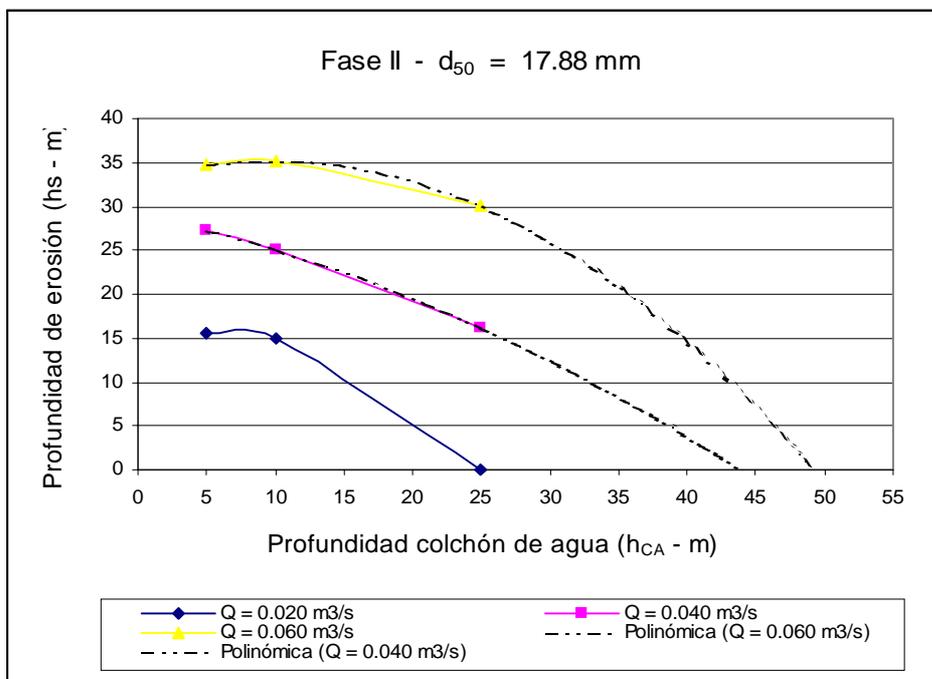
El análisis se hizo para cada Fase y consiste en la extrapolación de las curvas de profundidad de erosión versus profundidad del colchón de agua, mencionadas en el ítem anterior; como se muestra en las figuras 6.2.a, 6.2.b y 6.2.c y en el cuadro 6.1. Se observa para la Fase I, que la profundidad de erosión para los caudales de $0.04\text{m}^3/\text{s}$ (40 L/s) y $0.06\text{m}^3/\text{s}$ (60 L/s) son de: 0.54 m y 0.5525 m. Se aprecia que no hay mucha diferencia, ello se puede explicar con los resultados de las pruebas 7 y 12 (ver Anexo C. Cuadro C.1) de la respectiva fase ya que para un colchón de agua de 0.50 m, se registra solo una diferencia de 0.07 m de erosión, por lo tanto el incremento de la profundidad del colchón de agua permitiría que el chorro de $0.06\text{m}^3/\text{s}$ (60L/s) no erosione. Así también, se aprecia que en la medida en que se incrementa el tamaño de las partículas del lecho, la profundidad del colchón de agua disminuye; lo cual se explica con el criterio que, a mayor tamaño de partícula menor profundidad de erosión, como se ha registrado en las pruebas ejecutadas.

Fase	d_{50} (mm)	q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	$h_{CA\text{max}}$ (m)
I	1.60	0.033	0.340
		0.067	0.540
		0.100	0.553
II	17.88	0.033	0.250
		0.067	0.440
		0.100	0.490
III	49.08	0.033	0.250
		0.067	0.340
		0.100	0.400

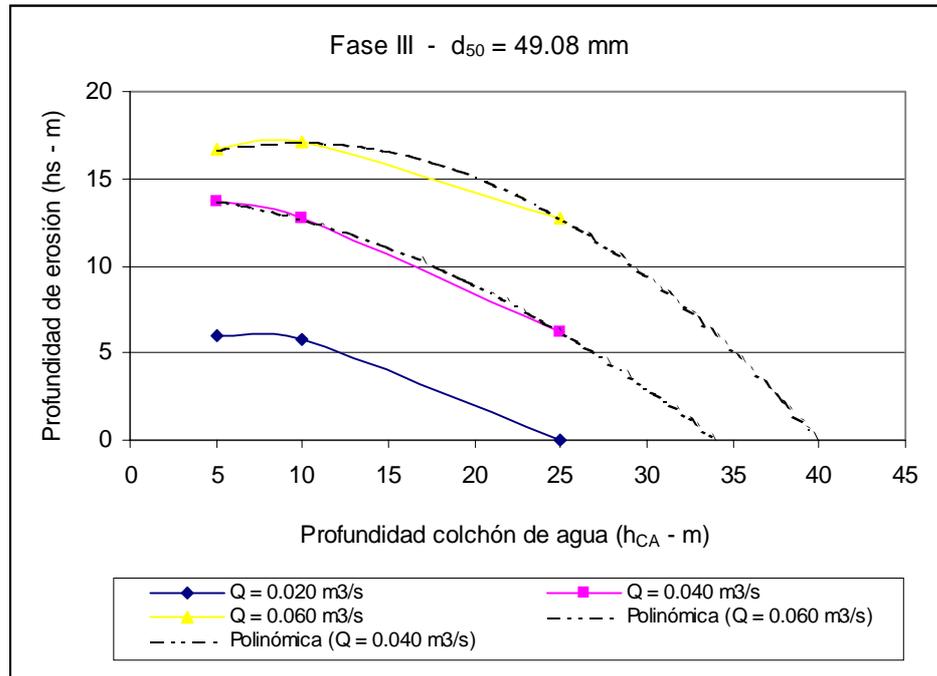
Cuadro 6.1. Valores máximos de profundidad de colchón de agua ($h_{CA\text{max}}$) para profundidades de erosión (h_s) nulas



6.2.a



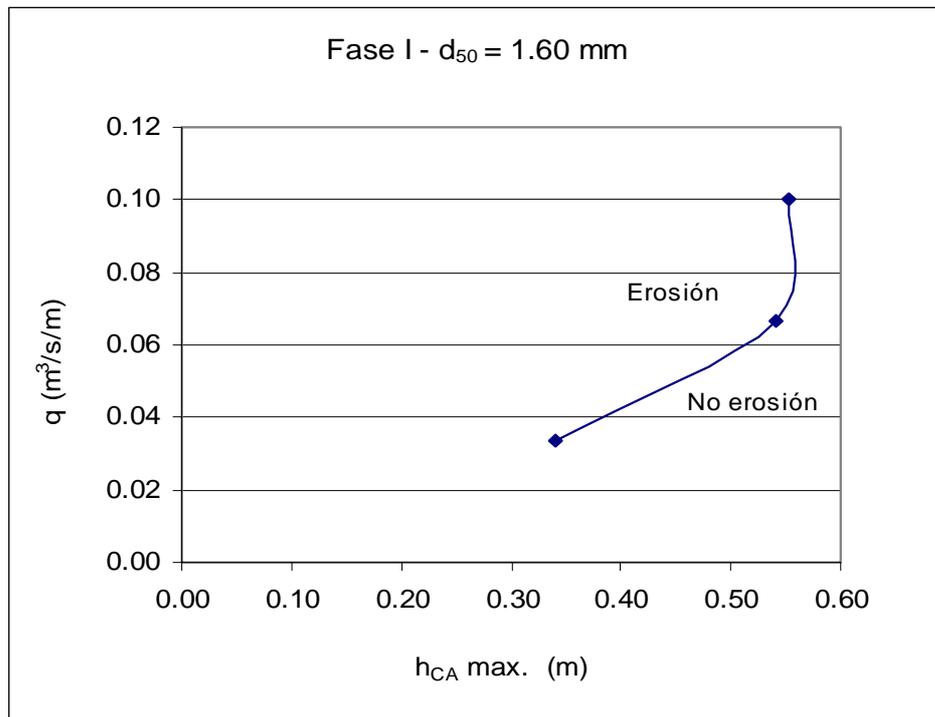
6.2.b



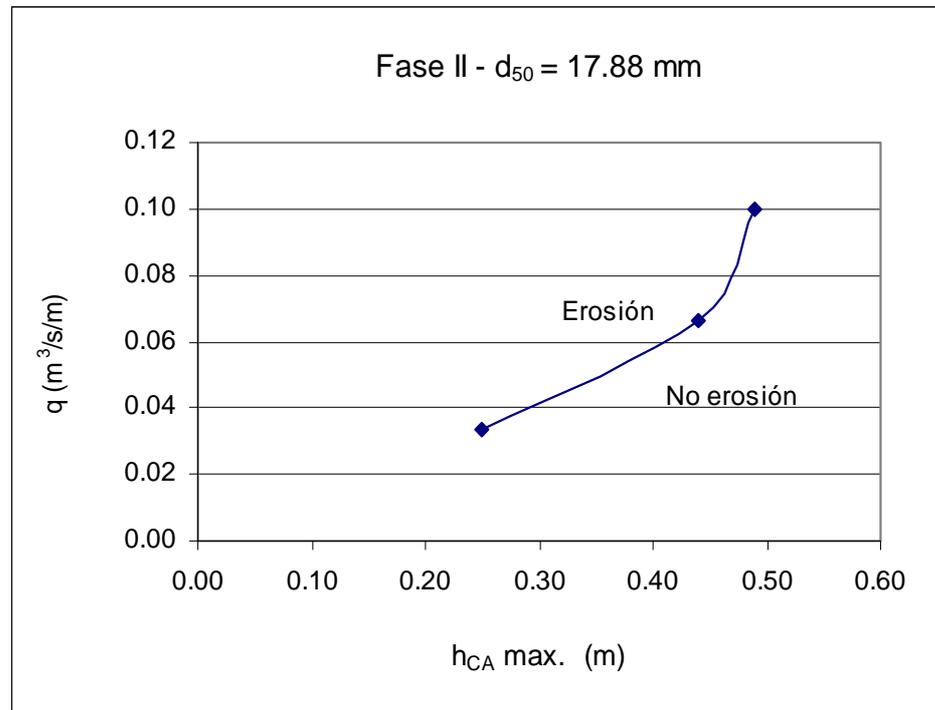
6.2.c

Figura 6.2 a, b, c. Extrapolación de la curva para determinar la profundidad máxima de colchón de agua (h_{CA}) para profundidades de erosión (h_s) nulas

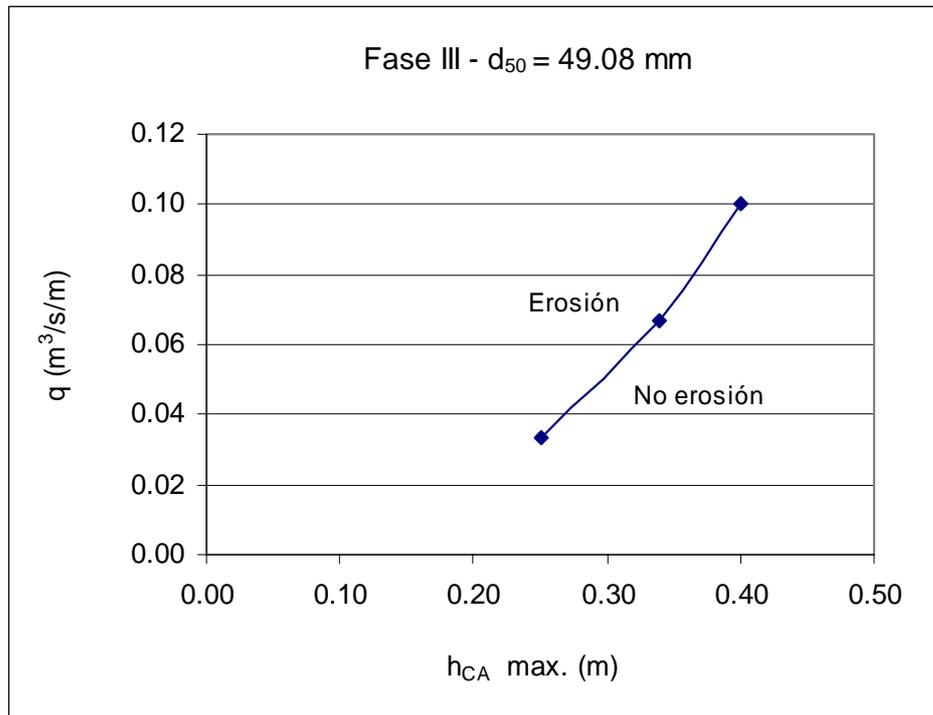
Del Cuadro 6.1 relacionamos las variables del caudal unitario (q) versus profundidad máxima de colchón de agua (h_{CA} máx.) obteniendo curvas que indican que para una determinada altura de colchón de agua la descarga de flujo no llega a producir erosión en el lecho del cuenco. (Ver Figuras 6.3 a, b y c). Así mismo se observa que en el área bajo la curva se encuentran los resultados de aquellas pruebas que dieron *Erosión Nula*, mientras que en el área sobre la curva se encuentran los resultados de aquellas pruebas donde si hubo *Erosión*.



6.3.a



6.3.b



6.3.c

Fig. 6.3 a, b, c: Caudal unitario (q) vs Profundidad máxima de colchón de agua ($h_{CA \text{ máx.}}$). Curva limite entre el proceso de No Erosión y Erosión para cada Fase.

En base a los datos de campo y del análisis expresado en el Cuadro 6.1 se elaboró el diagrama de iniciación del proceso de erosión, el que se muestra en la Figura 6.4. Para ello, se introduce el parámetro adimensional d^* (Julien, 1995) el cual relaciona el número de Reynolds Crítico (Re^*) y el esfuerzo de corte crítico ($d_*^3 = Re_*^2 / \tau_*$). En la abscisa se ubican los d^* de las partículas. Este parámetro se relacionó con otro parámetro adimensional que combina la energía del chorro expresada en función del tirante crítico y de la longitud de penetración en el colchón de agua. Así mismo, en la figura 6.4 se observan a los valores de erosión nula, obtenidos de la extrapolación de la curva, como un rango límite entre los valores de campo de no erosión y de erosión. Luego, se trazó una línea de tendencia entre los datos de erosión nula de cada fase obteniendo una franja que indica que para un determinado diámetro (d^*) de una partícula que oscile entre una arena, grava y canto rodado se obtiene el valor del colchón de agua para el cual no

se presentará el proceso de erosión. Este rango de iniciación del proceso de erosión oscila entre 0.051 y 0.136.

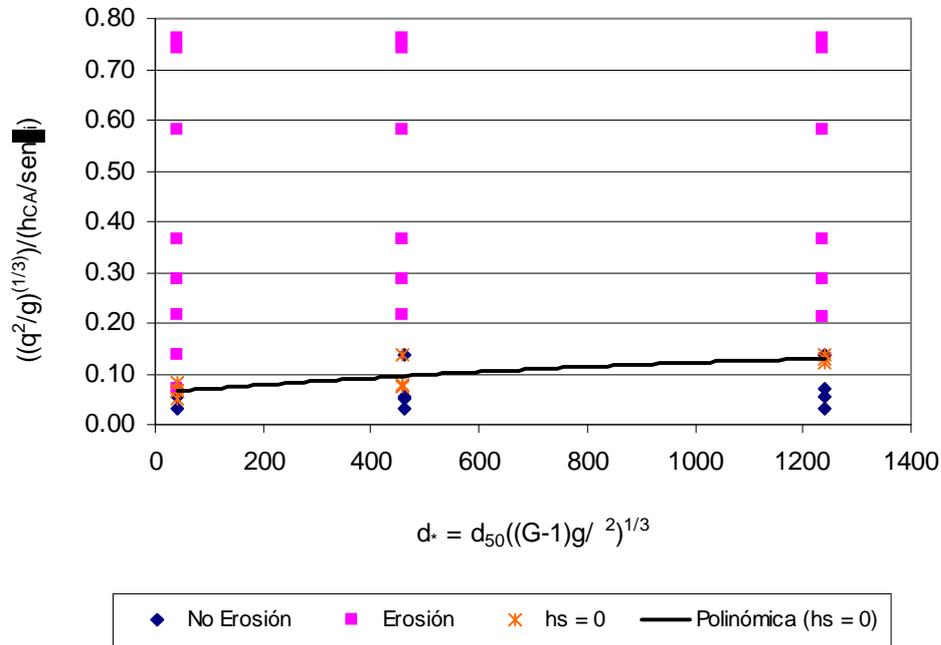


Fig.6.4 Curva de iniciación del proceso de erosión ($v_{T=20^\circ\text{C}} = 1.01\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{s}$)

6.2 Relación entre el tiempo y el proceso de Erosión

Como se mencionó en el ítem 5.6 del Capítulo 5.0, las bolas de plástico dispuestas a distintas alturas y posición a lo largo de la franja central de 0,60 m. delante de la estructura del trampolín, indican la profundidad del proceso de erosión en el instante que la energía del chorro la mueve y emerge hacia la superficie del cuenco.

En los diferentes caudales utilizados en las Fases I y II se observó cómo la profundidad de erosión se incrementó rápidamente durante los primeros segundos o minutos y luego se hizo más lenta. Como se recordará, el material utilizado en la Fase I era arena gruesa ($d_{50} = 1,60 \text{ mm}$ y $d_{85} = 4.81 \text{ mm}$) y en la Fase II, grava media ($d_{50} = 17.88 \text{ mm}$ y $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$). Mientras que en la Fase III, por lo mismo que el material utilizado fue canto rodado ($d_{50} = 49.08 \text{ mm}$ y $d_{85} = 70.53 \text{ mm}$), el proceso de erosión sólo fue observado con el caudal más alto, $0.06\text{m}^3/\text{s}$ (60 L/s). Así mismo, se obtuvieron más datos para colchones de agua de espesores $0,05 \text{ m}$, $0,10 \text{ m}$ y $0,25 \text{ m}$. Por lo tanto, el presente análisis se realizó para el caudal de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ (60 L/s) y los colchones de agua mencionados.

Las figuras 6.5a, 6.5b, y 6.5c, muestran la relación entre la profundidad de erosión en un instante de tiempo. Se observa que este comportamiento es asintótico, obedeciendo a una ley logarítmica (Laushey, 1966)

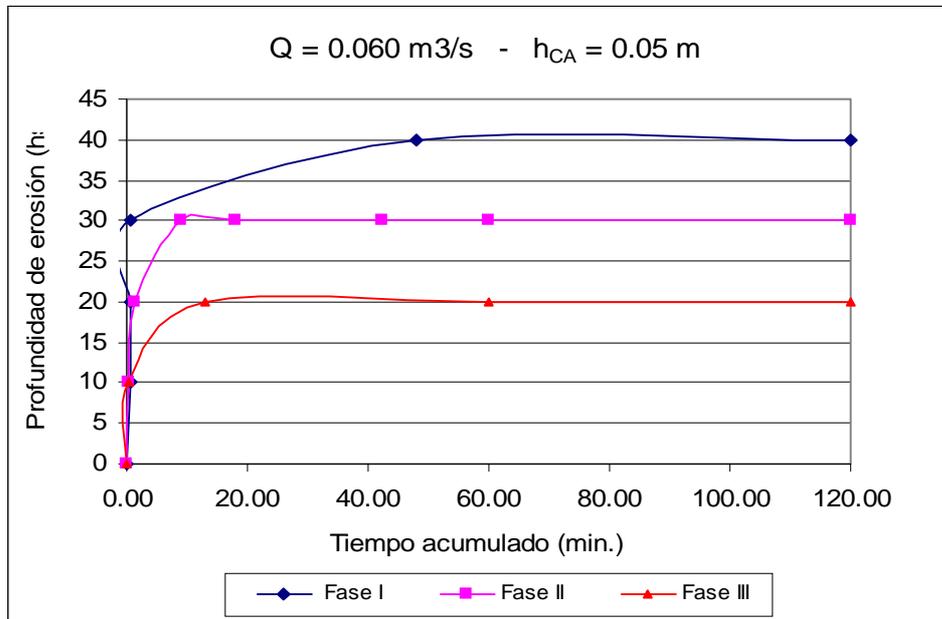


Figura 6.5 a. Profundidad de erosión vs Tiempo para Colchón de agua = 0.05m

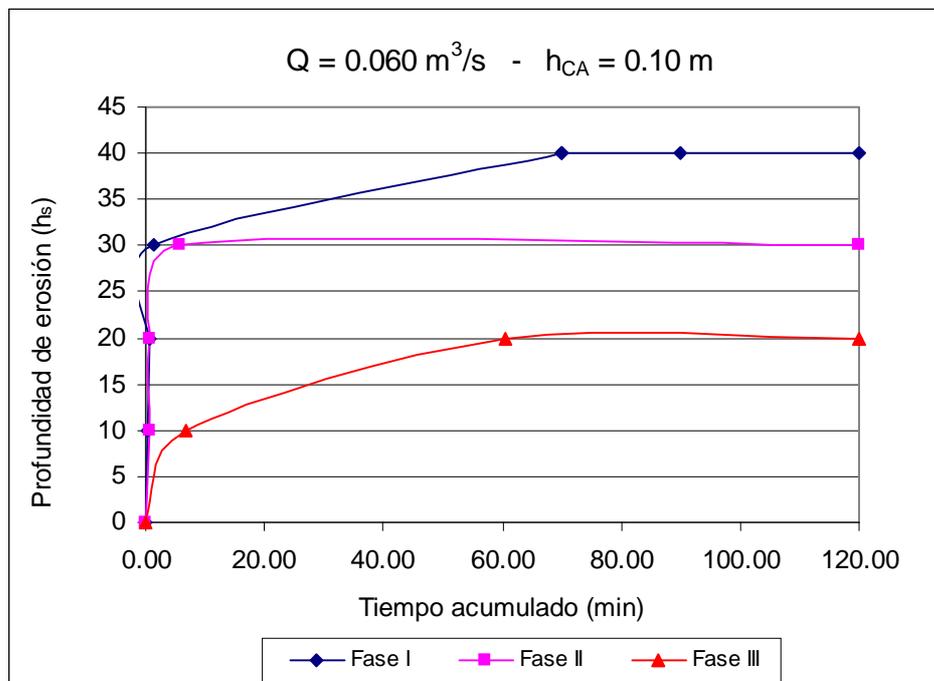


Figura 6.5 b. Profundidad de erosión vs. Tiempo para Colchón de agua = 0.10 m

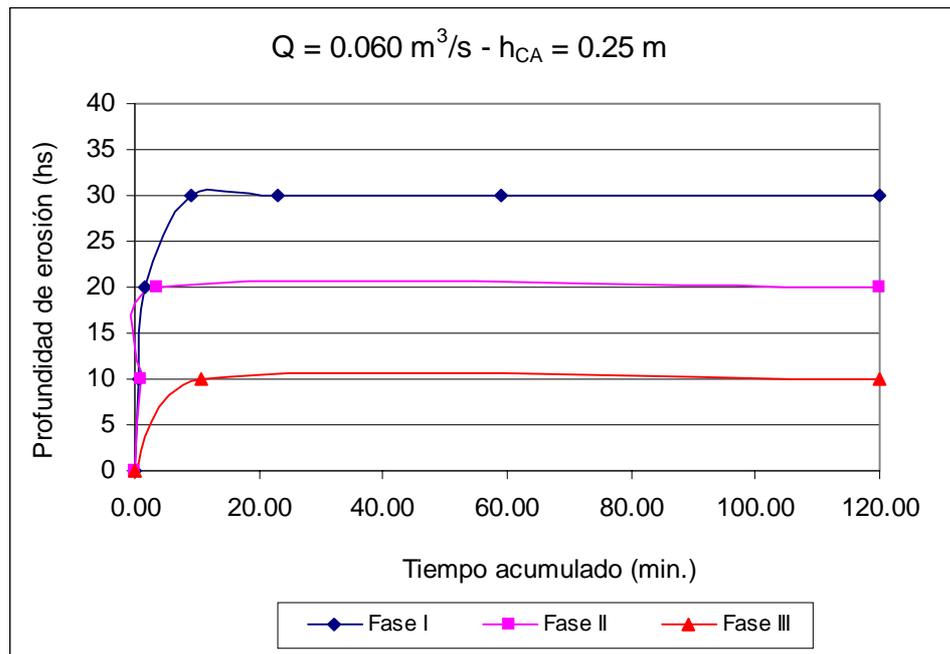


Figura 6.5 c. Profundidad de erosión vs. Tiempo para Colchón de agua = 0.25 m

Se observa de las Figuras 6.5a, 6.5b, y 6.5c que, para el colchón de agua de 0.05 m entre el 80% y 100% de la profundidad de erosión total se alcanza entre los primeros 0.5 a 13 minutos. Mientras que para el colchón de agua de 0.10 m la profundidad de erosión total se alcanza entre los primeros 0.5 -17 minutos. Finalmente, para colchones de agua de 0.25 m la profundidad de erosión se logra entre los primeros 4 y 15 minutos de iniciada la prueba. Respecto a los materiales, se aprecia que en la arena gruesa y la grava media, el 95% de la profundidad de erosión se logra en un tiempo promedio de 6 minutos, mientras que, para el canto rodado se logra este valor de profundidad de erosión en un tiempo promedio de 10 minutos.

6.3 Relación entre el tamaño del diámetro representativo y el proceso de erosión

La granulometría de los materiales ensayados en las tres fases fue elegida, con la finalidad de demostrar que el tamaño de la partícula es una de las variables que influyen básicamente en el proceso de erosión de un suelo debido a un chorro de agua.

Se ha analizado la granulometría de cada de una de las fases, observando que la Fase I, en la que se utilizó arena media (ver Anexo F. Fig. F-0A), no es uniforme; mientras que en la Fase II, en la que se utilizó grava media (Ver Anexo F. Fig. F-0B) si es uniforme, similar a la Fase III (ver Anexo F. Fig. F-0C), en la que se utilizó material tipo canto rodado. La figura 6.6 muestra los resultados obtenidos de las tres pruebas realizadas, observando que, la profundidad de erosión disminuye si el tamaño del diámetro de la partícula aumenta. Para está demostración se adoptó como diámetro representativo de la muestra el d_{50} , diámetro de la malla por el cual pasa el 50% del material fino.

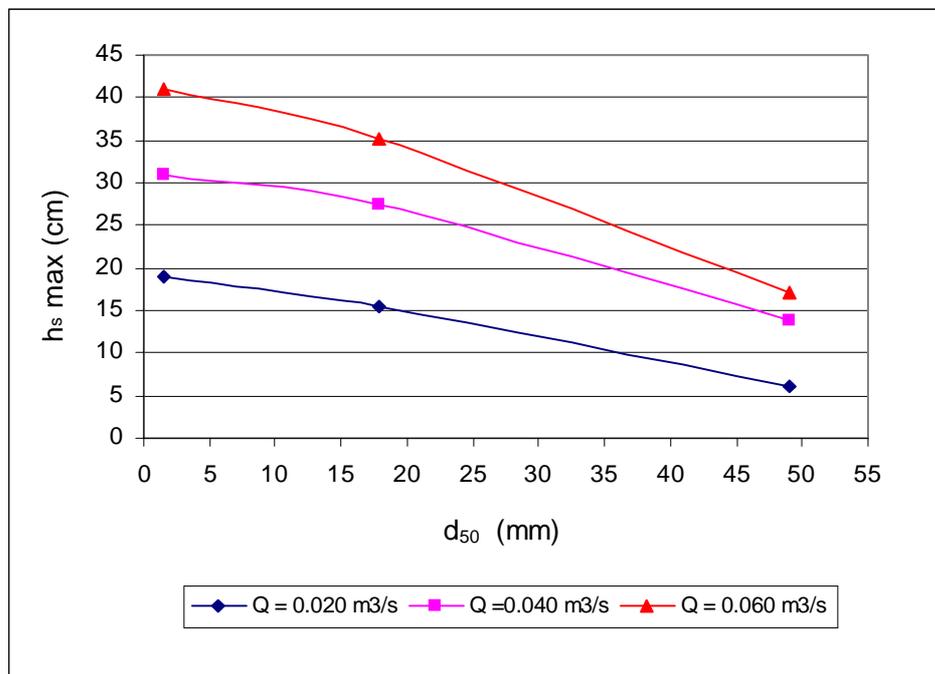


Figura 6.6. Variación entre la profundidad de erosión (h_s) y el tamaño de la partícula (d_{50}).

Para la presente investigación, se ha optado por utilizar la relación d_{85}/d_{50} para caracterizar la granulometría del material del lecho. No existe una razón predeterminada acerca de los diámetros que se deben utilizar para hacer dicha caracterización, quedando a criterio del investigador. Así tenemos, que autores como Schoklitsch (1932); Eggenberger (1944); Hartung (1959) consideran como diámetro representativo el valor de d_{85} ó d_{90} (Vicenzo, 2004). Mientras otros consideran el diámetro medio (d_m), como Veronese (1937), Chee and Padiyar

(1969), Chee y Kung (1974). Así también usan el d_{50} , Rouse (1940), Opie's (1967), Little and Mayer (1976) y otros. (Vincenzo, 2004).

En la Fase I, se observó que el hoyo de erosión, después del proceso de erosión llegó a acorazarse, lo cual quiere decir que el material cuya componente del peso paralela a dirección de aguas abajo es menor que las fuerzas hidrodinámicas y por lo tanto es removido y depositado hacia aguas abajo del hoyo, formando un duna, cresta o jiba; quedando, por lo tanto, partículas de mayor peso en el fondo del cauce. Finalmente, se analizó la granulometría del material que quedaba en el hoyo luego de ensayar cada una de las fases, observando que el diámetro del material está en el rango del d_{98} a d_{100} del material original. Mientras que en la Fase II y Fase III, como se trata de material grueso como grava media y canto rodado, no se puede considerar el término de acorazamiento, debido a que el diámetro de las partículas del material que queda en la superficie después del proceso de erosión, según los resultados de las pruebas de granulometría, está en el orden del d_{50} y d_{90} del material original, tal como se muestra en el cuadro 6.2. En el Anexo F, las figuras F-1 a F-17, muestran las curvas granulométricas del material de acorazamiento de la Fase I, II y III.

Cuadro 6.2 Resultados de la granulometría de la poza.

Fase	Prueba	Material acorazado		Material original	
		d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)
I	4	11.50	19.00	1.60	5.96
	5	10.20	21.50		
	6	10.50	20.00		
	7	15.00	22.00		
	9	13.00	23.00		
	10	13.00	22.00		
	11	13.40	21.50		
	12	13.00	20.00		
II	1	20.00	23.00	17.88	24.22
	2	20.80	23.00		
	5	20.20	23.00		
	6	20.20	23.00		
	8	20.00	23.50		
	9	20.10	23.00		
	10	20.20	25.00		
11	20.20	24.00			
III	12	20.00	40.00	49.08	70.53

6.4 Relación entre el ángulo de incidencia del chorro y la geometría de la poza de erosión.

El chorro ingresa al colchón de agua (h_{CA}) formando un ángulo con la horizontal, denominado "ángulo de incidencia". A continuación se presentan las relaciones que se han observado entre el ángulo de incidencia y la forma de la poza de erosión después de haber transcurrido el proceso de erosión. Para esto, se hizo el levantamiento topográfico del cuenco con una malla de 0.15 m por 0.15 m, ejes paralelos al eje de la rápida como al eje perpendicular a ésta; y en la zona propiamente de la poza, la malla en el eje perpendicular de la rápida fue cada 0.075 m. Posteriormente se obtuvieron secciones paralelas al eje de la rápida, en el eje y dos secciones a ambos lados de este; así también, una sección transversal en el punto mas bajo, de acuerdo a lo obtenido en las secciones anteriores. Finalmente, con estas secciones se obtuvieron los ángulos de los taludes aguas abajo (AAB), aguas arriba (AAR) y de ambos extremos de la poza, como se puede ver en las figuras del Anexo G.

En el cuadro 6.3 se observa que, para colchones de agua pequeños (0.05 m y 0.10 m) el chorro de agua tiende a ser vertical, por lo que el ángulo tiende a estar entre 49° y 50° ; mientras que para mayor profundidad de colchón de agua, a 0.25 m y 0.50 m, el chorro tiende a ser horizontal, por lo que el ángulo de incidencia tiende a estar entre 45° y 20° , respectivamente.

También se observa en el cuadro 6.3 que, tanto el ángulo del talud de aguas abajo de la poza como el ángulo de incidencia del chorro disminuyen cuando la profundidad del colchón de agua va incrementándose. Para la Fase I, los valores del ángulo de aguas abajo de la poza están en el orden de 22° a 27° . Para la Fase II, los valores de estos ángulos tienden a estar cercanos, variando entre 32° y 38° . Finalmente, en la Fase III, se observa que los valores de los ángulos para el caudal de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ (20L/s) están en el orden de 9° a 12° ; para el caudal de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ (40 L/s) está en el orden de 9° a 30° y para el caudal de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ (60 L/s) los ángulos están entre 29° y 42° .

Se observa que los taludes de aguas arriba, para caudales mayores tienden al ángulo de reposo del material. Para la Fase I, arena gruesa, este ángulo está en

orden de 25° a 30°; para la Fase II, grava, está en el orden de 30° a 38° y para la Fase III, canto rodado, el ángulo varía debido a la forma de la piedra, entre 20° a 40°.

Cuadro 6.3. Geometría de la poza de erosión

Fase	Prueba	Q (m ³ /s)	h _{CA} (m)	Angulo de Incidencia (°)	Angulo del talud de la poza de erosión (°)			
					Aguas Abajo	Aguas Arriba	Margen Izquierda	Margen Derecha
I	4	0.02	0.05	50	53.32	7.22	42.83	16.20
	1	0.02	0.10	49	44.01	12.05	23.18	18.18
	2	0.02	0.25	45	15.91	16.00	32.37	35.95
	3	0.02	0.50	20	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.04	0.05	50	27.68	14.93	24.38	27.85
	6	0.04	0.10	49	24.45	24.80	24.70	24.45
	7	0.04	0.25	45	17.95	24.80	33.12	26.27
	8	0.04	0.50	21	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.06	0.05	50	25.02	22.45	25.42	27.03
	10	0.06	0.10	49	23.87	8.57	26.02	27.35
	11	0.06	0.25	45	22.54	14.63	29.95	31.10
	12	0.06	0.50	20	6.30	4.57	23.68	18.67
II	1	0.02	0.05	50	34.38	9.28	17.28	16.00
	2	0.02	0.10	49	33.81	19.12	24.70	15.40
	3	0.02	0.25	45	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.02	0.50	20	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.04	0.05	50	30.94	21.47	29.87	27.78
	6	0.04	0.10	49	31.70	31.80	36.78	36.09
	8	0.04	0.25	45	24.83	46.67	35.30	29.63
	7	0.04	0.50	21	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.06	0.05	50	37.43	34.53	40.78	46.45
	10	0.06	0.10	49	38.68	33.80	44.72	35.50
	11	0.06	0.25	45	36.10	27.97	43.83	31.70
	12	0.06	0.50	20	0.00	0.00	0.00	0.00
III	1	0.02	0.05	50	11.87	9.47	16.00	6.00
	2	0.02	0.10	49	9.22	6.58	6.58	12.40
	3	0.02	0.25	45	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.02	0.50	20	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0.04	0.05	50	29.07	33.95	32.35	32.27
	7	0.04	0.10	49	19.12	13.50	34.57	21.80
	8	0.04	0.25	44	9.83	13.13	20.80	11.03
	5	0.04	0.50	21	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	0.06	0.05	49	41.57	39.58	40.18	25.81
	12	0.06	0.10	49	38.12	23.57	37.82	28.41
	11	0.06	0.25	45	29.70	18.27	27.73	23.43
	10	0.06	0.50	21	0.00	0.00	0.00	0.00

6.5 Patrón de flujo en el cuenco amortiguador

Cuando el chorro de agua impacta sobre la superficie de agua lo hace como el denominado "chorro radial". Este impacto da origen a que el chorro se disperse, formando tres corrientes en el cuenco, uno de ellos es rectilíneo y va hacia aguas y los otros dos se desplazan hacia los costados, con un movimiento vorticoso. La influencia de uno ellos en el patrón de flujo depende del tipo de material del lecho del cuenco y de las profundidades del colchón de agua. (Ver Anexo I - Fotos N°19 y N°23).

A partir de los resultados de velocidad obtenidos en cada una de las 36 pruebas, se elaboraron las láminas D-01 a D-12 que se muestran en el Anexo D. Se puede observar que para colchones de agua de 0,05 m y 0,10 m, con caudales de 0,020 m³/s, 0,040 m³/s y 0,060 m³/s, en la Fase I, material de arena gruesa, se forman las tres corrientes descritas anteriormente, mientras que en las Fase II y III, la dispersión del impacto del chorro sobre materiales gravosos y boleó, la corriente que prevalece es la rectilínea, hacia aguas abajo, sobre las vorticosas que van hacia los laterales. Este comportamiento para una altura pequeña de colchón de agua se debe a que la energía del chorro se disipa en el lecho al ser éste arena, es decir un material blando; así el tamaño y por ende, el peso de sus partículas son menores al tamaño y peso de las partículas de la grava, y éstas a su vez menores que las del canto. Por lo tanto, la arena opone menos resistencia que la grava y canto, originando en el primer caso tres corrientes, mientras que con los materiales restantes, la corriente que prevalece es la rectilínea, hacia aguas abajo, produciéndose corrientes hacia los laterales de la zona de impacto, pero en menor intensidad. Respecto a las magnitudes de las velocidades, para un mismo caudal y colchón de agua, éstas tienden a incrementarse respecto al material al que impactan; así tenemos, por ejemplo, en la coordenada (0, 210), para un caudal de 0,04 m³/s y colchón de agua de 0,05 m, el valor de la velocidad para la Fase I fue de 0,71 m/s, en la Fase II 1,24 m/s y para la Fase III 1,86 m/s. Esto se debe al tamaño de la partícula con la que impacta, al ser menor la fuerza de arrastre respecto al peso de ésta la velocidad con la que rebota se incrementa. (Ver Láminas D-01 a D-03, Anexo D). Pero en la Fase III se observa, que las velocidades medidas en el eje permanecen en promedio constantes para los colchones de agua de 0,05 m y 0,10 m, esto se debe a que la energía del chorro se

disipa tanto en el proceso de erosión como en la turbulencia que genera dicho choque.

Cuando se incrementa la altura del colchón de agua a 0,50 m, el patrón de flujo para caudales de 0,020 m³/s, 0,040 m³/s y 0,060 m³/s de la Fase I tiende a formar las tres corrientes de agua en el cuenco. Esto se debe a que la energía del chorro en el momento del impacto forma corrientes vorticosas hacia aguas abajo que inician el movimiento de las partículas de arena de estos lados. Mientras tanto para la Fase II y III, se observa que el patrón de flujo tiende a desarrollar la corriente de aguas abajo. Esto se debe a que la energía del chorro con la que ingresa al colchón de agua, es disipada parcialmente y la velocidad con la que llega al lecho, el cual contiene partículas de mayor tamaño, no logra moverlas, pero si impacta y rebota hacia aguas abajo. (Ver láminas D-04 – D-06, Anexo D). No se registra velocidad en una franja de 0,30 m hacia ambos lados del eje del resalto, como se puede observar en las láminas del Anexo D. Respecto a las magnitudes de la velocidad, se observa que en el eje para las Fases I y II tienden a incrementarse de acuerdo al incremento del caudal. Pero en la Fase III se observa que las velocidades en el eje decrecen con el incremento del caudal. Esto se debe a que a mayor caudal en mayor colchón de agua, se origina una mayor turbulencia, por lo tanto la energía se disipa.

Se observó que la zona de impacto en el eje, dependía de la longitud del salto del chorro. Así tenemos, para el caudal de 0,020 m³/s que la longitud en promedio fue de 0.70 m, para el caudal de 0,040 m³/s fue de 0.90 m y para el caudal de 0,060 m³/s, fue de 1.05 m. Luego en la zona del salto se origina turbulencia (zona de espuma blanca), la cual avanza hacia aguas abajo en una longitud de 0,30 m, 0,45 m y 0,60 m, termina su disipación como burbujas sueltas y ondas de mayor longitud.

Debido a la rugosidad de la superficie del lecho del cuenco y para colchones de agua de 0,05 m y 0,10 m se observaron diferentes comportamientos en la superficie del colchón de agua, así tenemos que en Fase I las ondas que se observaban eran debido a las corrientes vorticosas que originaba el impacto del chorro en la superficie. Mientras que para la Fase II y III se observó que la rugosidad del

material de grava y boleó producía ondas las cuales interceptaban a las ondas de la corriente vorticiosa, originando contracorrientes que no permitían el registro de velocidad en zonas cercanas al resalto hidráulico.

6.6 Predicción de la profundidad de erosión

El tipo de chorro analizado en la presente investigación es compacto, observándose que el chorro tiende a reducir su ancho cuando está en caída libre.

Las pruebas realizadas en el Laboratorio Nacional de Hidráulica se caracterizaron por tener un rango apreciable de variables que influyen en el proceso de erosión. Los datos obtenidos son presentados en los respectivos cuadros del Anexo C, cuadro C.1 y cuadro C.2.

En el ítem 3.6 del Capítulo 3, se obtuvo la relación del análisis adimensional, la ecuación (3.56).

$$\frac{h_s}{y_i} = \alpha \left(\frac{z}{H} \right)^a \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^b \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^c \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^d \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen}\theta_i} \right)} \right)^e$$

..... (3.56)

Para la calibración de la ecuación (3.56) se realizó el análisis de regresión lineal múltiple con 26 datos, debido a los 10 valores obtenidos con erosión nula. Luego, se le convirtió en una expresión lineal, tomando el logaritmo neperiano a ambos lados de la relación. El grado de aproximación fue evaluado con el menor error o diferencia entre los valores pronosticados y observados, como también por el coeficiente de correlación múltiple y el valor de R^2 .

Con los valores obtenidos del análisis de regresión múltiple, como se observa en el cuadro N° 6.4, que a continuación se muestra:

Cuadro 6.4. Valores de los parámetros de la ecuación (6.1)

Parámetro	Valor	Error Típico
α	3.1881	0.7865
A	0.6254	0.1242
B	0.1185	0.2041
C	0.3875	0.0913
D	1.3777	0.4348
E	0.0688	0.0974

Finalmente se tiene la ecuación (6.1) que predecirá la profundidad de erosión debido a un chorro a la salida de un salto de skí. Considerando la densidad relativa como la Gravedad Específica (G) se reemplaza en la ecuación (3.56), obteniendo la ecuación (6.1) que predecirá la profundidad de erosión.

Los estadísticos como el coeficiente de correlación múltiple es de 0.88 y el error típico de 0.30. En la figura 6.7 se muestra la relación entre los valores pronosticados de h_s/y_i obtenidos de la correlación y los valores medidos obtenidos de campo. Se observa un buen ajuste entre estos ya que el error entre ellos es mínimo, como lo muestra la tendencia lineal en la Fig. 6.7.

$$\frac{h_s}{y_i} = 3.188 \left(\frac{z}{H} \right)^{0.6254} \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^{0.1185} \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^{0.3875} \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.3777} \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen}\theta_i} \right)} \right)^{0.0688}$$

..... (6.1)

Así mismo se ha realizado pruebas estadísticas como: Multicolinealidad, autocorrelación de errores (regresión espúrea), Homocedasticidad, Normalidad de los errores. Estos permiten verificar si la regresión presenta ciertas anomalías que pudiesen afectar la estimación de los parámetros. El resultado de ellos indica que la regresión realizada no tiene problemas por ninguno de los supuestos indicados anteriormente, salvo por el de multicolinealidad pero que no tiene influencia sobre los parámetros estimados. (Ver Anexo C).

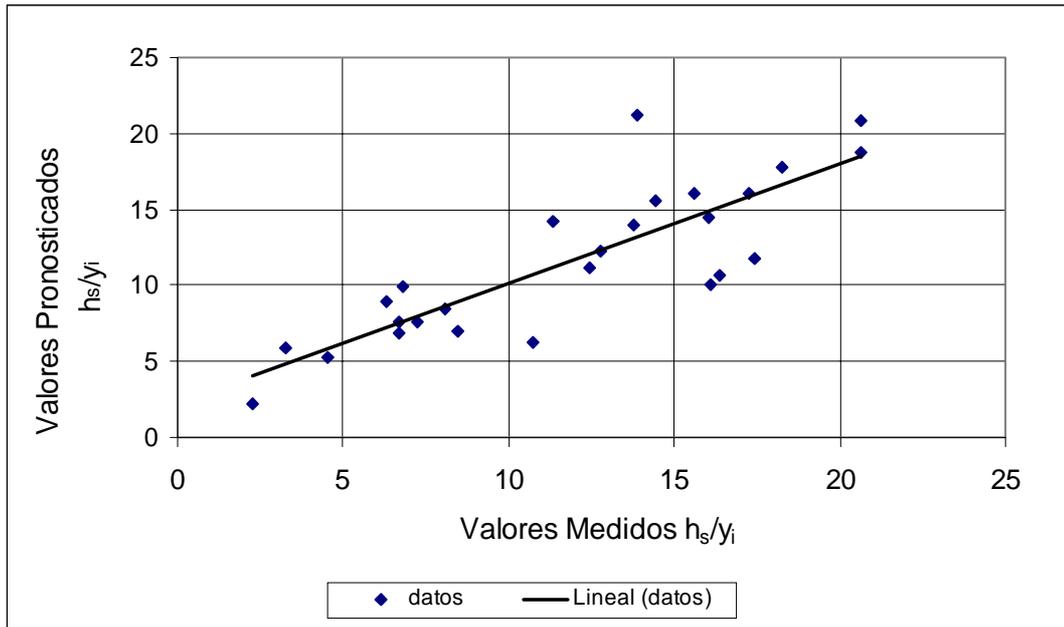


Figura 6.7. Relación entre los valores medidos y pronosticados de h_s/y_i

6.7 Prueba de validación de la ecuación para la predicción de la profundidad de erosión.

Una vez determinada la ecuación (6.1) para predecir la profundidad de erosión en base a los datos obtenidos de las pruebas ejecutadas, se plantea a continuación la prueba de bondad de dicha relación empírica. Para esto se ha contado con la información de la base de datos de otros investigadores sobre el tema de erosión con chorros, más no específicamente con la condición que plantea la presente investigación, como es, a la salida de un vertedero con salto de skí. De este modo, la información con que se realiza la prueba de validación de la investigación es con los datos de Hallmark A. (1955), Lencastre (1965) y Thomas I (1952). (Ver Anexo H, Cuadros H.1 a H.3). Del análisis se obtuvieron los valores de h_s calculados con la ecuación (6.1), luego se realizó el análisis de regresión lineal entre estos valores y los medidos, observando que los valores calculados con la ecuación (6.1) muestran un buen ajuste con los datos de Thomas I, $R^2=0.87$; seguido de Lencastre, $R^2= 0.78$ y finalmente con Hallmarrk, $R^2 = 0.70$, como se observa en las figuras 6.8a , 6.8b y 6.8c.

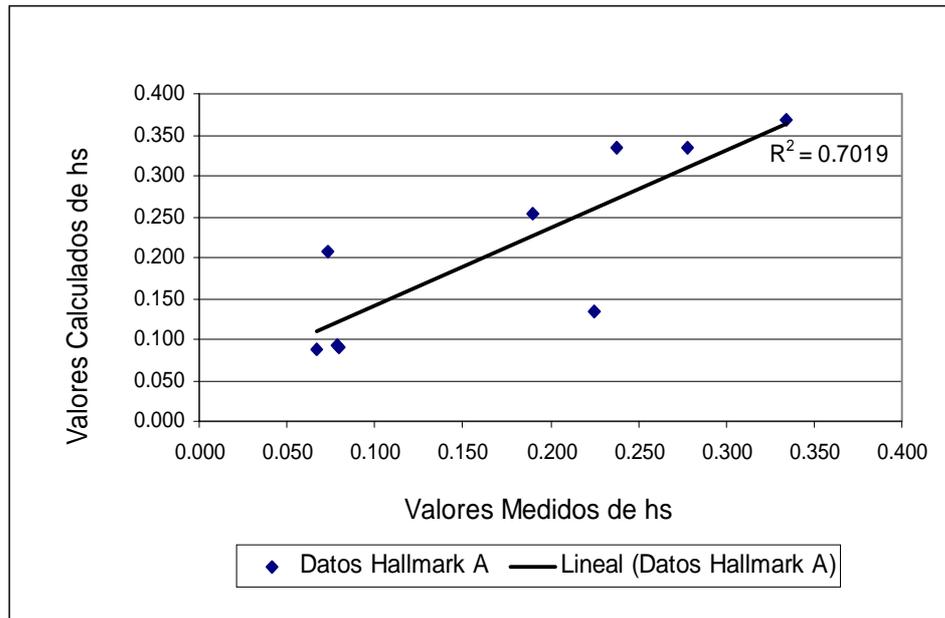


Fig. 6.8.a. Valores medidos vs. pronosticados de h_s con Hallmark A y ec. (6.1)

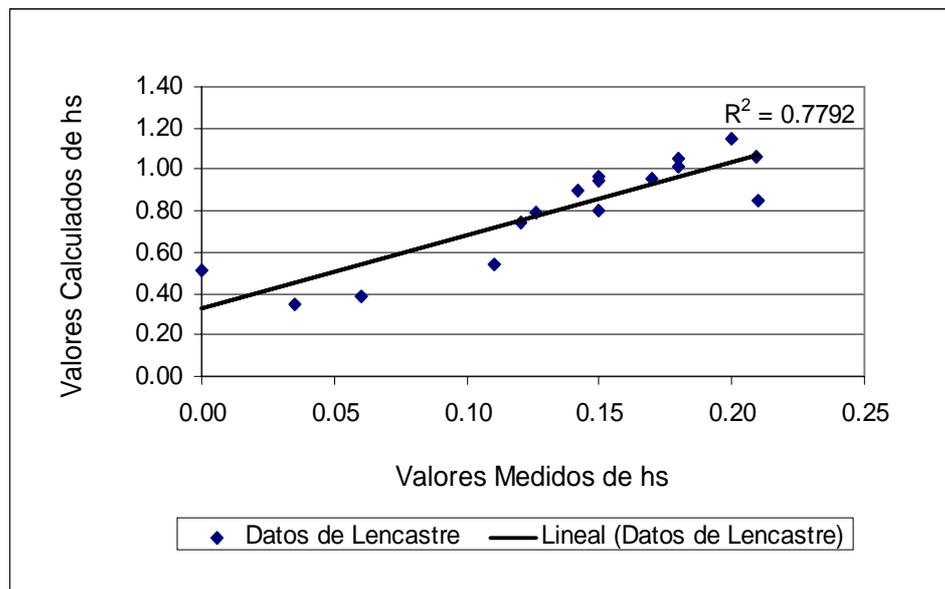


Fig. 6.8.b. Valores medidos vs. pronosticados de h_s con Lencastre y ec. (6.1)

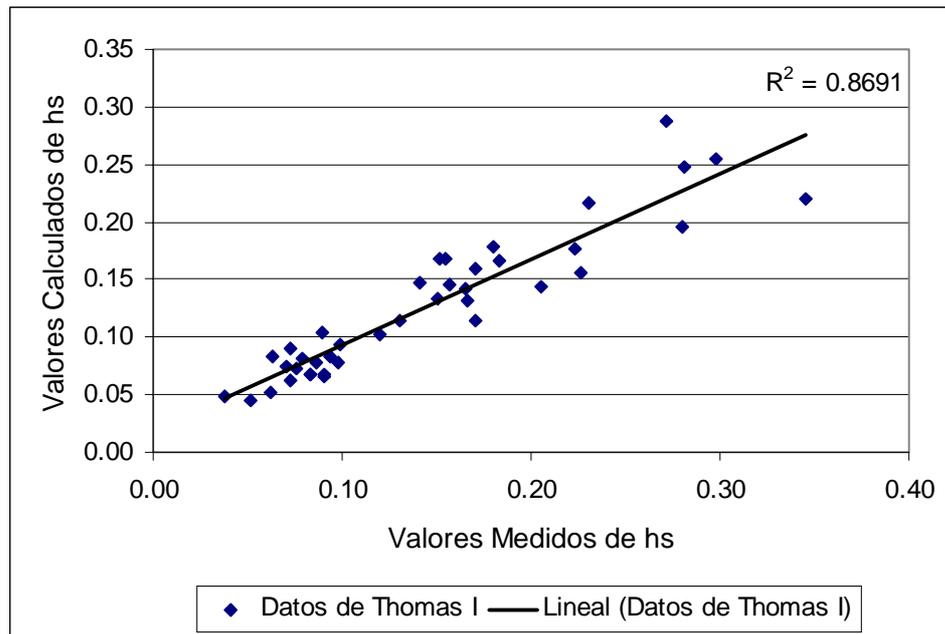


Fig. 6.8.c Valores medidos vs pronosticados de h_s con Thomas I y ec. (6.1)

6.8 Comparación de los resultados medidos con los calculados aplicando fórmulas de profundidad de erosión conocidas

En la literatura revisada sobre el proceso de erosión al pie de los vertederos en presas, debido al impacto del chorro de agua en el lecho, se han encontrado fórmulas propuestas por algunos investigadores, como se ha mostrado en el ítem 2.4. Estas ecuaciones se caracterizan por ser empíricas, debido a que han sido determinadas por estudios en modelos físicos, de manera similar a la propuesta por la presente investigación. Se desea replantear los datos medidos u observados de esta investigación en las fórmulas presentadas por ellos y comparar estos resultados con los obtenidos (medidos) en las 36 pruebas realizadas.

El cuadro 6.5 muestra la relación de ecuaciones que han de ser utilizadas para fines comparativos. Cabe indicar que las fórmulas presentadas por Martins (1975), Veronese (1937), Veronese modificada por Yildiz (1994) y Mason and Arumugan (1985) han sido determinadas para chorros que vierten por vertederos con terminal tipo trampolín o ski. Mientras que las relaciones de Okyay (1973) y la de Kuroiwa (1999), han sido determinadas para chorros que vierten por vertederos de presas sin deflectores.

Cuadro 6.5. Fórmulas presentadas por otros investigadores sobre chorros en caída libre y a la salida de vertederos con terminal tipo trampolín o skí.

<p>Martins (1975). Chorros a la salida de vertederos con terminal tipo trampolín o skí y caída libre.</p>	$h_s = 1.5H^{0.1} q^{0.6} \quad \dots (6.2)$
<p>Veronese (1937) Chorros a la salida de vertederos con terminal tipo trampolín o skí.</p>	$h_s = 1.9H^{0.225} q^{0.54} \quad \dots (6.3)$
<p>Veronese modificada por Yildiz (1994)</p>	$h_s = 1.9H^{0.225} q^{0.54} \operatorname{sen} \theta_i \quad \dots (6.4)$
<p>Mason & Arumugan (1985). Chorros a la salida de vertederos con terminal tipo trampolín o skí.</p>	$h_s = 3.27 \frac{q^{0.6} H^{0.05} h_{CA}^{0.15}}{g^{0.30} d_{50}^{0.10}} \quad \dots (6.5)$
<p>Okyay (1973) Chorros a la salida de vertederos en presas con caída vertical.</p>	$\frac{h_s}{y_o} = \frac{30.67 \left(\frac{V_o}{w} \right)^{2.01} \left(\frac{d_{50}}{y_o} \right)^{1.128}}{\left(\frac{V_o}{\sqrt{gy_o}} \right)^{1.119} \left(\frac{h_{CA}}{y_o} \right)^{0.431}} \quad \dots (6.6)$
<p>Kuroiwa (1998) Rotura de presa. Chorro compacto con diferente ángulo de incidencia al colchón de agua. Nota: diámetro de la partícula igual a d_{85}</p>	$\frac{h_s}{y_c} = 0.965 \frac{\left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^{0.72}}{\left(\frac{h_{CA}/\cos \theta_i}{y_i} \right)^{0.12} \left(\frac{W}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.26}} \quad \dots (6.7)$

Los resultados obtenidos de las ecuaciones (6.2) y (6.3) se muestran en los cuadros H.4, H.5 y H.6 del Anexo H y en las figuras 6.9, 6.10 y 6.11, En éstas se observa que el grado de correlación (R^2) que existe entre los valores medidos y calculados con dichas fórmulas está en el orden de 0.37 a 0.51. Esto se debe a que las únicas variables que consideran dichos investigadores son el caudal unitario y la carga de agua entre el nivel del reservorio y el nivel del colchón de agua, más no el tamaño de la partícula, por lo que los valores de profundidad de erosión calculados se repiten para las tres fases.

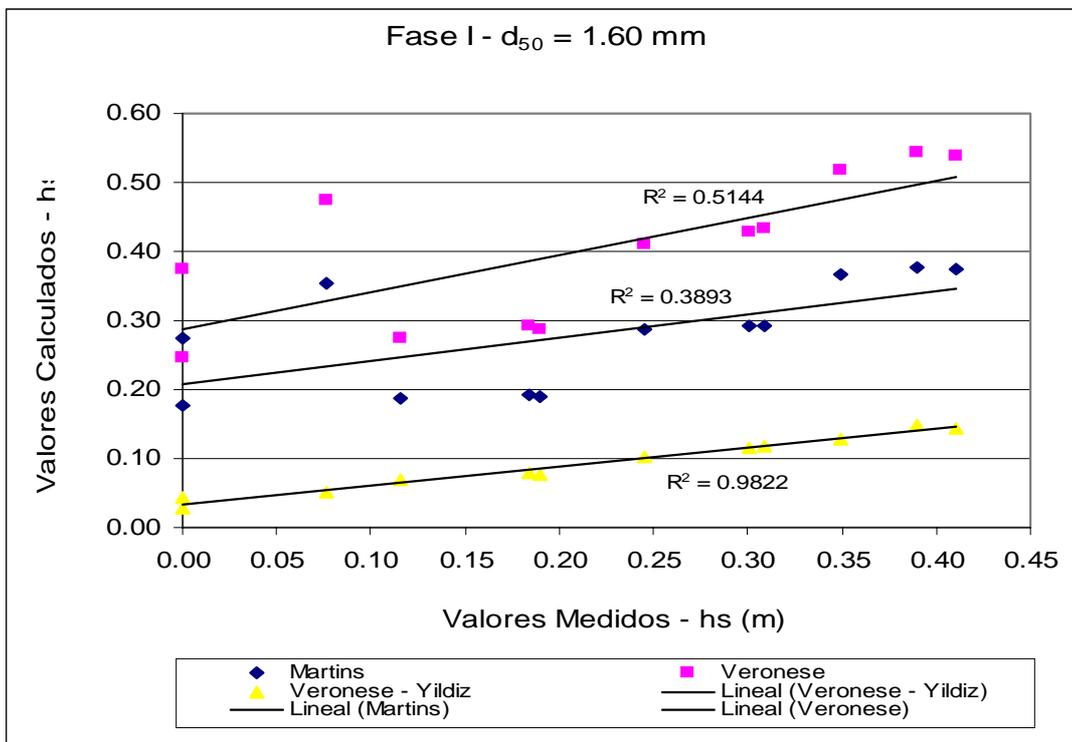


Fig. 6.9. Valores medidos en modelo de h_s (Fase I) vs valores calculados con las ecuaciones de Martins, Veronese y Veronese – Yildiz de h_s.

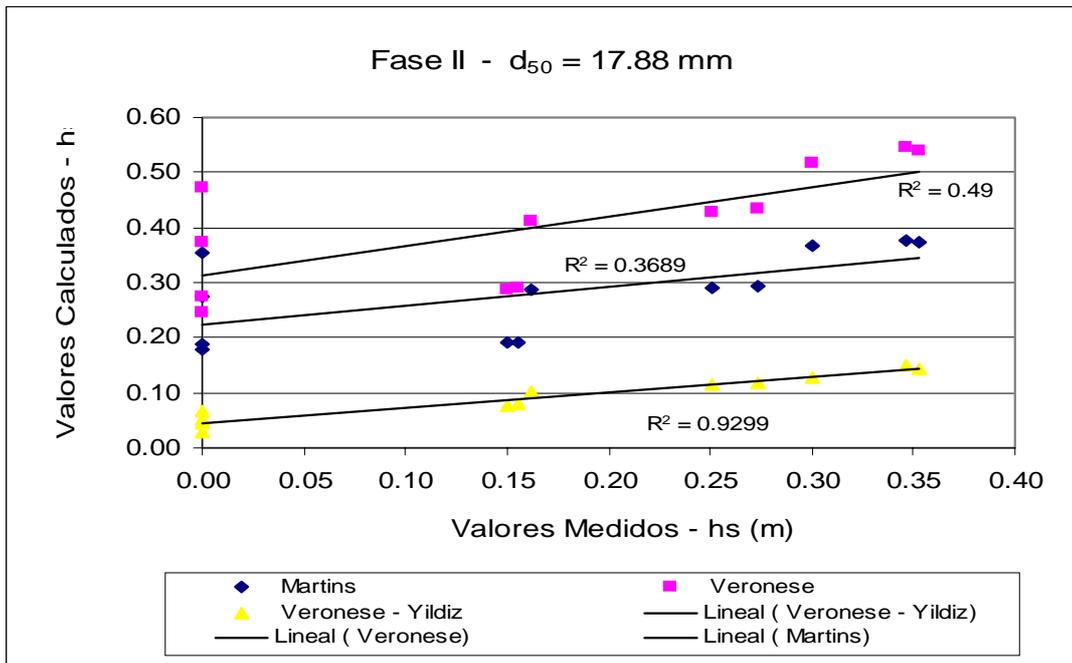


Fig. 6.10. Valores medidos en modelo de h_s (Fase II) vs valores calculados con las ecuaciones de Martins, Veronese y Veronese – Yildiz de h_s .

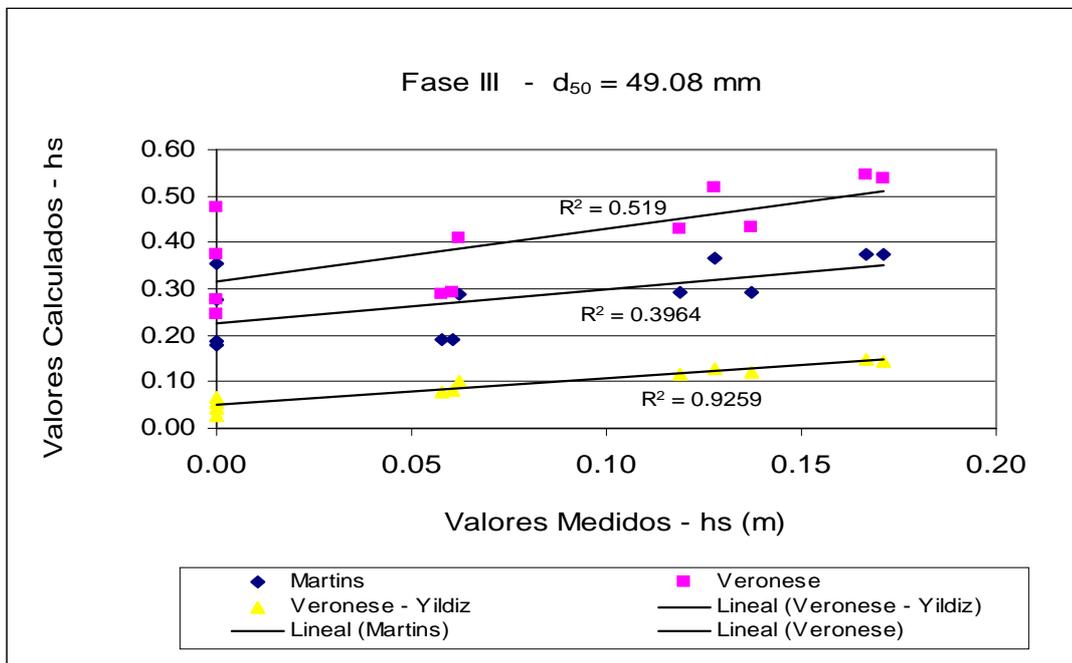


Fig. 6.11. Valores medidos en modelo de h_s (Fase III) vs valores calculados con las ecuaciones de Martins, Veronese y Veronese – Yildiz de h_s .

Respecto a la ecuación (6.4), los resultados obtenidos para la Fase I es de $R^2 = 0.98$, pero esta correlación disminuye con el incremento del diámetro del material, siendo el R^2 de 0.93 para las siguientes fases. Esta aproximación se debe a que en la ecuación modificada se consideró la variable del ángulo de incidencia del chorro (θ_i), lo que permite el conocimiento de la velocidad de despegue del chorro y el ángulo deflector del ski. Pero, al igual que las ecuaciones (6.2) y (6.3), sus valores son similares en las tres fases, debido a que no considera el tamaño de la partícula y las otras variables son constantes.

El Cuadro H.7 (Anexo H) y la figura 6.12, presentan los resultados de los valores calculados con la ecuación de Mason (6.5) versus los valores medidos en campo. Se observa que la correlación es baja para las tres fases, estando el R^2 entre 0.02 y 0.03. Además, los valores calculados de erosión son 50% en promedio más altos que los medidos. También se observa que la profundidad de erosión aumenta si se incrementa el colchón de agua. Esto porque la ecuación (6.4) considera una proporción directa entre la profundidad de erosión y la de la profundidad del colchón de agua.

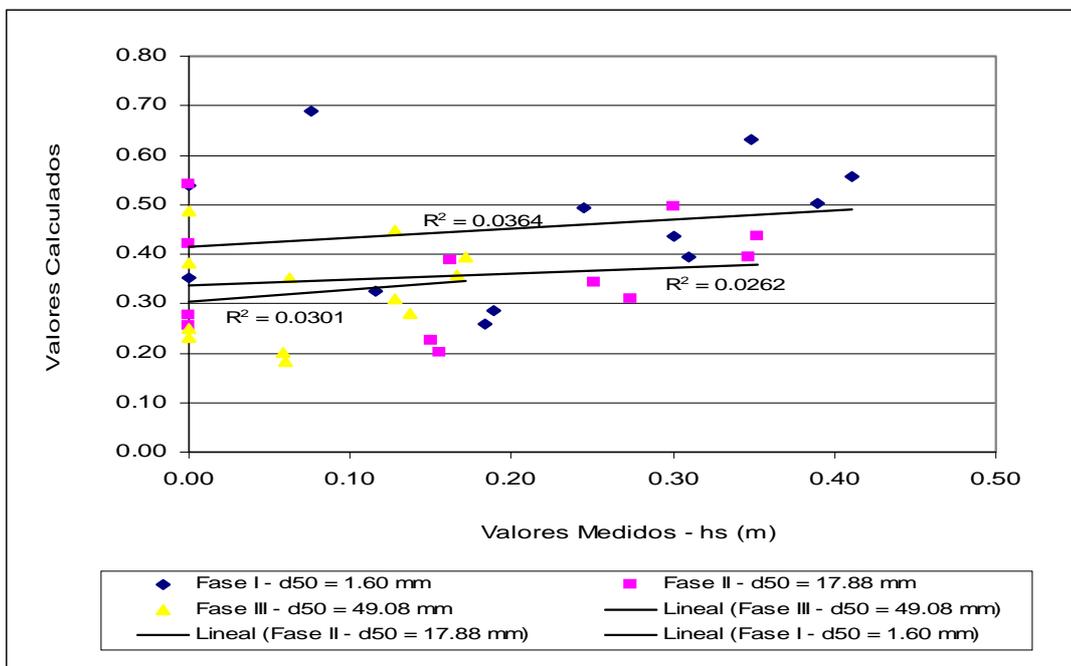


Fig. 6.12. Valores medidos en modelo de h_s vs valores calculados con la ecuación de Mason & Aramugan de h_s .

El Cuadro H.8 (Anexo H) y la figura 6.13 muestran los resultados obtenidos de la profundidad de erosión haciendo uso la ecuación (6.6) de Okyay (1973). La correlación que existe entre los valores medidos y calculados es buena, el R^2 está en el orden de 0.7 a 0.8. Así mismo, se observa que los valores calculados para la Fase I son menores a los medidos en 50% en promedio, pero para las fases II y III esta relación se invierte, siendo los valores calculados mayores a los medidos en 90% en promedio. Esto se debe a que Okyay considera el tamaño de partícula d_{50} directamente proporcional a la profundidad de erosión. Por otro lado, la velocidad que considera es la inicial, la cual es menor a la velocidad de incidencia.

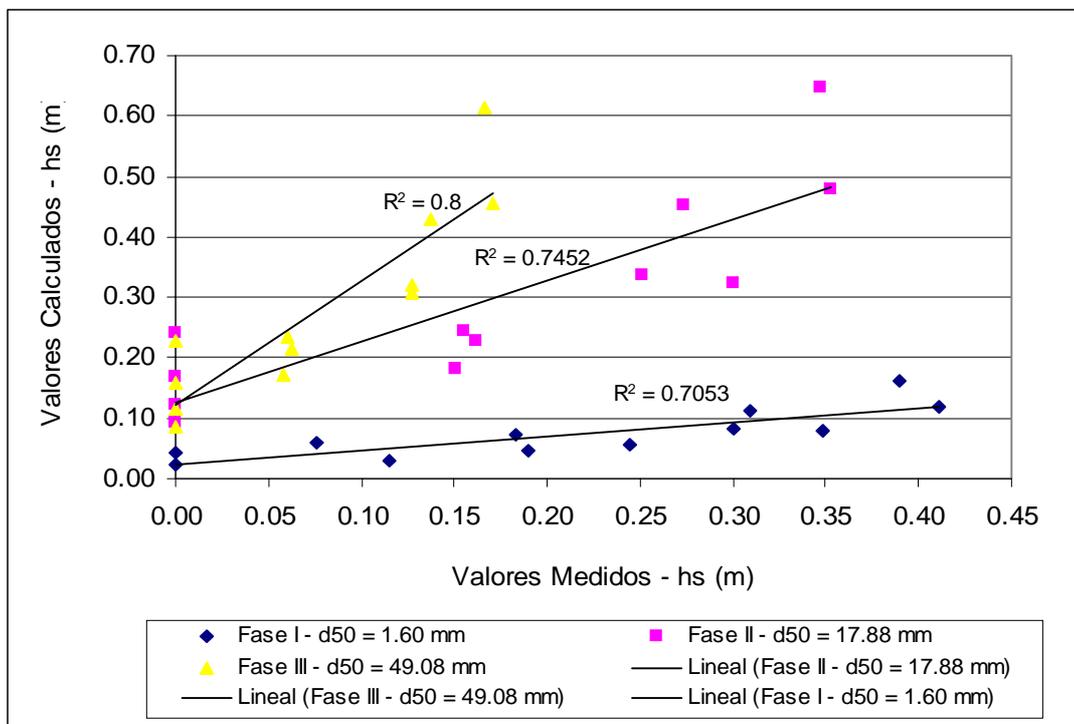


Fig. 6.13. Valores medidos en modelo de h_s vs valores calculados con la ecuación de Okyay de h_s .

Finalmente, en el Cuadro H.9 (Anexo H) y la figura 6.14 muestran los resultados de los valores de profundidad de erosión calculados haciendo uso de la ecuación (6.7), de Kuroiwa (1998). Se observa que existe una mejor correlación entre estos valores, para las tres fases, encontrándose el valor de R^2 entre 0.63 y 0.64. También se observa que los valores de las fases II y III, para los caudales de $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$ son 40% menores, aproximadamente, a los medidos.

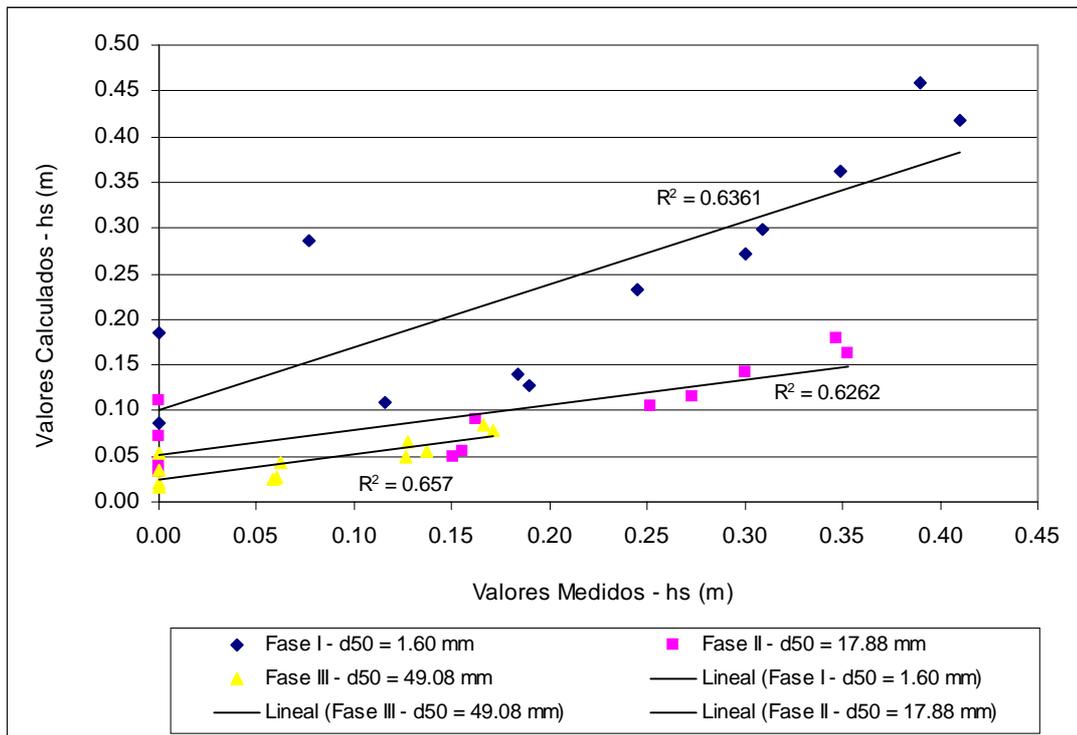


Fig. 6.14. Valores medidos en modelo de h_s vs valores calculados con la ecuación de Kuroiwa de h_s .

La no coincidencia entre los valores medidos y calculados que se observa en los cuadros y figuras indicados anteriormente, se debe: Primero, la selección de los parámetros que intervienen en el proceso de erosión depende del criterio (experiencia) del investigador, porque es quién decide los parámetros que representan mejor dicho proceso en el estudio que realiza. Segundo, los datos de otras investigaciones que han servido de comparación con la presente, no han sido desarrollados explícitamente para describir la erosión producida por un chorro de agua a la salida de una estructura tipo vertedero con salto de ski. Por último, la precisión de los datos obtenidos en laboratorio depende de factores intrínsecos como la precisión de los instrumentos, la lectura de los valores y el tratamiento de los datos.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 Conclusiones

En el proceso de erosión en lechos no cohesivos intervienen múltiples parámetros o variables correspondientes a las características tanto del flujo como del material que conforma el lecho. Sin embargo, en este estudio se ha determinado que las variables que afectan más sensiblemente el proceso son: la gradación del material (d_{50}/d_{85}), la energía potencial (z), la descarga o caudal unitario (q), densidad relativa o gravedad específica (G) considerada en el parámetro de iniciación de movimiento de una partícula, la energía del chorro al incidir con el colchón de agua expresada por el número de Froude ($V_i/(gy_i)^{0.5}$), la longitud de desarrollo que genera el chorro dentro del colchón de agua ($h_{CA}/\text{sen}\theta_i$) considerando así la altura de éste y finalmente la carga total (H), como se muestra en la Ecuación (6.1) obteniendo una relación matemática para la predicción de la profundidad de erosión en lechos no cohesivos debido al impacto de un chorro a la salida de un vertedero con salto de ski, que se muestra a continuación:

$$\frac{h_s}{y_i} = 3.188 \left(\frac{z}{H} \right)^{0.625} \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^{0.118} \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^{0.387} \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.377} \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen}\theta_i} \right)} \right)^{0.069} \dots \quad (6.1)$$

De la ecuación anterior se observa que la profundidad de erosión presenta una relación directamente proporcional con el parámetro de la contribución de energía potencial a la carga total, también al parámetro de la relación granulométrica del material del lecho a la descarga unitaria y al Número de Froude del chorro de impacto e inversamente proporcional a la altura del colchón de agua y al diámetro d_{50} de la partícula.

Los valores de profundidad de erosión (h_s) calculados con las ecuaciones de Veronese (1937), Martins (1975) se incrementan a medida que aumenta el caudal unitario, pero no disminuye cuando se incrementa el diámetro, esto se debe a que dichas relaciones no consideran el diámetro de la partícula como una variable. Los valores de la profundidad de erosión calculados con la ecuación de Mason & Arumugan (1985) resultan para la Fase I y II, 50% mayores a los valores medidos, mientras que para la Fase III, esta diferencia es del 100%, esto se debe a la consideración de la variable profundidad de colchón de agua en una proporción directa a la profundidad de erosión, lo cual es inverso. Mientras que los valores calculados con la ecuación de Kuroiwa (1998) presentan buena aproximación para la Fase I, arena gruesa; pero, para materiales gravosos, Fase II y III, los valores calculados son 40% menores a los medidos.

Así mismo, se ha observado que el proceso de erosión tiene una relación logarítmica respecto al tiempo, es decir, al inicio del proceso la profundidad de erosión se incrementa rápidamente para luego disminuir y permanecer constante. El equilibrio del proceso de erosión, se presenta cuando las partículas del fondo de la poza ya no pueden ser removidas por la energía del chorro.

El patrón de flujo observado en el lecho del cuenco depende del material del lecho. Así tenemos que en lecho arenoso se forman tres corrientes, dos corrientes vorticosas que se dirigen hacia los lados laterales del cuenco, una en sentido anti-horario y otra en sentido horario, la tercera corriente es rectilínea y se dirige hacia aguas abajo, pero en menor intensidad; mientras que en lechos gravosos y de canto rodado, la corriente que predomina es la de aguas abajo y hacia los laterales sólo se formaban ondas.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda investigar más sobre la incidencia de la distribución granulométrica de los materiales del lecho en el proceso de erosión, de modo de obtener un parámetro (diámetro representativo) que caracterice mejor a esta distribución.

Mediante un modelo matemático, utilizando la segunda ley de Newton del movimiento, combinado con el modelo físico se podría derivar una relación entre la energía del chorro en el instante de impacto con la profundidad de erosión del lecho en la fase de equilibrio.

Así mismo, es necesario investigar más la geometría del hoyo de erosión, para encontrar si existe una relación entre el ángulo de impacto del chorro y los ángulos de los taludes aguas arriba y abajo de la poza u hoyo de erosión. Por ejemplo, Spurr (2002) manifiesta que el ángulo del talud de aguas abajo tiende a tomar el ángulo de reposo del material.

El fenómeno de aireación del chorro es importante cuando las masas de agua son considerables y constituye una situación real del flujo sobre vertederos de presas de gran tamaño, por lo cual sería conveniente complementar este estudio recreando tal situación.

Para pronosticar con mejor aproximación la profundidad del colchón de agua que permita que el proceso de erosión no ocurra es necesario realizar mayores ensayos manteniendo intervalos más pequeños en la variable colchón de agua.

Se plantea realizar una investigación sobre la altura de caída y dimensiones del chorro, debido a que la forma (ancho y tirante) de éste en el momento de impacto influye en el análisis del proceso de erosión.

También es necesario analizar el grado de influencia de la “variable tiempo” en la determinación de la profundidad máxima de la erosión.

REFERENCIAS

1. Albertson, M. L., Dai, Y.B. Jensen, R.A., and Rouse, H, (1950). "Difusión of submerged jets". J. Hydr. Engrg. ASCE, 115: 639 - 664.
2. Bagatur, T., Baylar, A.. and Sekerdag, N. (2002). Water Quality Research Journal of Canada, 37(3)2 .
3. Ballio F., Franzetti S., Tanda M.G. (1994). "Pressure fluctuations induced by turbulent circular jets impinging on a flat plate". Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento Politecnico di Milano. Milano – Italia.
4. Beltaos, S. And Rajaratman, N. (1974). "Impinging circular turbulent jets"., J. Hydr. Engrg. ASCE, 100(10):1313-1328.
5. Bisaz, Ernest & Tschopp, Jurg, (1972). "Profundidad de erosión al pie de un vertedero para la aplicación de corrección de arroyos en quebradas empinadas". V Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima - Perú.
6. Blaisdell, F.W. and Anderson C. (1989). "Scour at cantelivered pipe outlets, plunge pipe pool energy dissipator design criteria". Agricultural Research Service. Springfield, VA.
7. Blaisdell, F.W. and Anderson C. I. (1984). "Pipe Spillway Plunge Pool Design Equations". Water For Resource Development, pag. 390-396.
8. Bureau of Reclamation (1985). "Diseño de Pequeñas Presas". Denver, Colorado U.S.A.
9. Bureau of Reclamation. "Hydraulic Design of Stilling Basins and Bucket Energy Dissipators". Engineering Monograph N°25. Technical Information Branch . Denver Federal Center. Denver, Colorado.
10. Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB-ICOLD), (1987). "Spillway for Dams". Bulletin 58. Paris, Francia.
11. Coronado del Aguila, Francisco (1971). "La Iniciación de Movimiento de los Sedimentos". VI Seminario Latinoamericano de Irrigación y Drenaje.
12. Egidio Indri. "Ricerche sulle erosioni di alveoprovoocate da vena sfiorante da una diga ad arco". S.A.D.E. Colle Raguesei 3488/u Venezia
13. Elevatorski, Edward A (1959). "Hydraulic Energy Dissipators". Engineering Societies Monographs. McGraw Hill Book Company, Inc. New York.

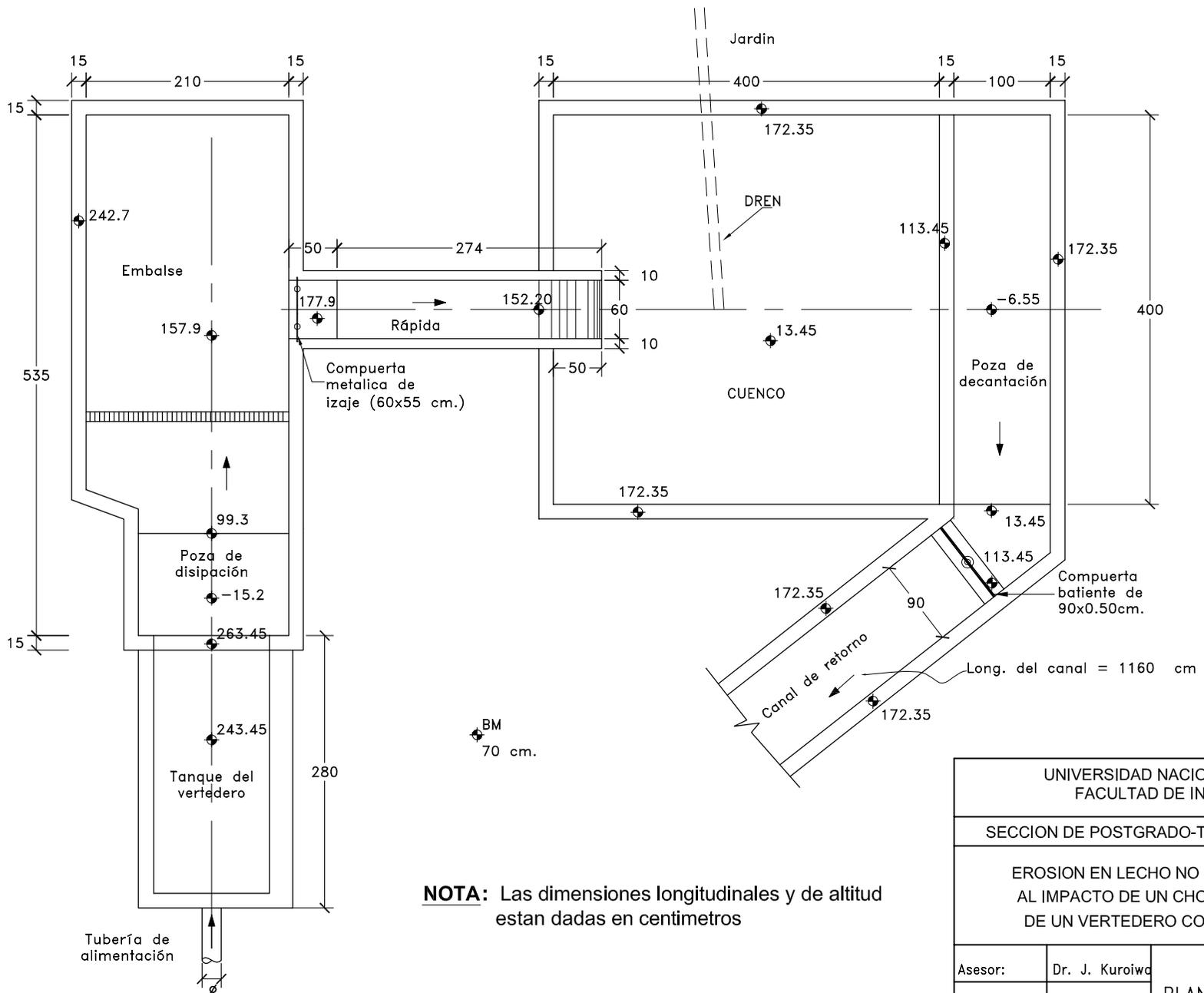
14. Elviro Garcia, V (1990). "Dimensionamiento de slatos de amortiguación de energía para vertidos sobre lechos de escollera". Ingeniería Civil. Num. 73. Madrid.
15. Graeme M. Smart (1999). "Turbulent Velocity Profiles and Boundary Shear in Gravel Bed Rivers". Journal of Hydraulic Engineering .
16. Gerahd P.- Gross R.- Hochstein J. (1995), "Fundamentos de Mecánica de Fluidos". Segunda Edición - Addison - Wesley Iberoamericana, por Wilmington, Delaware, E.U.A.
17. Gis J.C. M. Hoffmans (1998). "Jet Scour in Equilibrium Phase". Journal of Hydraulic Engineering. Vol.124.Nº4.U.S.A.
18. Gómez Navarro J., Aracil J.J. (1952), "Saltos de agua y presas de embalse". Tercera Edición. Madrid. España.
19. Hydraulic Laboratory Branch. Division of Engineering Laboratories (1962). "Hydraulic design of stilling basins and bucket energy dissipators". Engineering Monograph Nº25. Denver colorado. U.S.A.
20. Julien, Pierre Y. (1995). "Erosion and Sedimentation". Press Syndicate of the University of Cambridge. Primera Edición impresa en U.S.A.
21. Karim, O.A.y ALI K.H.M. (2000)"Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets". Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, Nº4.
22. Kuroiwa.J (1999). "Scour caused by rectangular impinging jets in cohesionless beds", Degree of Doctor of Philosophy, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
23. Laushey, Louis M. (1966), "design Criteria for Erosion Protection at the outlet of Culverts". Civil Engineering Department of Cincinnati – U.S.A.
24. Martins Rui (1973). "Contribution to the Knowledge on the Scour Action of Free Jets on Rocky River-Beds". Commision Internationale Des Grands Barrages. Madrid.
25. Mason P.J. (1984) "Erosion of Plunge Pools Down Stream of Dam due the action of Free Trayectory Jet". Proc. Instn. Civ. Engrs., Part. 1.
26. Mason P.J. & Arumugan K. (1985) "Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets". Journal of Hydraulic of Engineering. Vol. III. Nº2. ASCE. Hydraulic Division.
27. Meilan QI, K. Fujisak and K. Tanaka, (2000)"Sediment re-suspension by turbulent jet in an intake pond". Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, Nº5.

28. McKeogh E.J. , and Elsayy, E.M. (1980)"Air retained in pool by plunging water jet". J. Hydr. Engrg. ASCE, 106(10). Pag. : 1577-1593.
29. Novak, P. (1984). Developments in hydraulic engineering. Vol. 2. Elsevier Applied Science Publishers. Belfast. Northern Ireland.
30. Ofwona, Mark P. (1965). "Time progression of erosion at culvert outlets". Tesis para optar el grado de Master of Science, University of Cincinnati - U.S.A.
31. Estudio de la Presa Poechos, (1976). COLPEX S.A. Proyecto Especial Chira Piura, Perú.
32. Rajaratman, N. (1976). "Turbulent Jets". Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands..
33. Rajaratman, N. (1965). "The Hydraulics Jump as a Wall Jet". Journal of the hydraulics Division. ASCE.
34. Rajaratnam N. (1983). Nwachukwu B.A., "Erosion near groyne – like structures". Journal of Hydraulic Research 21. N°4. U.S.A.
35. Rajaratnam N. and Mazurek, K.A. (2003). "Erosion of Sand by circular Impinging Water Jets with Small Tailwater". Journal of Hydraulic Engineering © ASCE.
36. Rouse Hunter. (1951). "Hidraulica, Mecánica Elemental de Fluidos". Editorial Dossat s.a. Versión castellana. Madrid.
37. Rocha Felices, Arturo (1998). "Introducción a la Hidráulica Fluvial". Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil.
38. Salas La Cruz, José & Lescano Rivero, Manuel. (1965). " Estudio Teórico de Modelos Hidráulicos y su Aplicación Práctica en la Represa de Aguada Blanca". Tesis para optar el grado de Ingeniero Civil. U.N.I.
39. Shaikh Alaeddin. (1980). "Scour in Uniform and Graded Gravel at Culvert Outlets". Thesis for degree of Master of Science. Department of Civil Engineering. Colorado State University Fort Collins, Colorado.
40. Spurr K.J.W. (1985)."Energy approach to estimating scour downstream of a large dam". Water Power & Dam Construction; Canada.
41. Vanoni, V. (1975). Sedimentation engineering. ASCE, New York.
42. Vincenzo D' Agostino and Vito Ferro, (2004). "Scour on Alluvial Bed downstream of Grade – Control Structures", Journal of Hydraulic Engineering © ASCE.

43. Wittler R.J., Annandale G.W., Ruff J.F., Abt S.R. (1998). "Prototype validation of erodibility index for scour in granular media". Water Resources Engineering. U.S.A.
44. Yanmaz A. Melih. (2003). "Reliability Simulation of Scouring Downstream of Outlet Facilities". Turkish J. Eng. Sci. 27, 65-71. TUBITAK.
45. Yafei Jia, Tadanori Kitamura and Sam S. Y. Wang. (2001). "Simulation of Scour Process in Plunging Pool of Loose Bed-Material". Journal of Hydraulic Engineering.

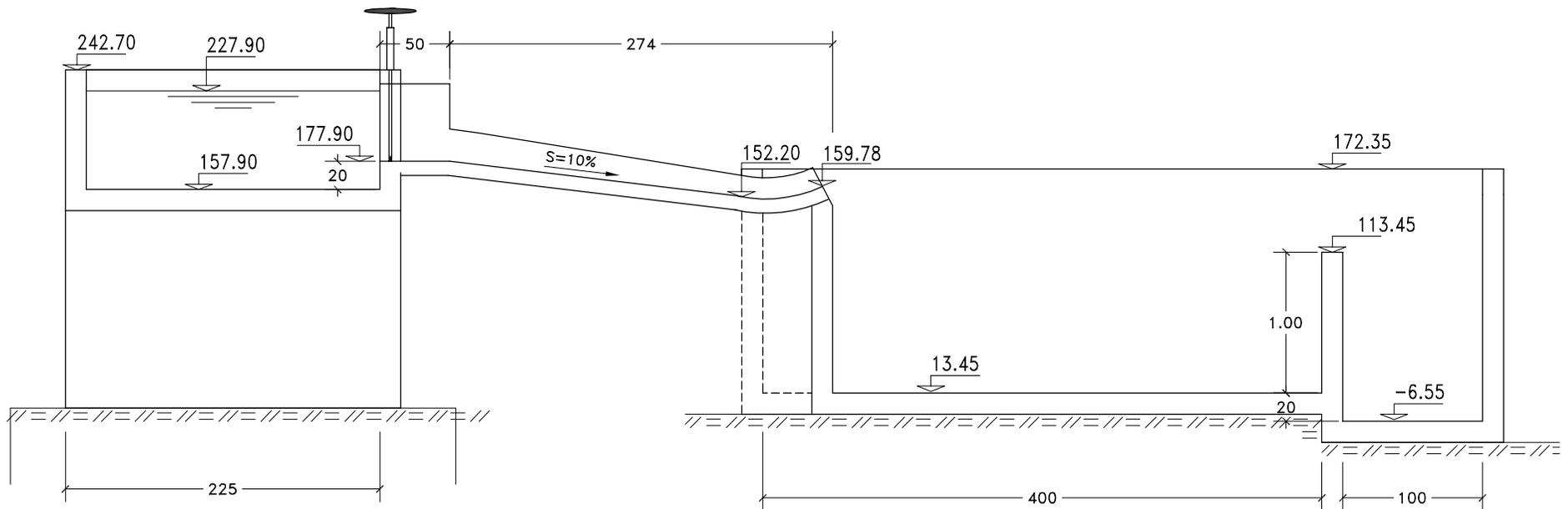
ANEXO A

LAMINAS DEL MODELO HIDRAULICO Y RÁPIDA EN
PLANTA Y PERFIL



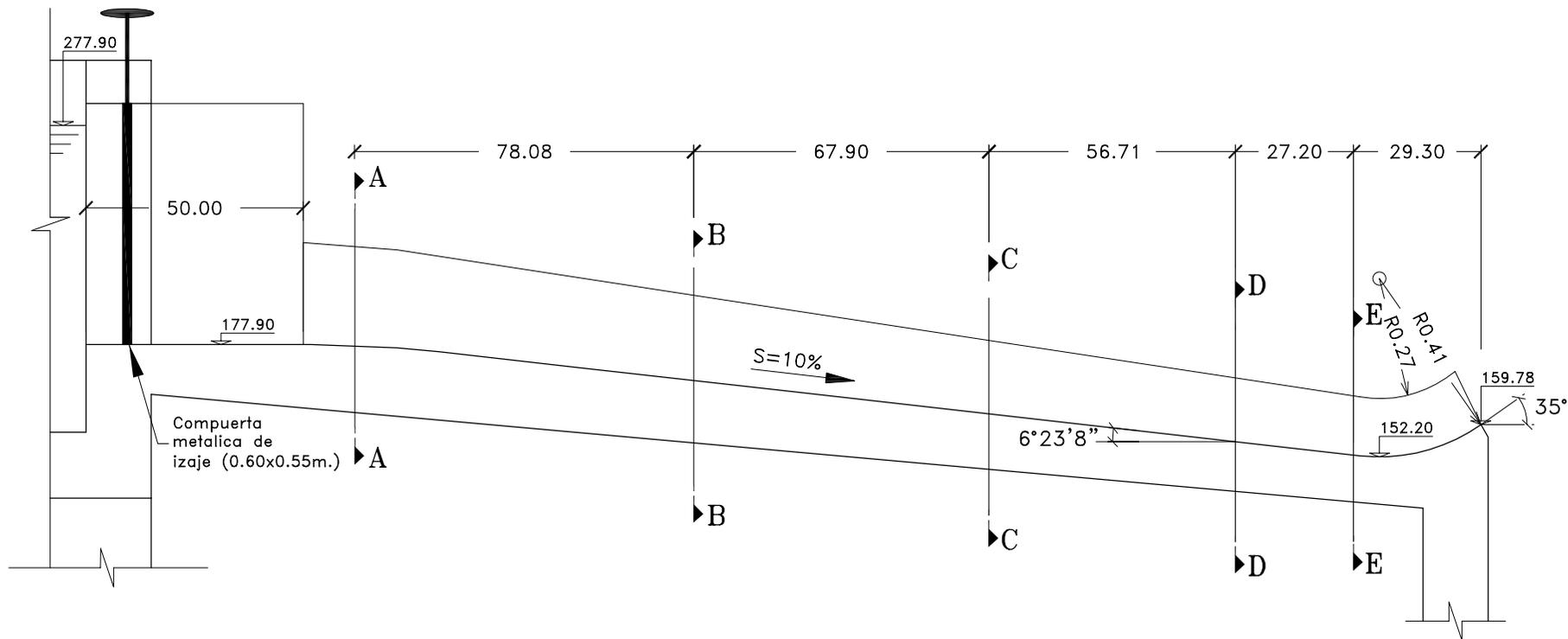
NOTA: Las dimensiones longitudinales y de altitud están dadas en centímetros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL					
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION					
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI					
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	PLANTA DEL MODELO FISICO			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	J.C - B.C.				
Fecha:	03-01-03	Escala:	1/60	Lámina N°	A-01



NOTA: Las dimensiones longitudinales y de altitud están dadas en centímetros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	PERFIL EN EL EJE DE LA RAPIDA	
Investigador:	Ing. E. Minaya		
DibujoCAD:	J.C - B.C.		
Fecha:	03-01-03	Escala:	1/45
		Lámina N° A-02	



NOTA: Las dimensiones longitudinales de altitud estan dadas en centimetros.

REF: DEPECH, LNH (2001).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL					
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION					
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI					
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	PERFIL LONGITUDINAL DE LA RAPIDA			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	J.C - B.C.				
Fecha:	03-01-03	Escala:	1/15	Lamina N°	A-03

ANEXO B

DATOS DE LA RÁPIDA Y TRAMPOLIN TIPO SKI

**Cuadro B.1. Velocidades en la Rápida registradas
con Tubo de Pitot**

N°	Fecha	Q p (m3/s)	Sección Rápida	Eje rápida	Velocidad (m/s)
				Ubicación	
1	03/04/03	0.02	A	DER	2.03
					2.03
					1.72
				CEN	1.93
					1.83
					2.03
				IZQ	1.83
					1.98
					2.03
					2.17
1.60					
2.08					
2	03/04/03	0.02	B	DER	1.93
					1.88
					1.93
				CEN	1.93
					1.77
					1.93
				IZQ	1.83
					1.93
					1.93
					2.08
1.93					
2.12					
3	03/04/2003	0.02	C	DER	1.53
					1.66
					1.40
				CEN	1.60
					1.88
					2.03
				IZQ	1.88
					1.98
					1.83
					1.83
2.03					
2.12					
4	03/04/2003	0.02	D	DER	1.40
					1.53
					1.60
				CEN	1.77
					1.98
					2.03
				IZQ	1.93
					2.03
					1.66
					1.98
1.83					
1.98					
5	03/04/2003	0.02	E	DER	1.47
					1.60
					1.66
				CEN	1.77
					1.83
					2.12
				IZQ	1.77
					1.98
					1.66
					2.12
1.77					
2.12					

**Cuadro B.2. Velocidades en la Rápida registradas
con Tubo de Pitot**

N°	Fecha	Q p (m3/s)	Sección Rápida	Eje rápida	Velocidad (m/s)
				Ubicación	
1	03/04/03	0.04	A	DER	2.21
					2.30
					2.21
				CEN	2.34
					2.21
					2.21
				IZQ	2.17
					2.34
					2.12
					2.26
					2.12
					2.34
2	03/04/03	0.04	B	DER	2.21
					2.30
					2.26
				CEN	2.12
					1.83
					2.26
				IZQ	2.26
					2.34
					1.98
					2.34
					2.34
					2.43
3	03/06/2003	0.04	C	DER	2.03
					2.34
					2.39
				CEN	2.47
					2.17
					2.39
				IZQ	2.34
					2.51
					2.26
					2.34
					2.39
					2.39
4	03/06/2003	0.04	D	DER	2.12
					2.43
					2.21
				CEN	2.34
					2.39
					2.69
				IZQ	2.69
					2.77
					2.21
					2.51
					2.62
					2.77
5	03/06/2003	0.04	E	DER	2.26
					2.47
					2.39
				CEN	2.47
					2.66
					2.73
				IZQ	2.43
					2.62
					2.34
					2.77
					2.39
					2.73

**Cuadro B.3. Velocidades en la Rápida registradas
con Tubo de Pitot**

N°	Fecha	Q p (m3/s)	Sección Rápida	Eje rápida	
				Ubicación	Velocidad (m/s)
1	03/04/03	0.06	A	DER	2.12
					2.26
					2.34
				CEN	2.30
					2.26
					2.21
				IZQ	2.26
					2.34
					2.12
					2.24
					2.34
					2.26
2	03/04/03	0.06	B	DER	2.34
					2.43
					2.34
				CEN	2.54
					2.34
					2.43
				IZQ	2.17
					2.43
					1.98
					2.43
					2.17
					2.39
3	03/04/03	0.06	C	DER	2.26
					2.26
					2.39
				CEN	2.73
					2.66
					2.73
				IZQ	2.69
					2.77
					2.17
					2.66
					2.54
					2.66
4	04/04/03	0.06	D	DER	2.34
					2.80
					2.62
				CEN	2.77
					2.73
					2.90
				IZQ	2.69
					2.77
					2.43
					2.80
					2.69
					2.80
5	07/04/03	0.06	E	DER	2.69
					2.80
					2.77
				CEN	2.84
					2.62
					2.69
				IZQ	2.84
					2.77
					2.43
					2.80
					2.66
					2.87

CUADRO B.4. DATOS DEL CHORRO

FASE I

d_{50} (mm) 1.60

d_{90} (mm) 5.96

N° Prueba	Fecha	Q (m3/s)	Colchón Agua (m)	Longitud Elevatorsky(m)	Longitud medido(m)	Angulo de Sal. θ (°)	Angulo de Inc θ_i (°)	Altura máx. del chorro*(m)
1	31/03/2003	0.02	0.10	0.62	0.75	34.99	50	0.12
2	02/04/2003	0.02	0.25	0.62	0.75	34.99	45	0.10
3	03/04/2003	0.02	0.50	0.62	0.68	34.99	20	0.20
4	04/04/2003	0.02	0.05	0.62	0.80	34.99	48	0.28
5	07/04/2003	0.04	0.05	0.68	1.12	34.99	48	0.14
6	09/04/2003	0.04	0.10	0.68	1.10	34.99	46	0.26
7	11/04/2003	0.04	0.25	0.68	1.08	34.99	43	0.26
8	15/04/2003	0.04	0.50	0.68	0.88	34.99	27	0.16
9	16/04/2003	0.06	0.05	0.75	1.23	34.99	40	0.21
10	22/04/2003	0.06	0.10	0.75	1.18	34.99	45	0.21
11	24/04/2003	0.06	0.25	0.75	1.14	34.99	40	0.21
12	28/04/2003	0.06	0.50	0.75	0.94	34.99	20	0.21

* Medido desde el nivel de salida del deflector

CUADRO B.5. DATOS DEL CHORRO

FASE II

d₅₀ (mm) 17.88

d₉₀ (mm) 24.22

N° Prueba	Fecha	Q (m ³ /s)	Colchón Agua (m)	Longitud Elevatorsky(m)	Longitud Medida (m)	Angulo de Sal. (°)	Angulo de Inc (°)	Altura máx. del chorro*(m)
1	07/05/2003	0.02	0.05	0.62	0.730	34.99	50	0.10
2	08/05/2003	0.02	0.10	0.62	0.775	34.99	45	0.10
3	09/05/2003	0.02	0.25	0.62	0.690	34.99	45	0.10
4	09/05/2003	0.02	0.50	0.62	1.030	34.99	20	0.10
5	12/05/2003	0.04	0.05	0.68	1.030	34.99	47	0.13
6	13/05/2003	0.04	0.10	0.68	1.070	34.99	48	0.16
7	14/05/2003	0.04	0.50	0.68	0.765	34.99	22	0.16
8	14/05/2003	0.04	0.25	0.68	1.000	34.99	45	0.16
9	15/05/2003	0.06	0.05	0.75	1.195	34.99	50	0.21
10	16/05/2003	0.06	0.10	0.75	1.155	34.99	48	0.21
11	19/04/2003	0.06	0.25	0.75	1.090	34.99	45	0.21
12	20/05/2003	0.06	0.50	0.75	0.950	34.99	25	0.21

* Medido desde el nivel de salida del deflector

CUADRO B.6. DATOS DEL CHORRO

FASE III

d₅₀ (mm) 49.08

d₉₀ (mm) 70.53

N° Prueba	Fecha	Q (m ³ /s)	Colchón Agua (m)	Longitud Elevatorsky(m)	Longitud Medida (m)	Angulo de Sal. (°)	Angulo de Inc (°)	Altura máx. del chorro* (m)
1	21/05/2003	0.02	0.05	0.62	0.70	34.99	50	0.10
2	21/05/2003	0.02	0.10	0.62	0.73	34.99	45	0.10
3	22/05/2003	0.02	0.25	0.62	0.69	34.99	45	0.08
4	22/05/2003	0.02	0.50	0.62	0.48	34.99	20	0.10
5	23/05/2003	0.04	0.50	0.68	0.73	34.99	22	0.16
6	26/05/2003	0.04	0.05	0.68	0.99	34.99	50	0.16
7	26/05/2003	0.04	0.10	0.68	1.09	34.99	50	0.13
8	27/05/2003	0.04	0.25	0.68	1.01	34.99	43	0.16
9	28/05/2003	0.06	0.05	0.75	1.25	34.99	49	0.22
10	30/05/2003	0.06	0.50	0.75	0.96	34.99	24	0.21
11	30/05/2003	0.06	0.25	0.75	1.11	34.99	42	0.20
12	02/06/2003	0.06	0.10	0.75	1.15	34.99	45	0.20

* Medido desde el nivel de salida del deflector

Cuadro B.7. Velocidades en el Labio del Ski registrados con el Tubo de Pitot

Fase I

$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$; $d_{85} = 5.96 \text{ mm}$

N° Prueba	Fecha	h_{CA} (m)	Q (m ³ /s)	Ejes en el ski			h_{PITOT} (cm)	Velocidad (m/s)
				Ubicación	Lec. 1	Lec. 2		
1	31/03/2003	0.10	0.02	DER				
				CEN	28 28.5	40 40.5	12.00 12.00	1.53 1.53
				IZQ				
2	02/04/2003	0.25	0.02	DER				
				CEN	30 30.5	39 39	9.00 8.50	1.33 1.29
				IZQ				
3	03/04/2003	0.50	0.02	DER				
				CEN	26 27	43 42	17.00 15.00	1.83 1.72
				IZQ				
4	04/04/2003	0.05	0.02	DER	33 34	35 35	2.00 1.00	0.63 0.44
				CEN	29	40	11.00	1.47
				IZQ	27	42	15.00	1.72
5	07/04/2003	0.05	0.04	DER	28 26	41 40	13.00 14.00	1.60 1.66
				CEN	25 26	45 44	20.00 18.00	1.98 1.88
				IZQ	24 24	43 47	19.00 23.00	1.93 2.12
6	09/04/2003	0.10	0.04	DER	23 25	44 42	21.00 17.00	2.03 1.83
				CEN	27 25	42 41	15.00 16.00	1.72 1.77
				IZQ	20 22	46 47	26.00 25.00	2.26 2.21
7	11/04/2003	0.25	0.04	DER	23 22	44 45	21.00 23.00	2.03 2.12
				CEN	28 24	39 41	11.00 17.00	1.47 1.83
				IZQ	29 25	38 41	9.00 16.00	1.33 1.77
8	15/04/2003	0.50	0.04	DER	28 26	39 42	11.00 16.00	1.47 1.77
				CEN	28 26	41 40	13.00 14.00	1.60 1.66
				IZQ	25 25	43 42	18.00 17.00	1.88 1.83
9	16/04/2003	0.05	0.06	DER	25 22	45 48	20.00 26.00	1.98 2.26
				CEN	21 23	45 45	24.00 22.00	2.17 2.08
				IZQ	21 22	49 44	28.00 22.00	2.34 2.08
10	22/04/2003	0.10	0.06	DER	25 23	45 43	20.00 20.00	1.98 1.98
				CEN	20 22	45 45	25.00 23.00	2.21 2.12
				IZQ	22 19	46 49	24.00 30.00	2.17 2.43
11	24/04/2003	0.25	0.06	DER	23 22	44 47	21.00 25.00	2.03 2.21
				CEN	22 20	43 49	21.00 29.00	2.03 2.39
				IZQ	22 19	47 49	25.00 30.00	2.21 2.43
12	28/04/2003	0.50	0.06	DER	23 23	45 46	22.00 23.00	2.08 2.12
				CEN	19 17	50 52	31.00 35.00	2.47 2.62
				IZQ	16 18	53 52	37.00 34.00	2.69 2.58

Cuadro B.8. Velocidades en el Labio del Ski registrados con el Tubo de Pitot

Fase II

$d_{50} = 17.88 \text{ mm}$; $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$

N° Prueba	Fecha	$h_{C.A.}$ (m)	Q m ³ /s	Ejes en el ski			h_{PITOT} (cm)	Velocidad (m/s)
				Ubicación	Lec. 1	Lec. 2		
1	07/05/2003	0.05	0.02	DER	33	36	3.00	0.77
					34	36	2.00	0.63
				CEN	30	39	9.00	1.33
					30	38	8.00	1.25
				IZQ	29	39	10.00	1.40
					32	36	4.00	0.89
2	08/05/2003	0.10	0.02	DER	32	38	6.00	1.08
					31	39	8.00	1.25
				CEN	30	36	6.00	1.08
					29	37	8.00	1.25
				IZQ	30	40	10.00	1.40
					29	41	12.00	1.53
3	09/05/2003	0.25	0.02	DER	34	36	2.00	0.63
					35	36	1.00	0.44
				CEN	29	39	10.00	1.40
					31	38	7.00	1.17
				IZQ	29	41	12.00	1.53
					30	41	11.00	1.47
4	09/05/2003	0.50	0.2	DER	35	35	0.00	0.00
					34	36	2.00	0.63
				CEN	30	39	9.00	1.33
					30	40	10.00	1.40
				IZQ	27	41	14.00	1.66
					28	40	12.00	1.53
5	12/05/2003	0.05	0.04	DER	25	42	17.00	1.83
					28	40	12.00	1.53
				CEN	25	44	19.00	1.93
					27	41	14.00	1.66
				IZQ	25	45	20.00	1.98
					23	46	23.00	2.12
6	13/05/2003	0.10	0.04	DER	26	41	15.00	1.72
					25	43	18.00	1.88
				CEN	25	42	17.00	1.83
					25	45	20.00	1.98
				IZQ	25	43	18.00	1.88
					20	47	27.00	2.30
7	14/05/2003	0.50	0.04	DER	24	43	19.00	1.93
					25	46	21.00	2.03
				CEN	21	49	28.00	2.34
					22	46	24.00	2.17
				IZQ	22	48	26.00	2.26
					21	49	28.00	2.34
8	14/05/2003	0.25	0.04	DER	26	43	17.00	1.83
					26	44	18.00	1.88
				CEN	25	44	19.00	1.93
					27	42	15.00	1.72
				IZQ	24	46	22.00	2.08
					22	47	25.00	2.21
9	15/05/2003	0.05	0.06	DER	21	46	25.00	2.21
					20	47	27.00	2.30
				CEN	19	48	29.00	2.39
					20	49	29.00	2.39
				IZQ	20	46	26.00	2.26
					25	44	19.00	1.93
10	16/05/2003	0.10	0.06	DER	20	48	28.00	2.34
					22	45	23.00	2.12
				CEN	21	48	27.00	2.30
					20	48	28.00	2.34
				IZQ	20	50	30.00	2.43
					18	51	33.00	2.54
11	19/05/2003	0.25	0.06	DER	21	43	22.00	2.08
					22	47	25.00	2.21
				CEN	20	48	28.00	2.34
					20	49	29.00	2.39
				IZQ	22	47	25.00	2.21
					25	48	23.00	2.12
12	20/05/2003	0.50	0.06	DER	22	46	24.00	2.17
					20	47	27.00	2.30
				CEN	20	50	30.00	2.43
					18	48	30.00	2.43
				IZQ	15	52	37.00	2.69
					17	52	35.00	2.62

Cuadro B.9. Velocidades en el Labio del Ski registrados con el Tubo de Pitot

Fase III

$d_{50} = 49.08 \text{ mm}$; $d_{85} = 70.53 \text{ mm}$

N° Prueba	Fecha	$h_{C.A}$ (m)	Q (m^3/s)	Ejes en el ski			h_{PITOT} (cm)	Velocidad (m/s)
				Ubicación	Lec. 1	Lec. 2		
1	21/05/2003	0.05	0.02	DER	30	39	9.00	1.33
					29	39	10.00	1.40
				CEN	32	36	4.00	0.89
					31	36	5.00	0.99
				IZQ	32	35	3.00	0.77
30	38	8.00	1.25					
2	21/05/2003	0.10	0.02	DER	32	35	3.00	0.77
					32	35	3.00	0.77
				CEN	30	38	8.00	1.25
					31	39	8.00	1.25
				IZQ	29	40	11.00	1.47
28	41	13.00	1.60					
3	22/05/2003	0.25	0.02	DER	31	35	4.00	0.89
					32	33	1.00	0.44
				CEN	31	38	7.00	1.17
					21	37	16.00	1.77
				IZQ	27	40	13.00	1.60
26	41	15.00	1.72					
4	22/05/2003	0.50	0.02	DER	32	35	3.00	0.77
					33	37	4.00	0.89
				CEN	29	39	10.00	1.40
					29	39	10.00	1.40
				IZQ	30	38	8.00	1.25
31	38	7.00	1.17					
5	23/05/2003	0.50	0.04	DER	25	40	15.00	1.72
					25	41	16.00	1.77
				CEN	26	42	16.00	1.77
					27	41	14.00	1.66
				IZQ	25	43	18.00	1.88
22	45	23.00	2.12					
6	26/05/2003	0.05	0.04	DER	25	42	17.00	1.83
					25	41	16.00	1.77
				CEN	26	44	18.00	1.88
					29	39	10.00	1.40
				IZQ	24	44	20.00	1.98
25	43	18.00	1.88					
7	26/05/2003	0.10	0.04	DER	25	45	20.00	1.98
					23	42	19.00	1.93
				CEN	27	45	18.00	1.88
					22	45	23.00	2.12
				IZQ	22	46	24.00	2.17
21	45	24.00	2.17					
8	27/05/2003	0.25	0.04	DER	36	41	5.00	0.99
					25	43	18.00	1.88
				CEN	25	43	18.00	1.88
					25	44	19.00	1.93
				IZQ	22	46	24.00	2.17
24	46	22.00	2.08					
9	28/05/2003	0.05	0.06	DER	20	47	27.00	2.30
					20	46	26.00	2.26
				CEN	20	47	27.00	2.30
					21	48	27.00	2.30
				IZQ	20	48	28.00	2.34
20	48	28.00	2.34					
10	30/05/2003	0.50	0.06	DER	22	45	23.00	2.12
					20	48	28.00	2.34
				CEN	18	50	32.00	2.51
					20	45	25.00	2.21
				IZQ	19	48	29.00	2.39
19	50	31.00	2.47					
11	30/05/2003	0.25	0.06	DER	20	45	25.00	2.21
					20	46	26.00	2.26
				CEN	22	47	25.00	2.21
					18	48	30.00	2.43
				IZQ	20	50	30.00	2.43
20	48	28.00	2.34					
12	02/06/2003	0.10	0.06	DER	21	45	24.00	2.17
					22	46	24.00	2.17
				CEN	22	48	26.00	2.26
					25	40	15.00	1.72
				IZQ	20	47	27.00	2.30
20	48	28.00	2.34					

ANEXO C

Datos recolectados en el proceso de erosión y
Análisis de Regresión

Cuadro C.1. Datos usados en la Investigación

Fase	N° Prueba	Q (m3/s)	B (m)	q (m3/s/m)	Eo (m)	hs (m)	θ_0 (°)	Vo (m/s)	z (m)	H (m)	h _{CA} (m)	θ_i (°)	sen θ_i	V _i (m/s)	b _i (m)	y _i (m)	G	d ₉₀ (mm)	d ₈₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	v (T = 20°) (m ² /s)
I	4	0.020	0.60	0.033	1.980	0.183	34.99	1.233	0.450	0.851	0.05	50	0.766	4.085	0.55	0.009	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	1	0.020	0.60	0.033	1.980	0.189	34.99	1.233	0.400	0.801	0.10	49	0.755	3.963	0.55	0.009	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	2	0.020	0.60	0.033	1.980	0.115	34.99	1.233	0.250	0.651	0.25	45	0.707	3.573	0.55	0.010	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	3	0.020	0.60	0.033	1.980	0.000	34.99	1.233	0.001	0.401	0.50	20	0.342	2.804	0.55	0.013	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	5	0.040	0.60	0.067	2.066	0.309	34.99	1.854	0.450	0.937	0.05	50	0.766	4.286	0.55	0.017	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	6	0.040	0.60	0.067	2.066	0.301	34.99	1.854	0.400	0.887	0.10	49	0.755	4.170	0.55	0.017	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	7	0.040	0.60	0.067	2.066	0.245	34.99	1.854	0.250	0.737	0.25	45	0.707	3.801	0.55	0.019	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	8	0.040	0.60	0.067	2.066	0.000	34.99	1.854	0.001	0.487	0.50	21	0.358	3.089	0.55	0.024	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	9	0.060	0.60	0.100	2.103	0.389	34.99	2.319	0.450	0.974	0.05	50	0.766	4.369	0.55	0.025	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	10	0.060	0.60	0.100	2.103	0.410	34.99	2.319	0.400	0.924	0.10	49	0.755	4.256	0.55	0.026	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	11	0.060	0.60	0.100	2.103	0.349	34.99	2.319	0.250	0.774	0.25	45	0.707	3.895	0.55	0.028	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
	12	0.060	0.60	0.100	2.103	0.076	34.99	2.319	0.001	0.524	0.50	20	0.342	3.204	0.55	0.034	2.73	5.96	4.81	1.60	1.01E-06
II	1	0.020	0.60	0.033	1.980	0.155	34.99	1.233	0.450	0.851	0.05	50	0.766	4.085	0.55	0.009	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	2	0.020	0.60	0.033	1.980	0.150	34.99	1.233	0.400	0.801	0.10	49	0.755	3.963	0.55	0.009	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	3	0.020	0.60	0.033	1.980	0.000	34.99	1.233	0.250	0.651	0.25	45	0.707	3.573	0.55	0.010	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	4	0.020	0.60	0.033	1.980	0.000	34.99	1.233	0.001	0.401	0.50	20	0.342	2.804	0.55	0.013	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	5	0.040	0.60	0.067	2.066	0.273	34.99	1.854	0.450	0.937	0.05	50	0.766	4.287	0.55	0.017	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	6	0.040	0.60	0.067	2.066	0.251	34.99	1.854	0.400	0.887	0.10	49	0.755	4.171	0.55	0.017	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	8	0.040	0.60	0.067	2.066	0.162	34.99	1.854	0.250	0.737	0.25	45	0.707	3.802	0.55	0.019	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	7	0.040	0.60	0.067	2.066	0.000	34.99	1.854	0.001	0.487	0.50	21	0.358	3.090	0.55	0.024	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	9	0.060	0.60	0.100	2.103	0.347	34.99	2.319	0.450	0.974	0.05	50	0.766	4.369	0.55	0.025	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	10	0.060	0.60	0.100	2.103	0.352	34.99	2.319	0.400	0.924	0.10	49	0.755	4.256	0.55	0.026	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	11	0.060	0.60	0.100	2.103	0.300	34.99	2.319	0.250	0.774	0.25	45	0.707	3.895	0.55	0.028	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
	12	0.060	0.60	0.100	2.103	0.000	34.99	2.319	0.001	0.524	0.50	20	0.342	3.204	0.55	0.034	2.76	24.22	23.43	17.88	1.01E-06
III	1	0.020	0.60	0.033	1.980	0.060	34.99	1.233	0.450	0.851	0.05	50	0.766	4.085	0.55	0.009	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	2	0.020	0.60	0.033	1.980	0.058	34.99	1.233	0.400	0.801	0.10	49	0.755	3.963	0.55	0.009	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	3	0.020	0.60	0.033	1.980	0.000	34.99	1.233	0.250	0.651	0.25	45	0.707	3.573	0.55	0.010	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	4	0.020	0.60	0.033	1.980	0.000	34.99	1.233	0.001	0.401	0.50	20	0.342	2.804	0.55	0.013	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	6	0.040	0.60	0.067	2.066	0.137	34.99	1.854	0.450	0.937	0.05	50	0.766	4.287	0.55	0.017	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	7	0.040	0.60	0.067	2.066	0.127	34.99	1.854	0.400	0.887	0.10	49	0.755	4.171	0.55	0.017	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	8	0.040	0.60	0.067	2.066	0.062	34.99	1.854	0.250	0.737	0.25	44	0.695	3.802	0.55	0.019	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	5	0.040	0.60	0.067	2.066	0.000	34.99	1.854	0.001	0.487	0.50	21	0.358	3.090	0.55	0.024	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	9	0.060	0.60	0.100	2.103	0.166	34.99	2.319	0.450	0.974	0.05	50	0.766	4.369	0.55	0.025	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	12	0.060	0.60	0.100	2.103	0.171	34.99	2.319	0.400	0.924	0.10	49	0.755	4.256	0.55	0.026	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	11	0.060	0.60	0.100	2.103	0.128	34.99	2.319	0.250	0.774	0.25	45	0.707	3.895	0.55	0.028	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06
	10	0.060	0.60	0.100	2.103	0.000	34.99	2.319	0.001	0.524	0.50	21	0.358	3.204	0.55	0.034	2.66	70.53	70.53	49.08	1.01E-06

Cuadro C.2. Datos ordenados para calcular los parámetros estadísticos de la ecuación (6.1)

Fase	$\frac{h_s}{y_i}$	$\frac{z}{H}$	$\frac{d_{85}}{d_{50}}$	$\left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)$	$\left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)$	$\left(\frac{H}{\frac{h_{CA}}{\text{sen } \theta_i}} \right)$
I	20.606	0.529	3.008	0.014	13.830	13.035
	20.645	0.500	3.008	0.016	13.216	6.044
	11.340	0.384	3.008	0.026	11.312	1.841
	18.237	0.480	3.008	0.028	10.510	14.350
	17.233	0.451	3.008	0.032	10.086	6.691
	12.801	0.339	3.008	0.051	8.777	2.083
	15.600	0.462	3.008	0.043	8.834	14.915
	16.014	0.433	3.008	0.048	8.491	6.970
	12.459	0.323	3.008	0.077	7.434	2.188
	2.244	0.002	3.008	19.206	5.547	0.358
II	17.426	0.529	1.310	0.004	13.830	13.035
	16.394	0.500	1.310	0.005	13.216	6.044
	16.112	0.480	1.310	0.008	10.512	14.354
	14.414	0.451	1.310	0.038	10.089	6.694
	8.475	0.339	1.310	0.015	8.780	2.084
	13.897	0.462	1.310	0.114	8.834	14.915
	13.750	0.433	1.310	0.057	8.491	6.970
	10.727	0.323	1.310	0.023	7.434	2.188
III	6.786	0.529	1.437	0.003	13.830	13.035
	6.311	0.500	1.437	0.003	13.216	6.044
	8.100	0.480	1.437	0.005	10.512	14.354
	7.273	0.451	1.437	0.006	10.089	6.694
	3.257	0.339	1.437	0.009	8.780	2.048
	6.666	0.462	1.437	0.008	8.834	14.915
	6.668	0.433	1.437	0.009	8.491	6.970
	4.553	0.323	1.437	0.014	7.434	2.188

Cuadro C.3. Valores Pronosticados de hs/y_i usando la ec.6.1 y valores medidos de hs/y_i

Valores pronosticados hs/y_i	Valores medidos hs/y_i
20.891	20.606
18.797	20.645
14.231	11.340
17.747	18.237
16.012	17.233
12.251	12.801
15.998	15.600
14.449	16.014
11.098	12.459
2.247	2.244
11.818	17.426
10.633	16.394
10.041	16.112
15.503	14.414
6.932	8.475
21.206	13.897
13.987	13.750
6.278	10.727
9.936	6.786
8.940	6.311
8.443	8.100
7.617	7.273
5.821	3.257
7.609	6.666
6.872	6.668
5.279	4.553

Resultados de la Regresión

Constante	0
Error típico	2.792
R^2	0.692
Nº.Observaciones	26
Grados de Libertad	25
Coeficiente X	0.787
Error típico del Coeficiente	0.104

Cuadro C.4. Valores Pronosticados de hs usando la ec. 6.1 y valores medidos de hs

Valores pronosticados hs (m)	Valores medidos hs (m)
0.186	0.183
0.172	0.189
0.145	0.115
0.301	0.309
0.279	0.301
0.234	0.245
0.399	0.389
0.370	0.410
0.311	0.349
0.076	0.076
0.105	0.155
0.098	0.150
0.170	0.273
0.270	0.251
0.133	0.162
0.529	0.347
0.358	0.352
0.176	0.300
0.088	0.060
0.082	0.058
0.143	0.137
0.133	0.127
0.111	0.062
0.190	0.166
0.176	0.171
0.148	0.128

Resultados de la Regresión

Constante	0
Error típico	0.056
R ²	0.763
Nº.Observaciones	26
Grados de Libertad	25
Coefficiente X	0.931
Error típico del Coeficiente	0.103

Estimación del Modelo

Regression Analysis: y versus x1, x2, x3, x4, x5

The regression equation is

$$y = 1.16 + 0.625 x_1 + 0.119 x_2 + 0.388 x_3 + 1.38 x_4 + 0.0688 x_5$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	1.1594	0.7865	1.47	0.156	
x1	0.6254	0.1242	5.03	0.000	4.9
x2	0.1185	0.2041	0.58	0.568	1.8
x3	0.38753	0.09136	4.24	0.000	6.9
x4	1.3777	0.4348	3.17	0.005	2.8
x5	0.06883	0.09741	0.71	0.488	2.3

S = 0.3012 R-Sq = 78.2% R-Sq(adj) = 72.7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	6.5027	1.3005	14.33	0.000
Residual Error	20	1.8146	0.0907		
Total	25	8.3172			

Source	DF	Seq SS
x1	1	2.8711
x2	1	1.4784
x3	1	0.7983
x4	1	1.3096
x5	1	0.0453

Unusual Observations

Obs	x1	y	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	-6.26	0.8085	0.8096	0.3010	-0.0011	-0.11 X
23	-1.08	1.1809	1.7615	0.1241	-0.5806	-2.12R

R denotes an observation with a large standardized residual
X denotes an observation whose X value gives it large influence.

Durbin-Watson statistic = 1.68

Evaluación de Supuestos

No Multicolinealidad

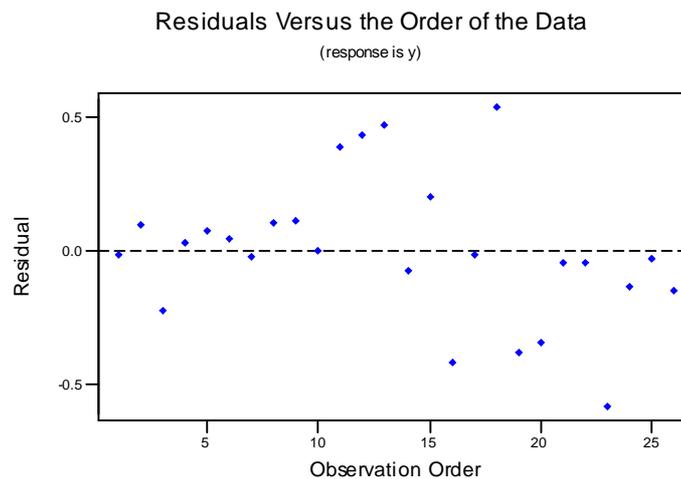
Para que no exista multicolinealidad, los FIV (Factores de inflación de varianza) deben ser menores a 5. Al parecer habría un problema de multicolinealidad en la variable x3 (tal vez con la variable x1)

No Autocorrelación de errores

Durbin-Watson statistic = 1.68

Como el coeficiente de Dubin Watson (1.68) se encuentra entre 1.635 y 2, entonces no existe autocorrelación de errores de primer orden, por lo tanto no hay regresión espúrea.

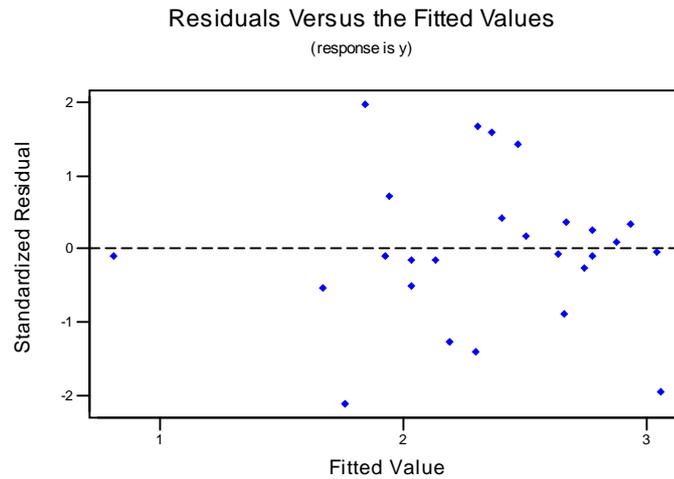
Este resultado se puede visualizar en la gráfica de los residuales vs el orden de los datos:



La interpretación de este gráfico es la siguiente: los datos no tienen un patrón, sino forman una nube de puntos. Sólo la existencia de un par de observaciones extremas que están fuera de las bandas (0.5), las cuales pueden estar afectando al modelo de forma mínima.

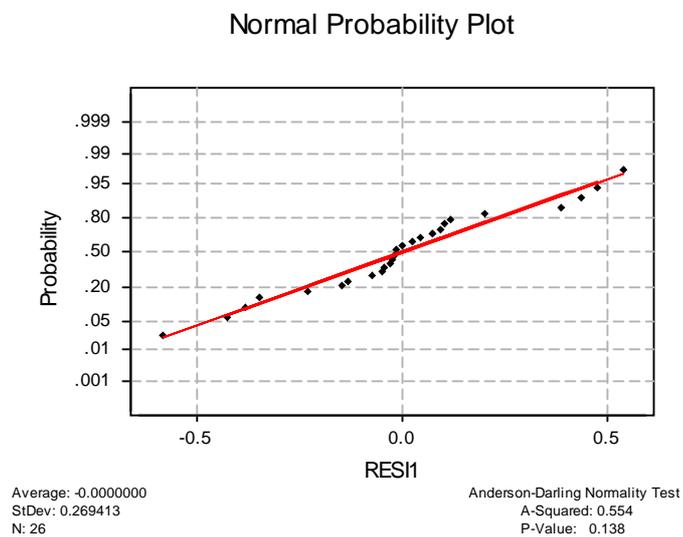
Homocedasticidad (Variancia común)

Se graficaron los residuales estandarizados con los valores ajustados, se observa del siguiente gráfico que no existe un patrón definido que pueda indicar la existencia de homocedasticidad.



Normalidad de los errores

De acuerdo a la prueba de Anderson-Darling, los errores si se ajustan a una distribución normal como se observa en el siguiente gráfico. Además el valor de $p = 0.138$ es mayor a 0.05 que corresponde al nivel de significancia.



ANEXO D

Datos de velocidades en el Cuenco

CUADRO D.1. Velocidades Medias en el cuenco

continuación

FASE I

d₅₀ (mm) 1.60
 d₈₅ (mm) 4.81
 d₉₀ (mm) 5.96

Sección	Punto	Parametros	0+210					0+240			0+270
			Eje	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	Eje		
Q = 0.02 m ³ /s	5	Velocidad (m/s)		0.371	0.509	0.671	0.465	0.344			
		Angulo (°)		120/140	30	0	-50/-60	-90/-110			
	10	Velocidad (m/s)		0.21		0.58		0.19			
		Angulo (°)		115/130		0		-50/-60			
	25	Velocidad (m/s)		0.337	0.332	0.580	0.367	0.474			
		Angulo (°)		-40	-20/-40	0/-20	-80/-160	-150/160			
	50	Velocidad (m/s)		0.226	0.317	0.239	0.114	0.276			
		Angulo (°)		25/30	-70	0/-10	-170	-135			
Q = 0.04 m ³ /s	5	Velocidad (m/s)	0.712	0.818	0.758	0.661	0.628	0.532	0.774		
		Angulo (°)	-20.00	90/95	80/85	-10/-15	-60/-70	-95/-100	-15/-20		
	10	Velocidad (m/s)	1.039	1.315	0.808	0.874	0.636	0.707	0.645		
		Angulo (°)									
	25	Velocidad (m/s)	1.637	1.097	1.604	1.209	1.214	0.595	1.279		
		Angulo (°)	0/-20	160/180	80/100	-5/-20	-40/-50	-165/175	0/-5		
	50	Velocidad (m/s)	1.540	1.872	1.442	1.686	1.001	1.391	1.004		
		Angulo (°)	30/50	-150/-160	35/40	30/50	-10	30	-5/-25		
Q = 0.06 m ³ /s	5	Velocidad (m/s)	1.097	0.570	0.393	0.697		0.722	0.831		
		Angulo (°)	-90	125/135	130/140	60/80	-140/-165	-120/-140	-10		
	10	Velocidad (m/s)	1.365		1.482	1.338	1.492	1.513	1.330		
		Angulo (°)	-100/-120		130/140	-80/-100	-120/-130	-130/-155	-30/-35		
	25	Velocidad (m/s)	1.689		1.462	1.632	1.791	1.067	1.381		
		Angulo (°)	-75/-70		140/160	-30/-40	-100	170/180	-20		
	50	Velocidad (m/s)	1.345	2.278	2.318	1.551	1.507		1.437		
		Angulo (°)	20/40	180/160	45/60	20/30	+145		+10/+20		

CUADRO D.2. Velocidades Medias en el cuenco

FASE II

d₅₀ (mm) 17.88

d₈₅ (mm) 23.43

d₉₀ (mm) 24.22

Sección Distancia (m)	C.A.	Parametros	0+090					0+135	0+120					0+150	0+180					
			1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	Eje	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	Eje	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	
Q = 0.02 m3/s	5	Velocidad (m/s)							0.357	0.320	0.489		1.335	0.266	0.398	0.712	0.322			
		Angulo (°)		+10°		-50°a -55°				20 a 30°		+10°				20/25		-10		
	10	Velocidad (m/s)							1.102	0.783	0.474		0.861		0.261	0.335	0.601	0.383		
		Angulo (°)							30 / 75	-80 / -100	-35 / -45		-20/-25	+10	-5 / 5	-20/-30	-35/-40	-95/-100		
	25	Velocidad (m/s)			1.60373333					1.691555556			1.590211			1.823289				
		Angulo (°)			0/+5					0/+10			0/+10			0/+5				
50	Velocidad (m/s)			0.638					0.717066667			0.68			0.656					
	Angulo (°)			+5/-10					+5/-5			+5/-5			-5/+5					
Q = 0.04 m3/s	5	Velocidad (m/s)			0.638					1.823			0.715	0.455	0.516	0.793	0.422	0.503		
		Angulo (°)			+5/-10					+5/-5			-20/-80	+90	+45/+50	-15/-30	-40/-50	-40/-50		
	10	Velocidad (m/s)			0.78293333			1.299711					1.295	1.092	1.918	1.011	1.335	0.921		
		Angulo (°)			+5/-5			0/-5					-50/-80	+90	+40/+45	-15/-30	+70/+80	-180/-120		
	25	Velocidad (m/s)								1.484			1.239		1.234	1.127	0.962			
		Angulo (°)								0/10			-5/-15		+40/+50	-20/-30	-25/-30			
50	Velocidad (m/s)			1.131					1.431						1.583					
	Angulo (°)			-5					0/-5				-5/+20		+10					
Q = 0.06 m3/s	5	Velocidad (m/s)											1.681	1.675		1.708	2.045			
		Angulo (°)												-175/180	140/150		-140/-160	-100	-160	
	10	Velocidad (m/s)											1.835	1.675		1.198	1.766			
		Angulo (°)											270/280	140/150		10	-100/-110	-170/-180		
	25	Velocidad (m/s)											1.567	1.431	1.021	1.744	2.136			
		Angulo (°)											-10/10	160/180	-120	-10	-60	-170/-180		
50	Velocidad (m/s)								1.440			2.115	1.870							
	Angulo (°)								20/30			20/40			20/60					

CUADRO D.2. Velocidades Medias en el cuenco

continuación

FASE II

d₅₀ (mm) 17.88
d₈₅ (mm) 23.43
d₉₀ (mm) 24.22

Sección Distancia (m)	C.A.	Parametros	0+210			0+240			0+270		
			Eje	-0.6	-1.2	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	Eje
Q = 0.02 m3/s	5	Velocidad (m/s)						0.387			0.594
		Angulo (°)						+10°			+5
	10	Velocidad (m/s)	0.342983					0.747467			0.5144
		Angulo (°)	0.5					-10/-20			+30
	25	Velocidad (m/s)	1.350383		0.979			1.21865			1.377422222
		Angulo (°)	0/+15	-120/-140	-160/-170			0/+20			0/+40
50	Velocidad (m/s)	0.542					0.61	0.347	0.180	0.7424	
	Angulo (°)	5					0/+5	+5	+5	0/+5	
Q = 0.04 m3/s	5	Velocidad (m/s)	1.236					1.036			0.536
		Angulo (°)	-40/-50					0/+5			0/+5
	10	Velocidad (m/s)	1.11					0.98			0.872455556
		Angulo (°)	0/-5					0			45/55
	25	Velocidad (m/s)	1.776					1.198			1.797
		Angulo (°)	+5/-25					-10/-20			180
50	Velocidad (m/s)	1.556					1.266			1.506	
	Angulo (°)	-5/-20					0/-20			0/-20	
Q = 0.06 m3/s	5	Velocidad (m/s)	2.049			1.425	1.830	1.236	1.214	1.371	1.416
		Angulo (°)	-50/-80			150/170	+40	-50/-65	-85/-95		0/-5
	10	Velocidad (m/s)	1.638			2.156	1.497	1.352	1.165	1.171	1.117
		Angulo (°)	-90/-110			120/160	5/15	-10	-85/-95	-100/-110	-10
	25	Velocidad (m/s)	1.547			1.769	1.705	1.879	1.006		1.084
		Angulo (°)	-90			120/160	+40/45	-10	-60/-70	-90	0
50	Velocidad (m/s)	1.649				1.705	1.325	1.742		1.398	
	Angulo (°)	10/40			120/160		20/40			-35	

CUADRO D.3. Velocidades Medias en el Cuenco

FASE III

d₅₀ (mm) 49.08
d₈₅ (mm) 70.53
d₉₀ (mm) 70.53

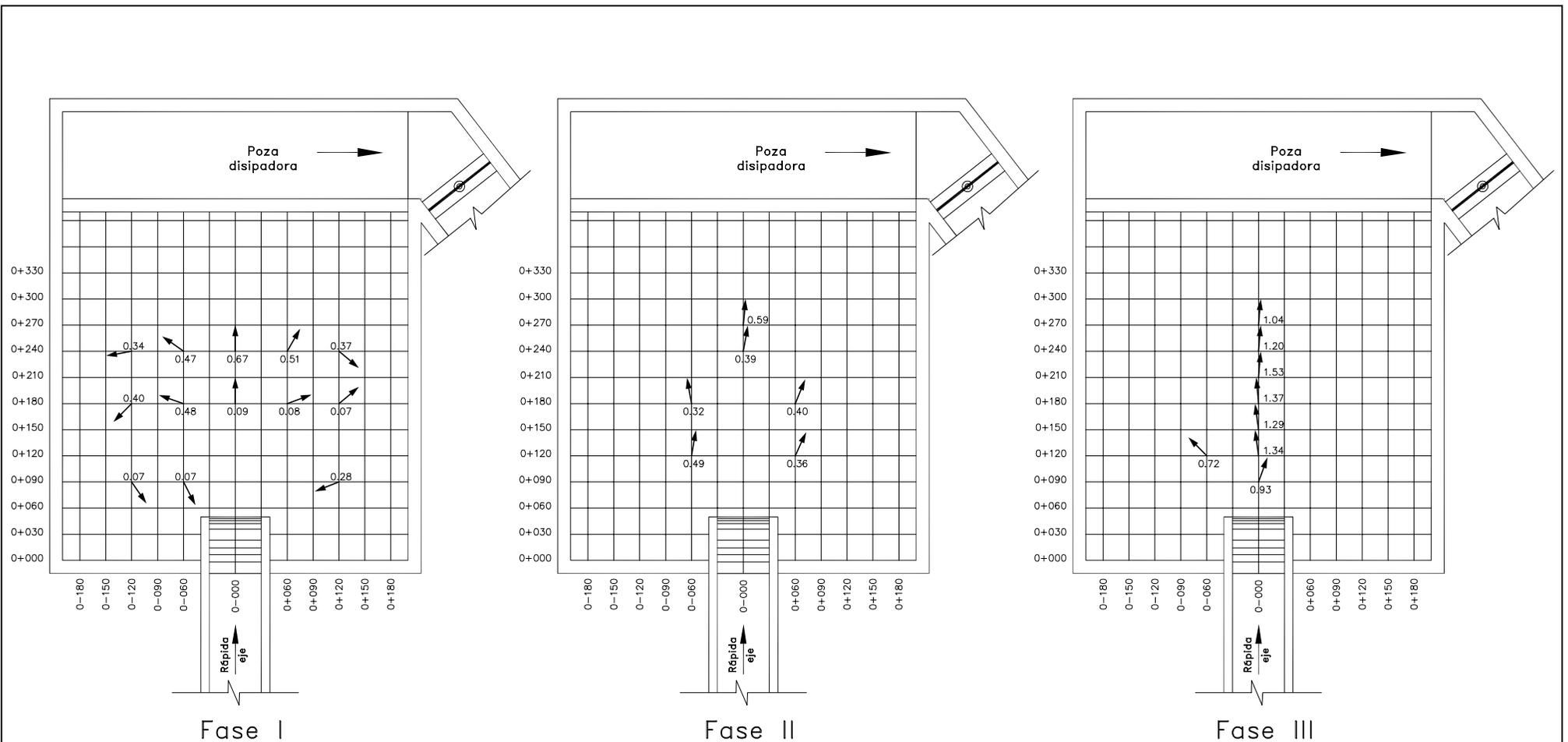
Sección Distancia (m)	C.A.	Parametros	0+060		0+090				0+120				0+135		0+150				0+180				
			Eje	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2	0.6	Eje	-0.6	0.6	Eje	-0.6	1.2	0.6	Eje	-0.6
Q = 0.02 m3/s	5	Velocidad (m/s)				0.932				1.342	0.715						1.285				1.492	1.365	1.943
		Angulo (°)				20				-5/-10	-45						-5/-10				+35		-5
	10	Velocidad (m/s)				1.708				1.535							1.994				1.168	2.278	1.969
		Angulo (°)				5/10				-5/5	-20/-25						-5/+5				+35	+30/35	0/-5
	25	Velocidad (m/s)				2.050				1.889	1.036						2.077					1.458	1.384
		Angulo (°)				140				95/100	0/-10						+10				+35	+30/35	+10
50	Velocidad (m/s)	1.529			1.651				1.296	0.790						1.317				1.153		1.203	
Q = 0.04 m3/s	5	Velocidad (m/s)				0.783				1.401	1.445					1.761				1.918	2.181	2.131	
		Angulo (°)				+5/-5				-10/-15	-20/-30					0/-15				+40/+45	0/-10	-30/-40	
	10	Velocidad (m/s)													2.060	1.963				2.327	2.220	2.227	
		Angulo (°)													-10	-10/-20				+20/+30	-5/10	-35/-40	
	25	Velocidad (m/s)												0.10	0.62	0.17	0.618268				0.098933	0.747467	0.387733
		Angulo (°)												-20/-30	+5/+20		0/+10				0/+10	0/+10	+50/+70
50	Velocidad (m/s)				1.350				0.742							1.046				1.212	0.879	0.991	
Q = 0.06 m3/s	5	Velocidad (m/s)				0/-10				0/10						-5/20				1.358		20/40	0/10
		Angulo (°)														1.055				-180/-160		0.867	1.366
	10	Velocidad (m/s)														0.925	1.559	0.841		0.659	1.778	1.429	
		Angulo (°)														100/120	-15/-25	-30/-40		-20/-45	0/+5	-5/-20	
	25	Velocidad (m/s)												0.820	0.195	1.142				0.494	0.915	1.3808	
		Angulo (°)												-10/10	-10/-20	-30/-40				120/140	-40	-35/-45	
50	Velocidad (m/s)							0.142	0.927						0.840				140/150	0.261	0.661	0.749	
	Angulo (°)							-30/-35	-10/+10										+5/+10	20/40	60		

CUADRO D.3. Velocidades Medias en el Cuenco

continuación....

FASE III
 d₅₀ (mm) 49.08
 d₈₅ (mm) 70.53
 d₉₀ (mm) 70.53

Sección Distancia (m)	C.A.	Parametros	0+210	0+240				0+270
			Eje	1.2	0.6	Eje	-0.6	-1.2
Q = 0.02 m3/s	5	Velocidad (m/s)	1.529			1.199		1.036
		Angulo (°)	+5			+5		+5
	10	Velocidad (m/s)	1.725335			1.507233		1.9964
		Angulo (°)	0/5			0/5		5/10
	25	Velocidad (m/s)	1.523			1.658		1.257
		Angulo (°)	5/10			+10		+10
50	Velocidad (m/s)	1.225			1.377		1.536	
	Angulo (°)	+45			+15/+35		+20/60	
Q = 0.04 m3/s	5	Velocidad (m/s)	1.864			1.138		1.139
		Angulo (°)	0/-10			0/-10		0/-20
	10	Velocidad (m/s)	1.696			1.710		1.558
		Angulo (°)	+5/-10			+5/-10		0/-30
	25	Velocidad (m/s)	1.446			1.984		1.953
		Angulo (°)	5/20			0/15		-10/+10
50	Velocidad (m/s)	0.656			1.259		1.011	
	Angulo (°)	20/50			0/15		20/30	
Q = 0.06 m3/s	5	Velocidad (m/s)	1.958			1.283		0.853
		Angulo (°)	0/-10			0/-20		0/-20
	10	Velocidad (m/s)	1.493			2.566		1.918
		Angulo (°)	-5/-20			0/-20		0/-20
	25	Velocidad (m/s)	1.089			1.021		0.757
		Angulo (°)	-15/-25			-10/-30		0/-20
50	Velocidad (m/s)	0.687			0.650		0.742	
	Angulo (°)	5/20			-10/10		-15/15	



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

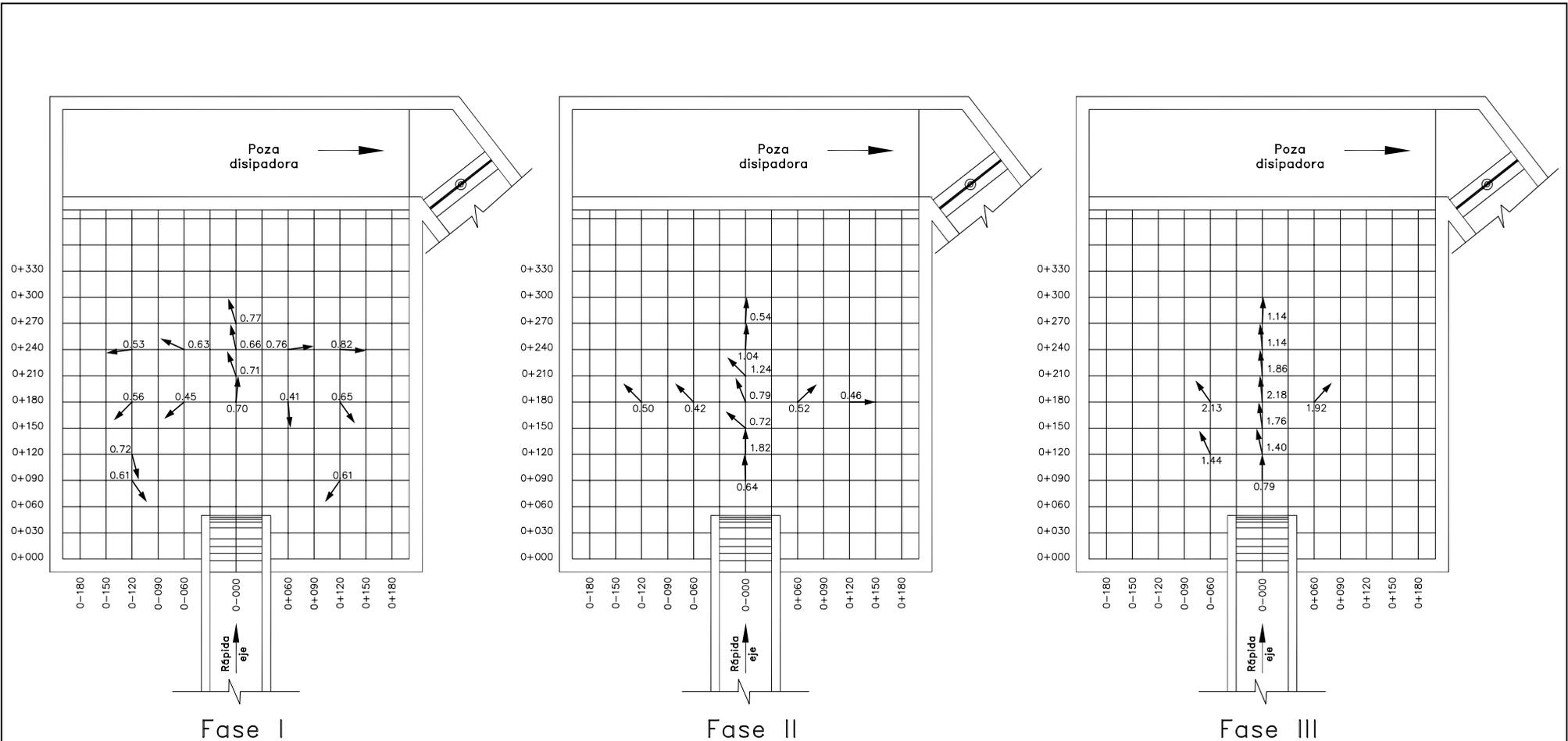


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.05m, Q = 0.02m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-01



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

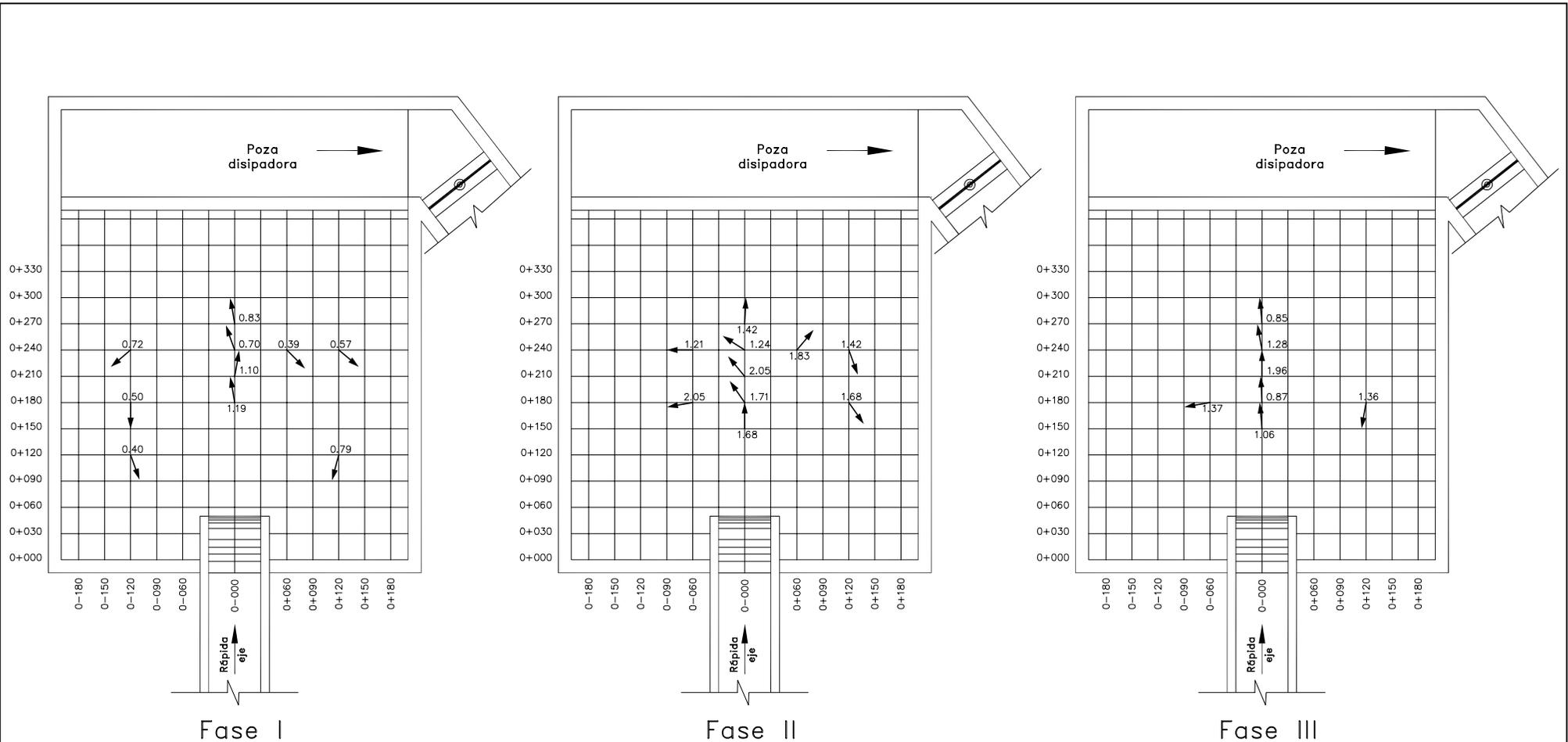


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

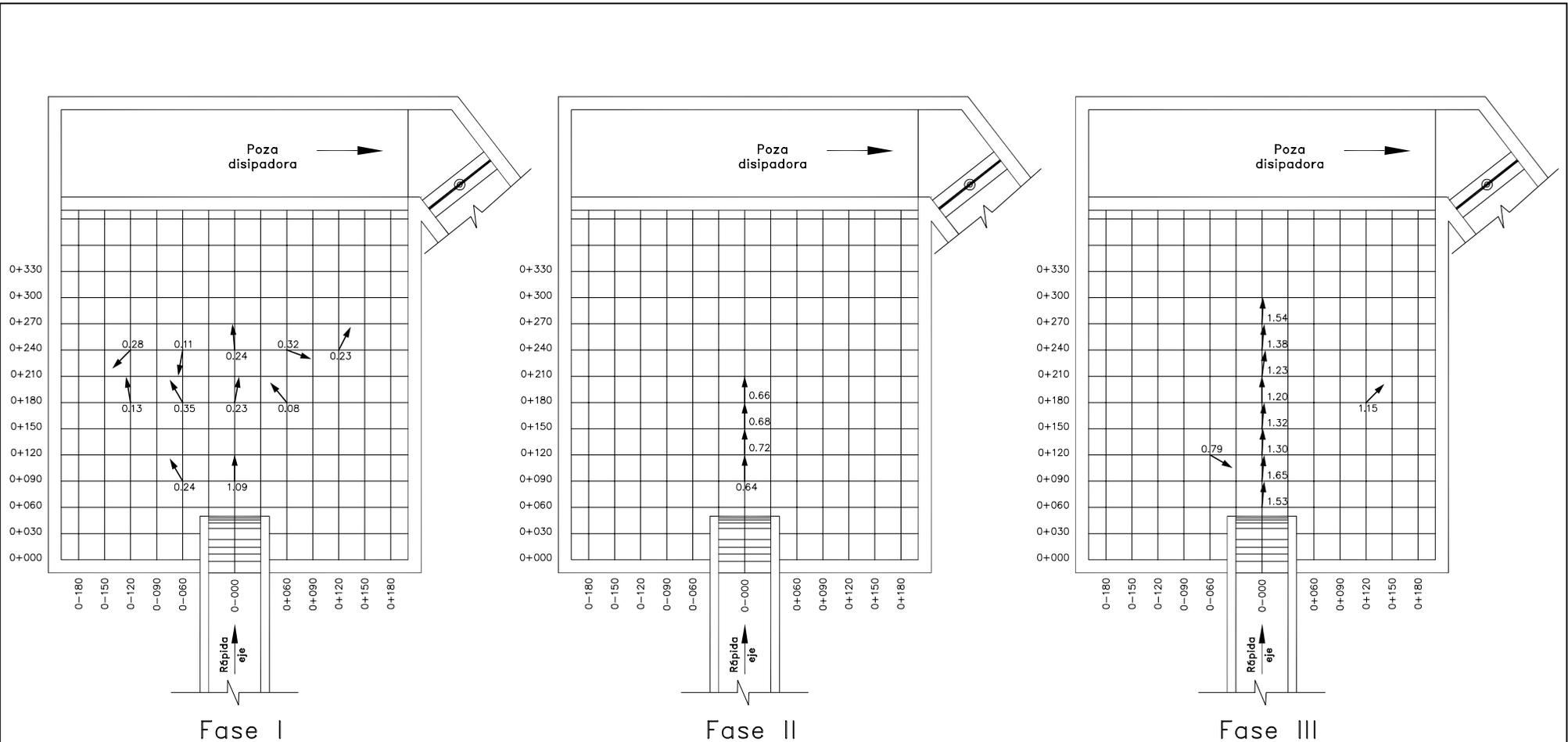
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.05m, Q = 0.04m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-02



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.05m, Q = 0.06m^3/s$	
Investigador:	Ing. E. Minaya		
DibujoCAD:	B.C.		
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E
		Lámina N° D-03	



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

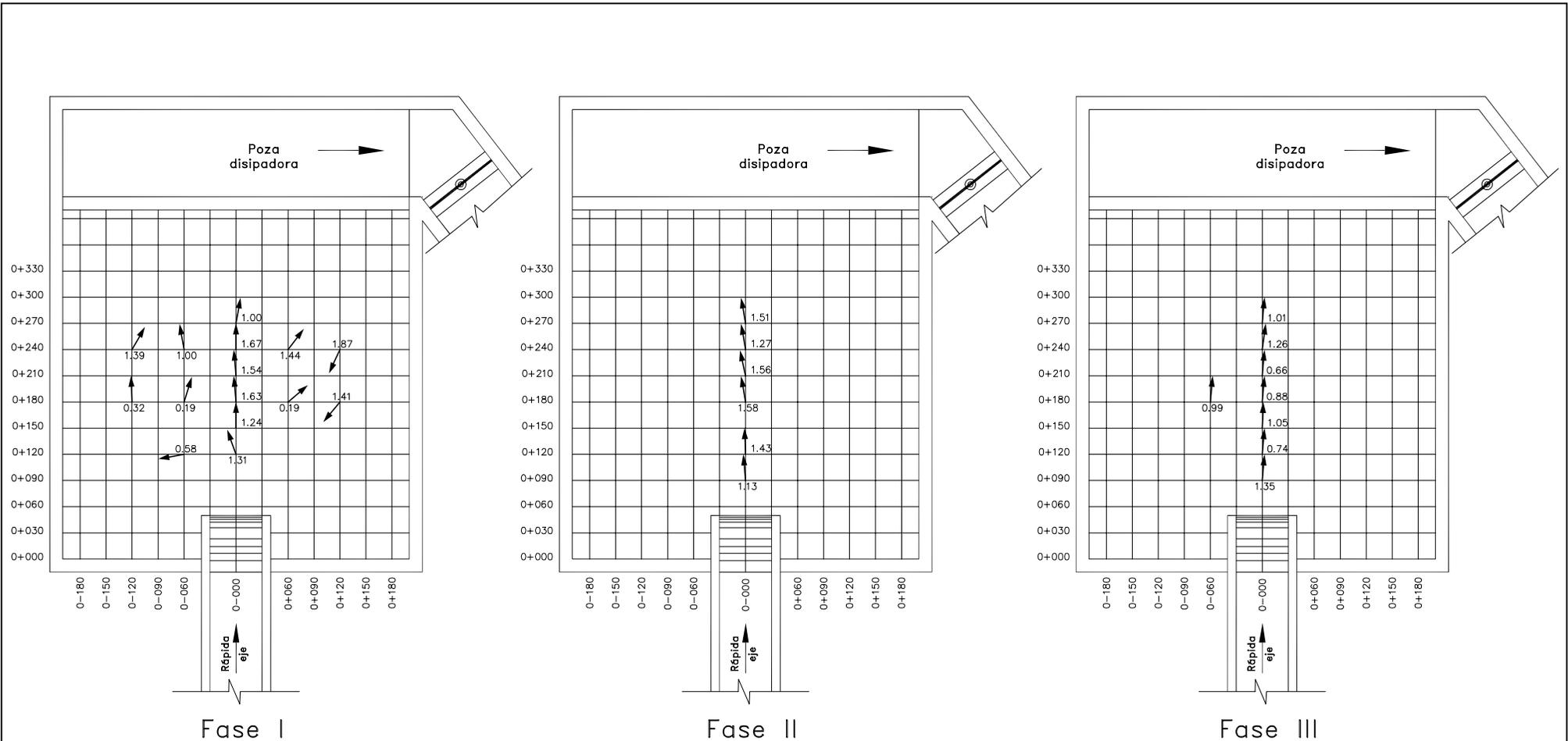


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

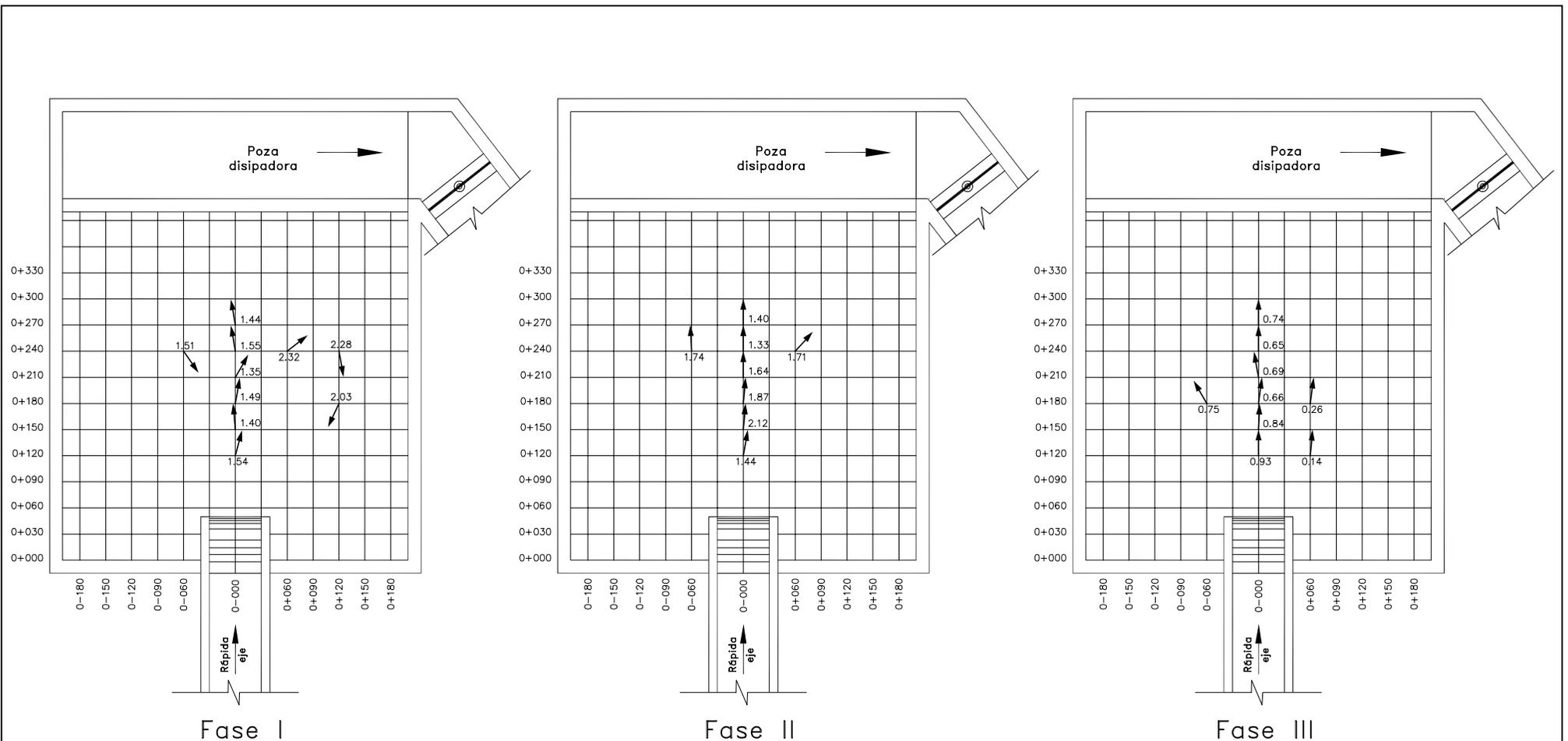
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.50m, Q = 0.02m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-04



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.50m, Q = 0.04m^3/s$	
Investigador:	Ing. E. Minaya		
DibujoCAD:	B.C.		
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E
		Lámina N° D-05	



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

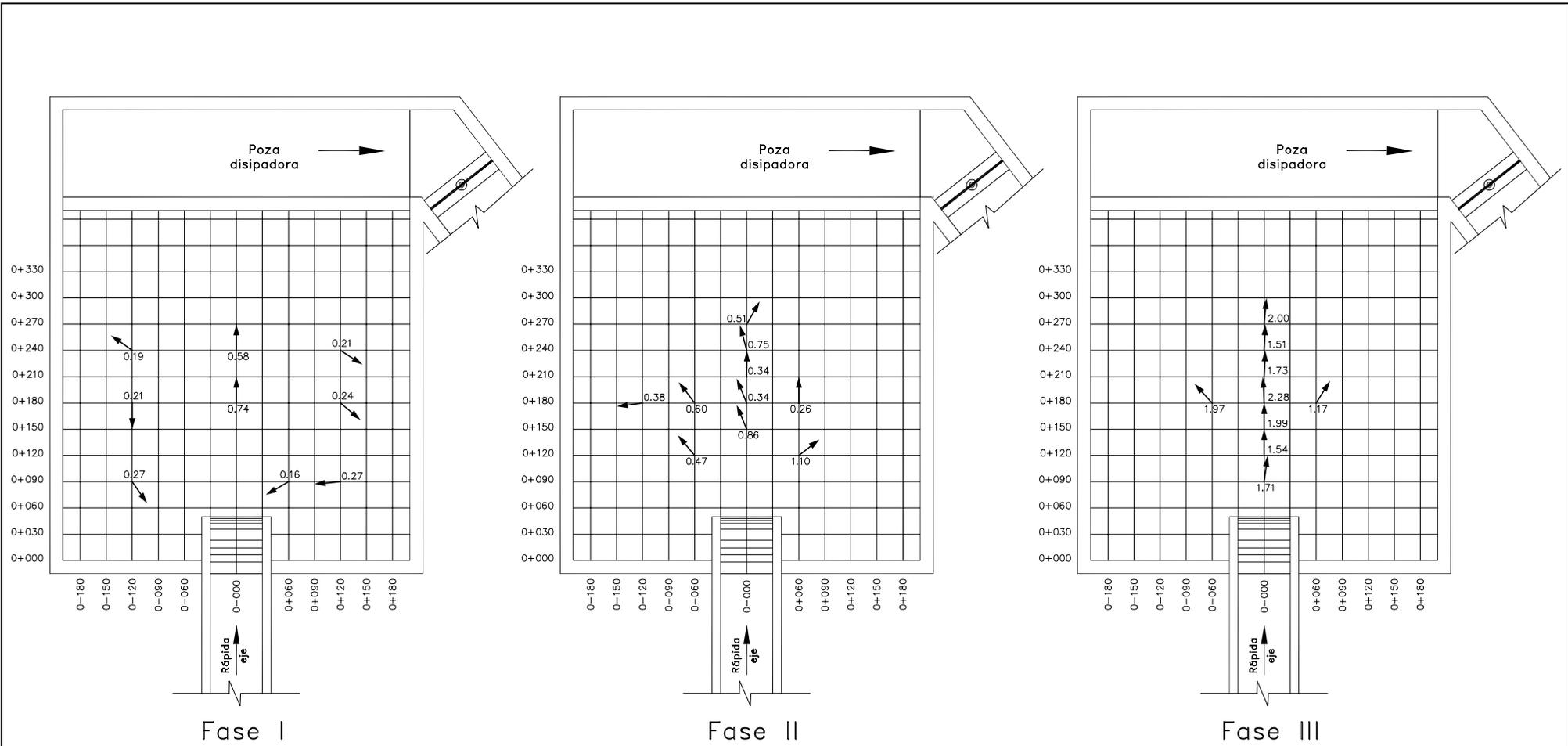


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

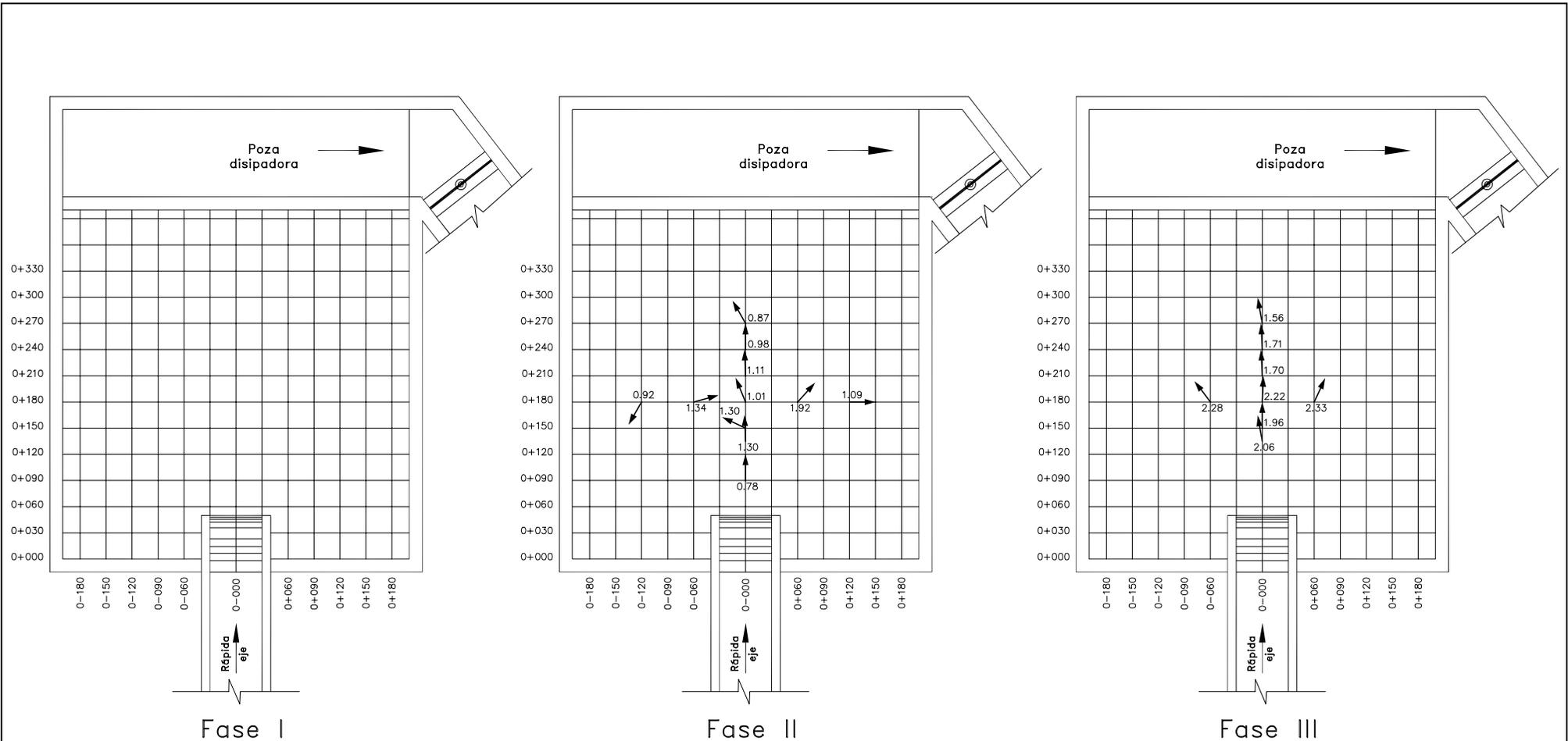
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.50m, Q = 0.06m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-06



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d ₅₀ (mm)	d ₉₀ (mm)	d ₈₅ (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.10m, Q = 0.02m^3/s$	
Investigador:	Ing. E. Minaya		
DibujoCAD:	B.C.		
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E
		Lámina N° D-07	



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

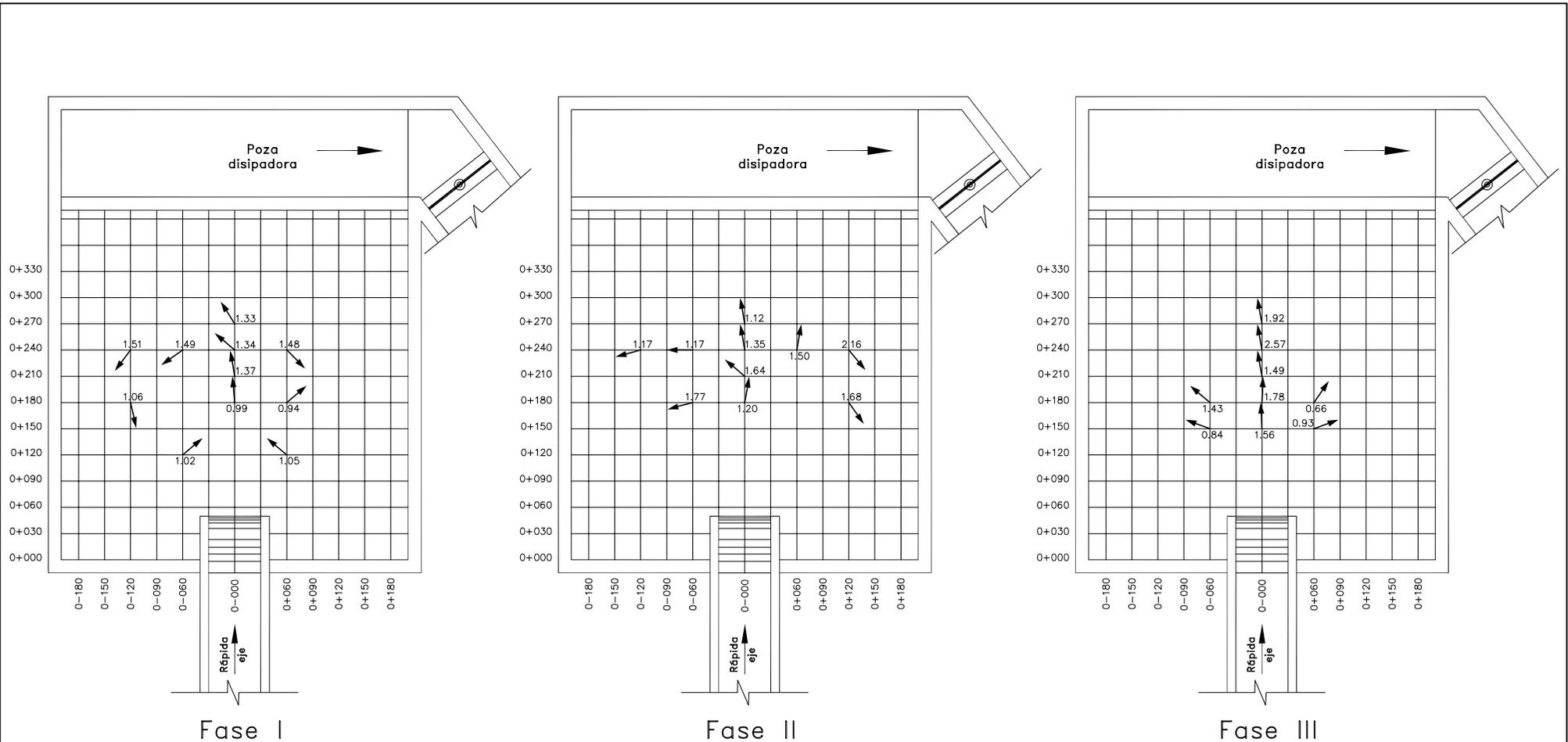


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.10m, Q = 0.04m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-08



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

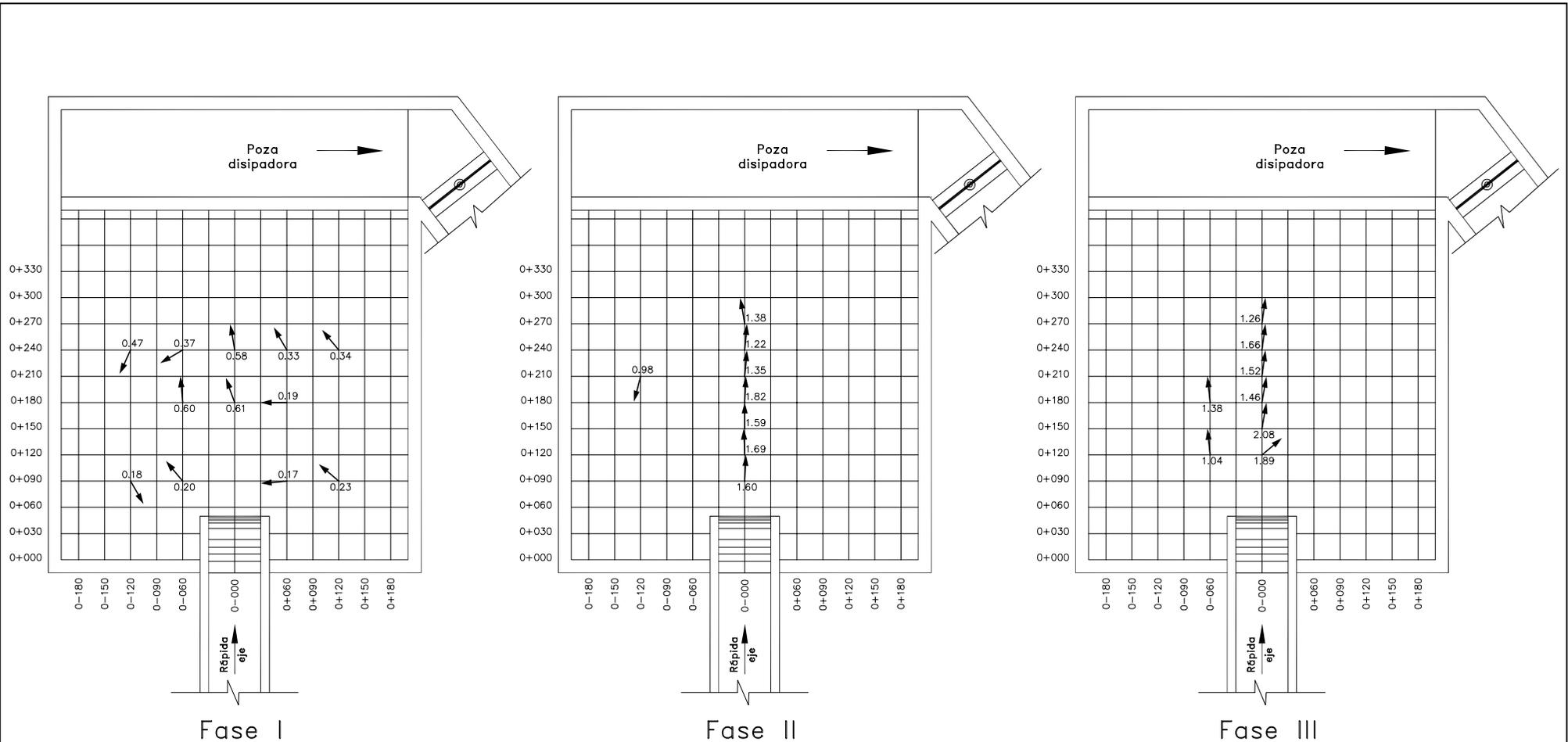


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.10m, Q = 0.06m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-09



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

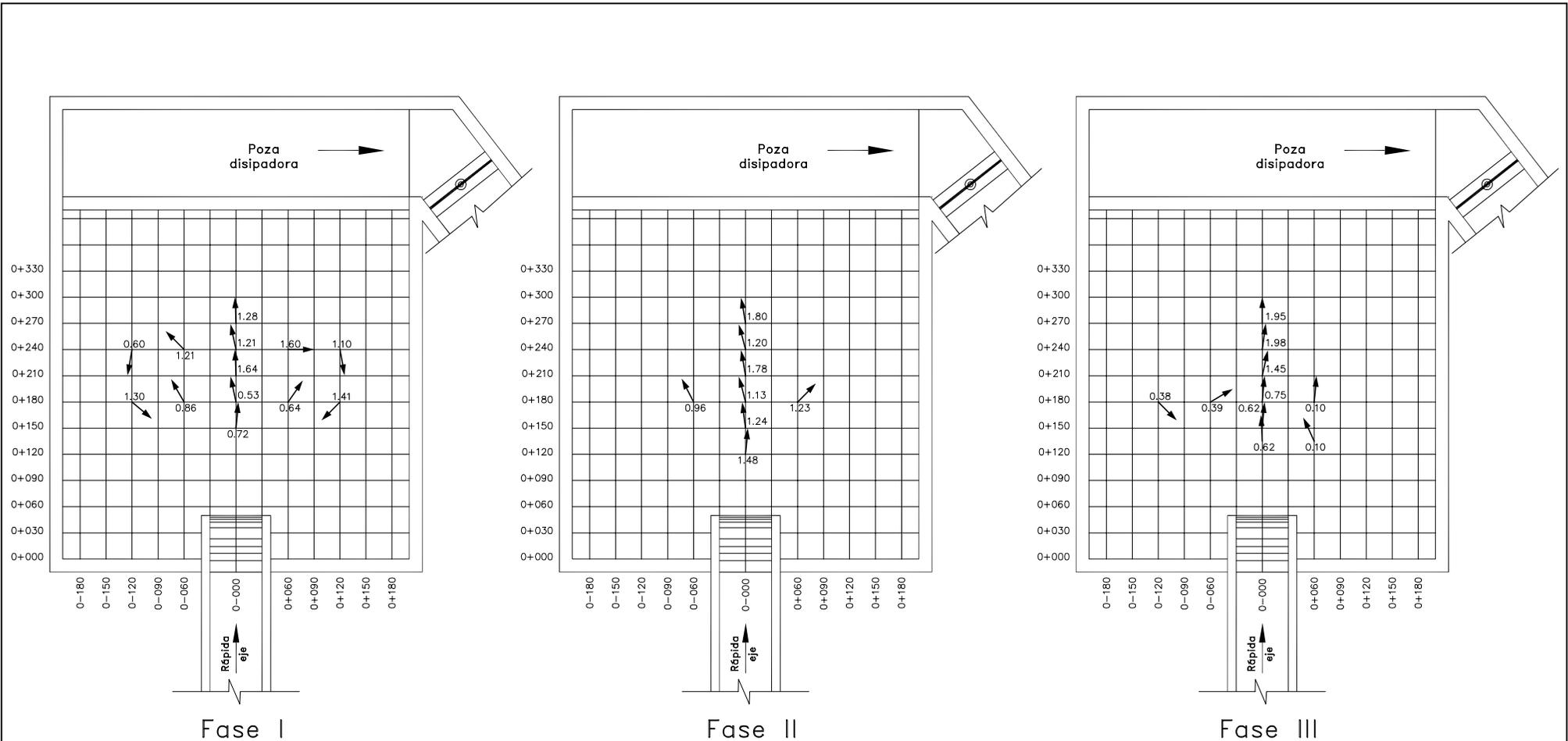


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

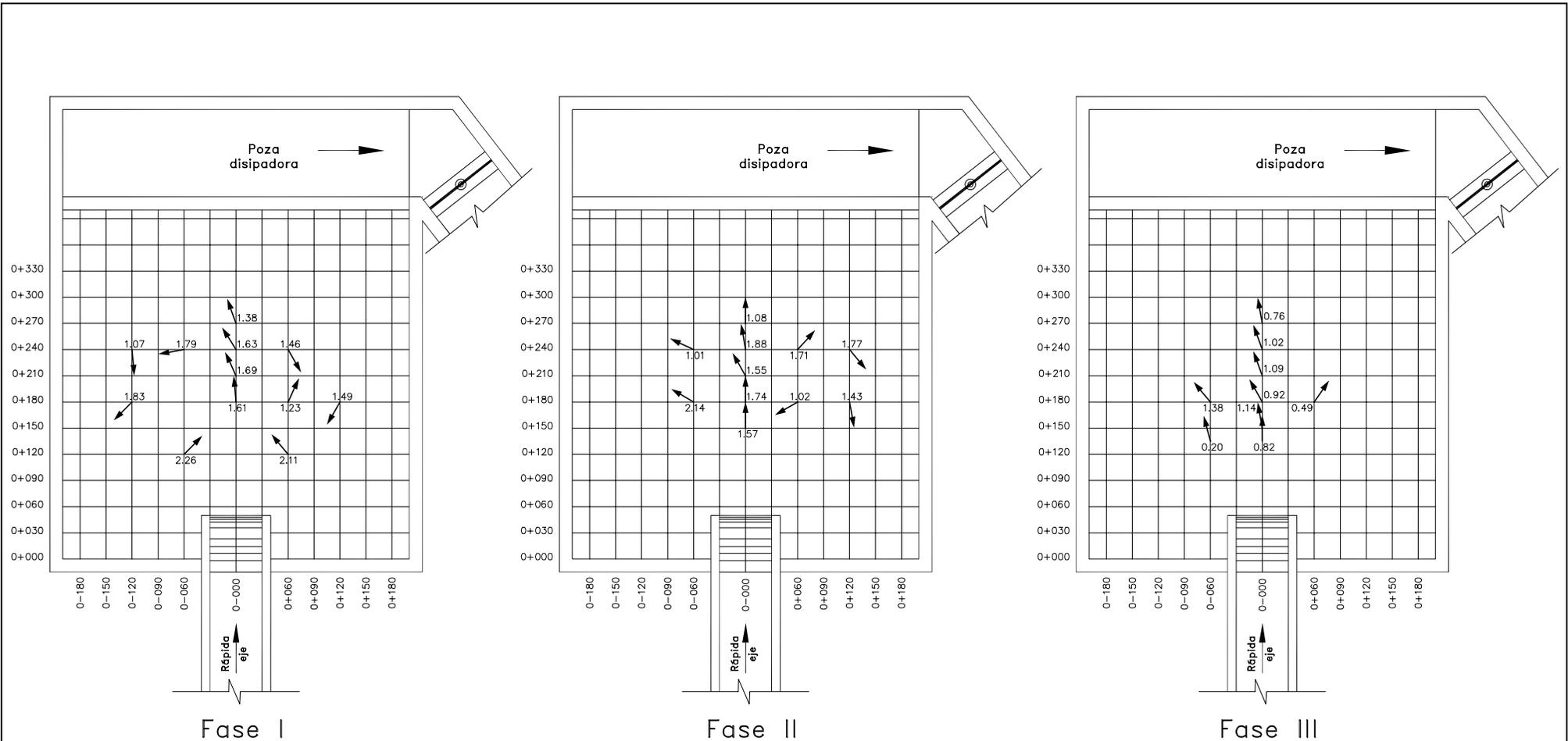
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.25m, Q = 0.02m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-10



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.25m, Q = 0.04m^3/s$	
Investigador:	Ing. E. Minaya		
DibujoCAD:	B.C.		
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E
		Lámina N° D-11	



Granulometría del Material del Lecho del Cuenco

	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	d_{85} (mm)
Fase I	1.60	5.96	4.81
Fase II	17.88	24.22	23.43
Fase III	49.08	70.53	70.53



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	VELOCIDADES MEDIAS EN EL CUENCO $h_{CA} = 0.25m, Q = 0.06m^3/s$			
Investigador:	Ing. E. Minaya				
DibujoCAD:	B.C.				
Fecha:	07-05-03	Escala:	S/E	Lámina N°	D-12

ANEXO E

Análisis del Tiempo vs Profundidad de Erosión

Cuadro E.1. Datos registrados de la profundidad de erosión en el tiempo

Fase I

D ₅₀ (mm)	1.60
D ₈₅ (mm)	4.81
D ₉₀ (mm)	5.96

Prueba	Q (m ³ /s)	h _{CA} (m)	Tiempo acumulado (tac) (min)	Profundidad acumulada (hsp) (m)
1	0.02	0.10	5.00	0.10
			30.00	0.20
			120.00	0.20
2	0.02	0.25	3.00	0.10
			120.00	0.10
3	0.02	0.50	0.00	0.00
4	0.02	0.05	4.00	0.10
			22.00	0.20
			39.00	0.20
			110.00	0.20
			120.00	0.20
5	0.04	0.05	5.50	0.10
			5.80	0.20
			6.00	0.30
			13.00	0.30
			90.00	0.30
			120.00	0.30
6	0.04	0.10	8.50	0.10
			9.00	0.20
			13.00	0.30
			86.00	0.30
			120.00	0.30
7	0.04	0.25	5.50	0.10
			6.00	0.20
			18.00	0.20
			103.00	0.20
			120.00	0.20
8	0.04	0.50	0.00	0.00
9	0.06	0.05	8.20	0.10
			8.50	0.20
			9.00	0.30
			22.00	0.30
			48.00	0.40
			60.00	0.40
			120.00	0.40
10	0.06	0.10	11.00	0.10
			11.40	0.20
			12.00	0.30
			30.00	0.30
			70.00	0.40
			90.00	0.40
			120.00	0.40
11	0.06	0.25	4.50	0.10
			4.80	0.20
			5.00	0.30
			23.00	0.30
			59.00	0.30
			120.00	0.30
12	0.06	0.50	120.00	0.0764

Cuadro E.2. Datos registrados de la profundidad de erosión en el tiempo

Fase II

D ₅₀ (mm)	17.88
D ₈₅ (mm)	23.43
D ₉₀ (mm)	24.22

Prueba	Q (m ³ /s)	h _{CA} (m)	Tiempo acumulado (tac) (min)	Profundidad acumulada (hsp) (m)
1	0.02	0.05	3.50	0.10
			120.00	0.10
2	0.02	0.10	3.50	0.10
			120.00	0.10
3	0.02	0.25	0.00	0.00
4	0.02	0.50	0.00	0.00
5	0.04	0.05	1.10	0.10
			1.60	0.10
			3.60	0.10
			9.50	0.20
			18.00	0.20
			120.00	0.20
18	0.04	0.10	0.88	0.10
			9.00	0.10
			16.00	0.20
			120.00	0.20
19	0.04	0.50	0.00	0.00
20	0.04	0.25	2.80	0.10
			80.00	0.10
			120.00	0.10
21	0.06	0.05	0.25	0.10
			1.28	0.20
			9.15	0.30
			18.00	0.30
			42.00	0.30
			60.00	0.30
120.00	0.30			
22	0.06	0.10	0.62	0.10
			0.83	0.20
			7.12	0.30
			60.00	0.30
			120.00	0.40
23	0.06	0.25	0.90	0.10
			2.83	0.20
			120.00	0.20
24	0.06	0.50	0.00	0.00

Cuadro E.3. Datos registrados de la profundidad de erosión en el tiempo

Fase III

D ₅₀ (mm)	49.08
D ₈₅ (mm)	70.53
D ₉₀ (mm)	70.53

Prueba	Q (m ³ /s)	h _{CA} (m)	Tiempo acumulado (tac) (min)	Profundidad acumulada (hsp) (m)
1	0.02	0.05	120.00	0.0604
2	0.02	0.10	120.00	0.0579
3	0.02	0.25	0.00	0.00
4	0.02	0.50	0.00	0.00
5	0.04	0.50	0.00	0.00
6	0.04	0.05	120.00	0.1374
7	0.04	0.10	120.00	0.1189
8	0.04	0.25	120.00	0.0759
9	0.06	0.05	0.48	0.10
			13.00	0.20
			60.00	0.20
			120.00	0.20
10	0.06	0.50	0.00	0.00
11	0.06	0.25	10.85	0.10
			120.00	0.20
12	0.06	0.10	6.85	0.10
			38.68	0.10
			60.50	0.20
			120.00	0.20

Cuadro E.4. Datos para la relación de Tiempo acumulado(t_{ac}) vs. Profundidad erosión (h_p) para el caudal de 0.06 m³/s

Fase	Prueba	Q (m ³ /s)	h_{CA} (m)	D_{50} (mm)	Tiempo acumulado (t_{ac}) (min)	Profundidad erosión (h_s) (m)	Tiempo total (Tt) (min)	h_s total (m)
I	9	0.06	0.05	1.60	0.00	0.00	120	0.3894
					0.55	0.10		
					0.55	0.20		
					0.57	0.30		
					48.00	0.40		
	120.00	0.40						
	10	0.06	0.10	1.60	0.00	0.00	120	0.4104
					0.50	0.10		
					0.58	0.20		
1.42					0.30			
70.00					0.40			
70.00					0.40			
90.00	0.40							
120.00	0.40							
11	0.06	0.25	1.60	0.00	0.00	120	0.3489	
				0.78	0.10			
				1.50	0.20			
				9.00	0.30			
				23.00	0.30			
				59.00	0.30			
				120.00	0.30			
				120.00	0.30			
II	9	0.06	0.05	17.88	0.00	0.00	120	0.3463
					0.25	0.10		
					1.28	0.20		
					9.15	0.30		
					18.00	0.30		
					42.18	0.30		
	60.00	0.30						
	120.00	0.30						
	10	0.06	0.10	17.88	0.00	0.00	120	0.3524
0.62					0.10			
0.83					0.20			
5.73	0.30							
120.00	0.30							
11	0.06	0.25	17.88	0.00	0.00	120	0.3004	
				0.90	0.10			
				3.50	0.20			
120.00	0.20							
III	9	0.06	0.05	49.08	0.00	0.00	120	0.1664
					0.48	0.10		
					13.00	0.20		
					60.00	0.20		
					120.00	0.20		
	11	0.06	0.25	49.08	0.00	0.00	120	0.1649
					10.85	0.10		
	120.00	0.10						
	12	0.06	0.10	49.08	0.00	0.00	120	0.1709
6.85					0.10			
60.50					0.20			
120.00					0.20			

ANEXO F

Granulometría de los Materiales



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S04 - 067

SOLICITADO : ING. ELSA V. MINAYA ESPINOZA
PROYECTO : TESIS: "EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI"
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 30, Enero del 2004

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Muestra	ARENA	GRAVA	BOLEO
Malla	(%) Acumulado que pasa		
3"			100.0
2"			54.3
1 1/2"		100.0	11.4
1"		97.5	0.8
3/4"	100.0	57.3	0.0
1/2"	98.7	17.8	0.0
3/8"	97.0	6.1	0.0
1/4"	91.7	0.8	0.0
N°4	84.8	0.0	
N°10	60.4		
N°20	30.4		
N°30	22.6		
N°40	17.7		
N°60	13.8		
N°100	5.8		
N°200	2.5		
% de Grava	15.2	100.0	100.0
% de Arena	82.3	0.0	0.0
% de Finos	2.5	0.0	0.0
GRAVEDAD ESPECIFICA DE SOLIDOS ASTM D-854	2.73	2.76	2.66
PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³) ASTM C-29	1.577	1.364	1.595
PESO UNITARIO VARILLADO (gr/cm³) ASTM C-29	1.755	1.532	1.699

Muestras remitidas e identificadas por el solicitante

Realizado por: Tec. Fred Dávila V.

Revisado por: Ing. A. Quiñones V.

ANTIOCO Y QUIÑONES VILLANUEVA
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI



ING. WILFREDO GUTIERREZ LAZARUS
 ING. JEFE DEL LAB. No. 2
 Mecánica de Suelos - UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S04 - 067

Solicitado : ING. ELSA V. MINAYA ESPINOZA

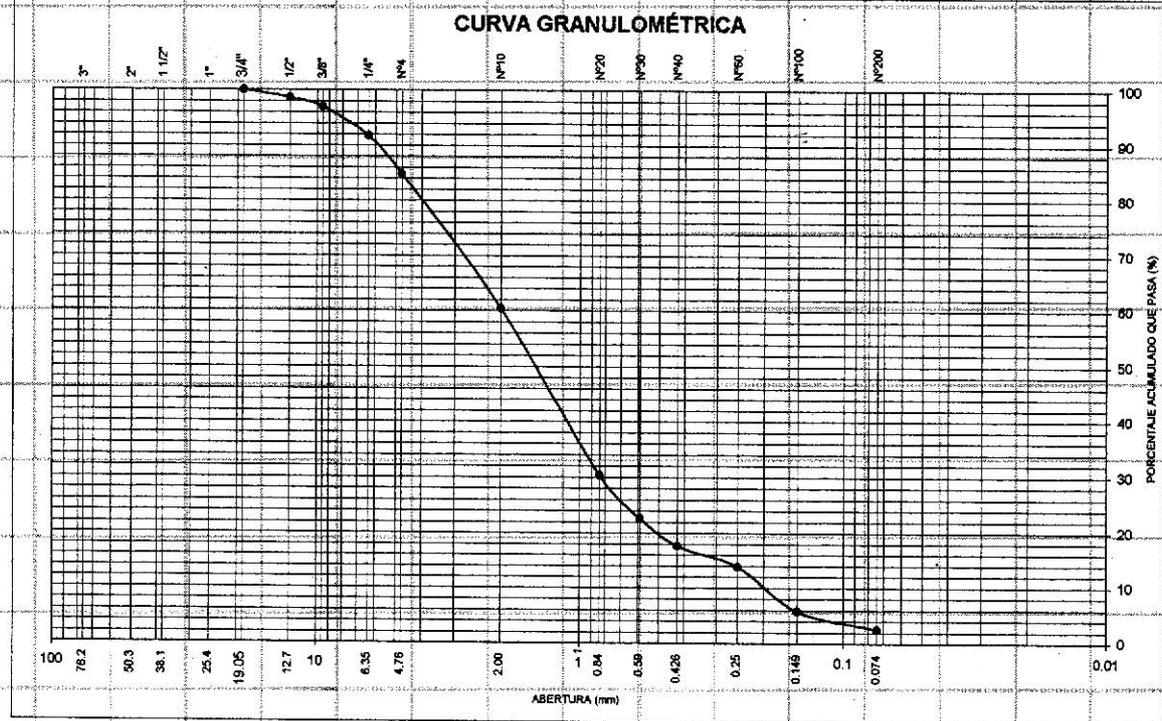
Proyecto : TESIS: "EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI"

Ubicación : Lima

Fecha : 30, Enero del 2004

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

MUESTRA		ARENA
Prof.(m)		****
Tamiz	Abertura (mm)	(%) acumulado que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.700	98.7
3/8"	9.525	97.0
1/4"	6.350	91.7
N°4	4.760	84.8
N°10	2.000	60.4
N°20	0.840	30.4
N°30	0.590	22.6
N°40	0.426	17.7
N°60	0.250	13.8
N°100	0.149	5.8
N°200	0.074	2.5



ANTHONY T. SANCHEZ VILLANUEVA
ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

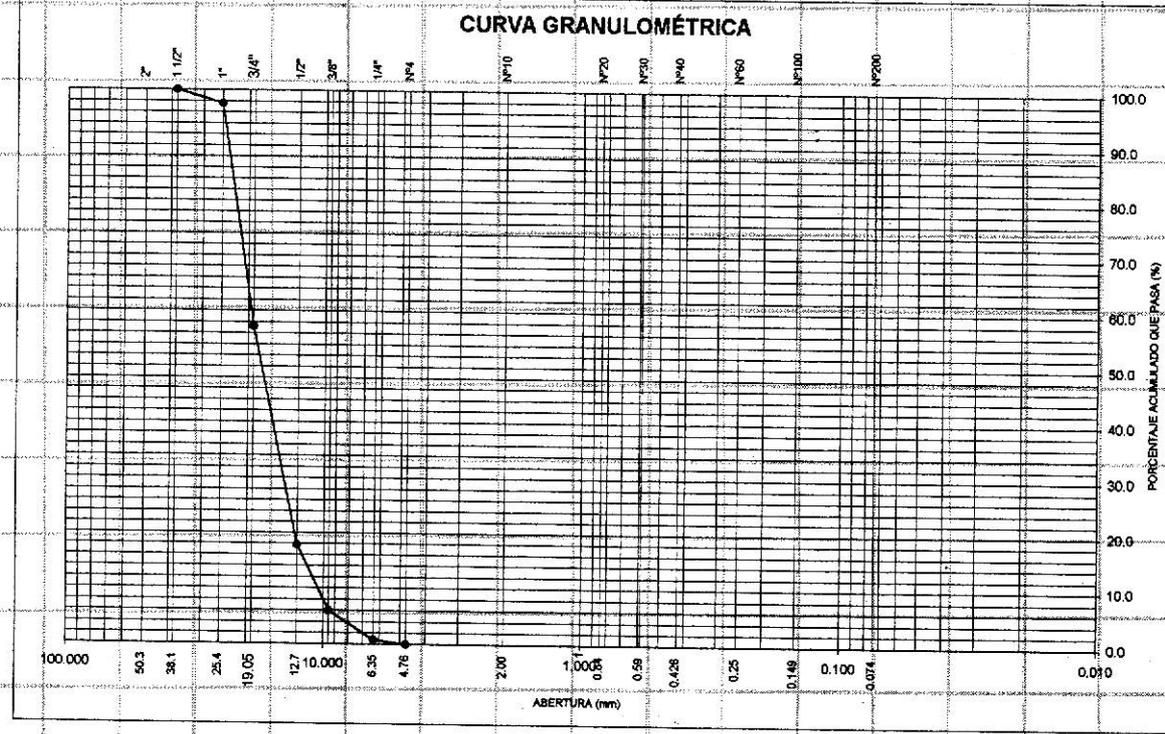
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S04 - 067

Solicitado : ING. ELSA V. MINAYA ESPINOZA
 Proyecto : TESIS: "EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI"
 Ubicación : Lima
 Fecha : 30 Enero del 2004

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

MUESTRA	GRAVA	
Prof. (m)	*****	
Tamiz	Abertura (mm)	(%) acumulado que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	97.5
3/4"	19.050	57.3
1/2"	12.700	17.8
3/8"	9.525	6.1
1/4"	6.350	0.8
N°4	4.760	0.0
N°10	2.000	
N°20	0.840	
N°30	0.590	
N°40	0.426	
N°60	0.250	
N°100	0.149	
N°200	0.074	



ANTIOCO Y QUINONES VILLANUEVA
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

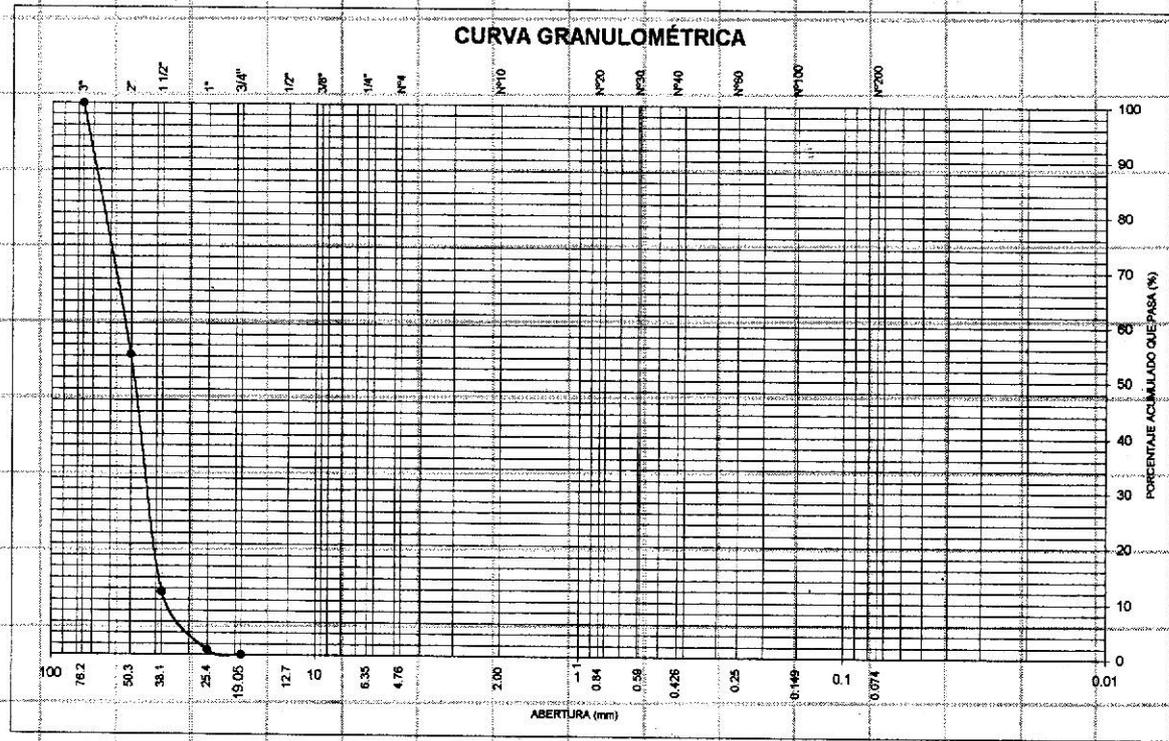
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S04 - 067

Solicitado : ING. ELSA V. MINAYA ESPINOZA
 Proyecto : TESIS: "EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI"
 Ubicación : Lima
 Fecha : 30, Enero del 2004

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D - 422

MUESTRA		BOLEO
Prof.(m)		****
Tamiz	Abertura (mm)	(%) acumulado que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.300	54.3
1 1/2"	38.100	11.4
1"	25.400	0.8
3/4"	19.050	0.0
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	
N°10	2.000	
N°20	0.840	
N°30	0.590	
N°40	0.426	
N°60	0.250	
N°100	0.149	
N°200	0.074	



ANTIOCO T. QUINONES VILLANUEVA
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S03-0151

SOLICITADO : Ing. ELSA MINAYA ESPINOZA
PROYECTO : TESIS DE INVESTIGACIÓN "EROSIÓN EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO SKI "
UBICACION : Área de Modelos - Laboratorio Nacional de Hidráulica - UNI
FECHA : 26 de Enero de 2004

REPORTE DE PRUEBAS DE CAMPO Y LABORATORIO

I. CONTROL DE COMPACTACION

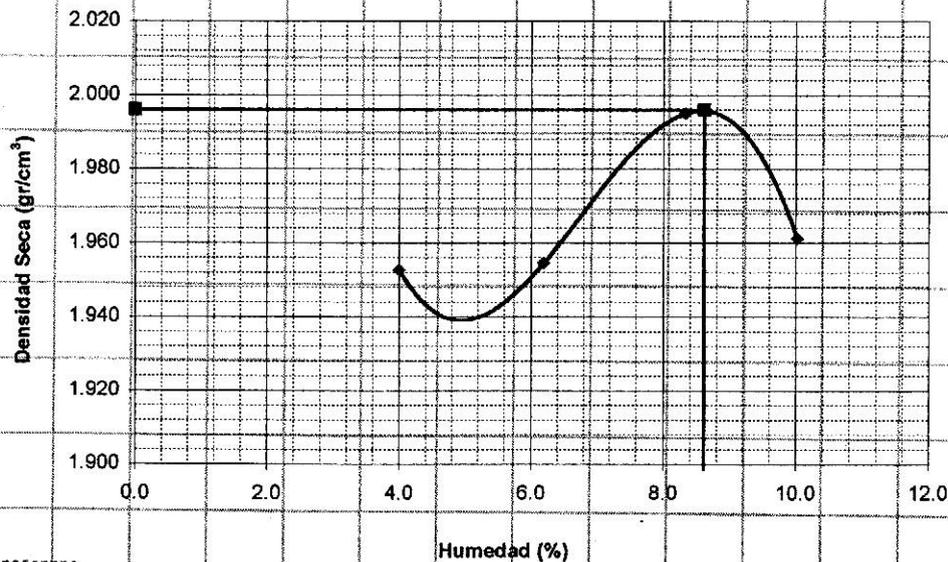
FECHA DE EJECUCION : 30 de Marzo de 2003
CAPA : Lecho No Cohesivo Compactado (*)

Prueba N°	Densidad Seca (gr/cm ³)	Humedad (%)	Grava > N°4 (%)	Compactación (%)
1	1.732	4.3	16	84
2	1.746	4.5	14	85
3	1.802	4.5	13	88

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557 (A) - 91

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.996
Óptimo Contenido de Humedad (%) : 8.6

CURVA DENSIDAD SECA vs HUMEDAD



LUISA E. SHUAN LUCAS
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI

(*) Nota: Ver esquema de ubicación de los puntos de control





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

II. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

MUESTRA : ARENA DE LECHO NO COHESIVO

Malla (%) Acumulado que pasa

3"	
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	100.0
1/2"	99.2
3/8"	98.1
1/4"	95.5
N° 4	91.1
N° 10	70.9
N° 20	40.0
N° 30	29.4
N° 40	23.8
N° 50	18.7
N° 100	4.7
N° 200	1.0

III. PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS ASTM D854

MUESTRA : ARENA DE LECHO NO COHESIVO (< Tamiz N°4)

Peso Específico Relativo de Sólidos : 2.73

Ejecución : Téc. Jorge Chavez U.
Revisión : Ing. L. Shuan L.

LUISA E. SHUAN LUCAS
ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



JOSE WILFREDO GUTIERREZ LAZARDO
ING. JEFE DEL LAB. No. 2
Mecánica de Suelos - UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

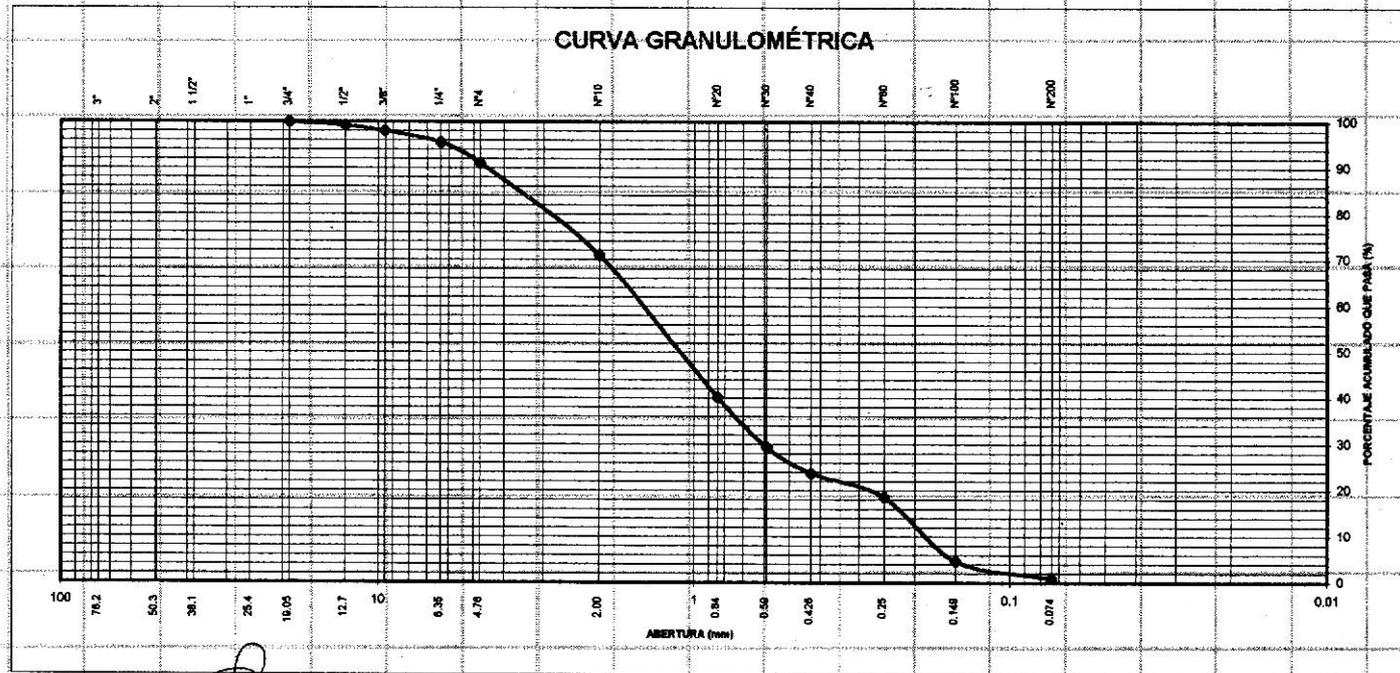
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S03-0151

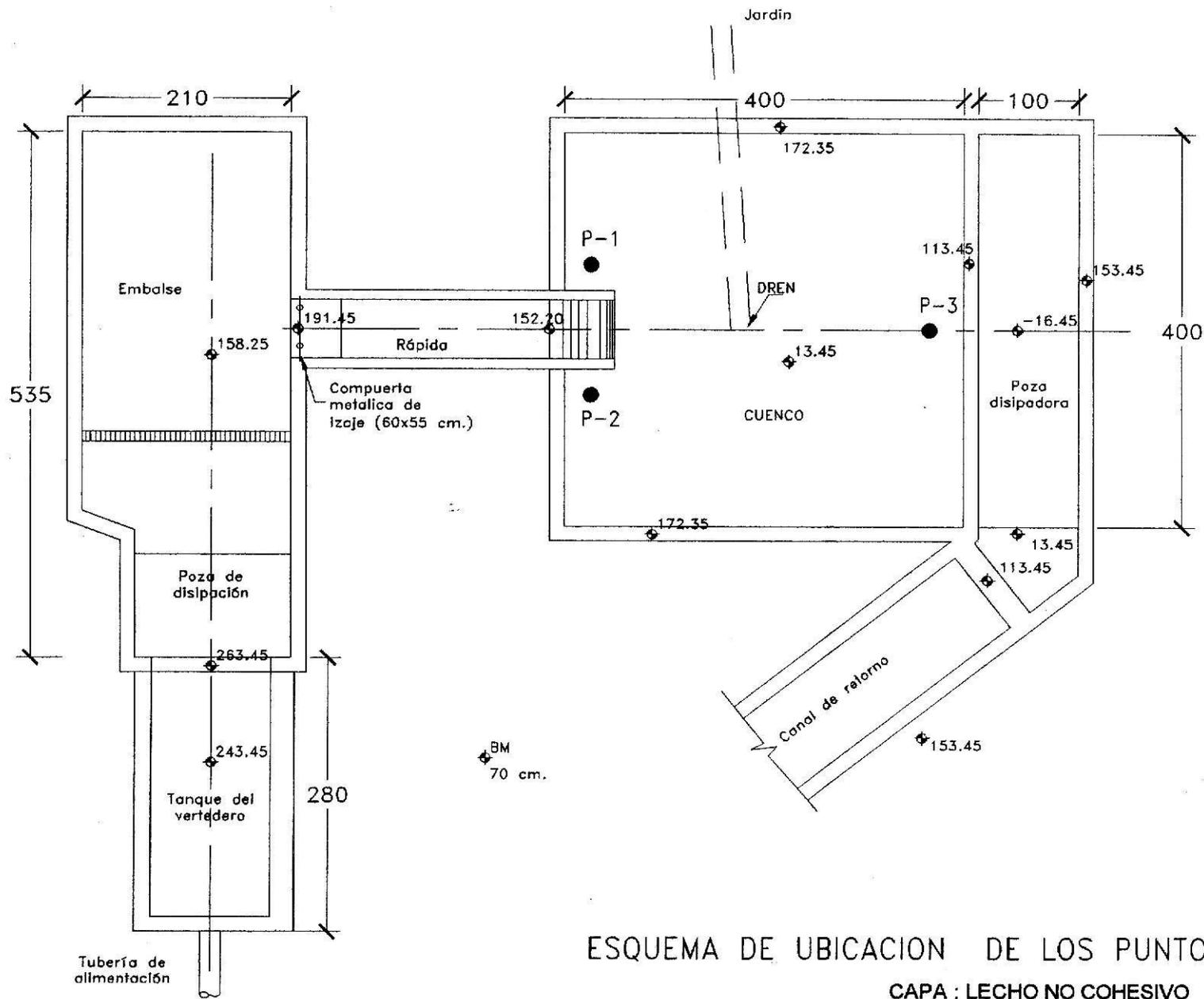
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422

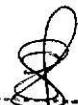
Solicitado : Ing. ELSA MINAYA ESPINOZA
 Proyecto : TESIS DE INVESTIGACIÓN "EROSIÓN EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO SKI"
 Ubicación : Área de Modelos - Laboratorio Nacional de Hidráulica - UNI
 Fecha : 26 de Enero de 2004

Muestra		Arena de lecho no cohesivo
Tamiz	Abertura (mm)	(%) acumulado que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.700	99.2
3/8"	9.525	98.1
1/4"	6.350	95.5
N°4	4.760	91.1
N°10	2.000	70.9
N°20	0.840	40.0
N°30	0.590	29.4
N°40	0.426	23.8
N°50	0.250	18.7
N°100	0.149	4.7
N°200	0.074	1.0




LUISA E. SHUAN LUCAS
 RESPONSABLE DE AREA
 Laboratorio de Mecánica de Suelos UNI




LUISA E. SHUANILUCAS
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI

ESQUEMA DE UBICACION DE LOS PUNTOS DE CONTROL
CAPA : LECHO NO COHESIVO

Leyenda :

● P-1 Punto de Control

Cuadro F.1. Análisis Granulométrico del material de acorazamiento

FASE I														
Malla	Malla mm	PRUEBA N° 4	Malla	Malla mm	PRUEBA N°					Malla	Malla mm	PRUEBA N°		
					5	6	7	9	11			10	12	
		% Pasa			% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa			% Pasa		
1 1/2"	38.100	100.00	1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	1 1/2"	38.1	100.00	100.00
1"	25.400	96.29	1"	25.400	94.53	96.66	95.62	94.39	97.18	97.18	3/4"	19.05	83.58	88.21
3/4"	19.050	90.24	3/4"	19.050	76.07	87.32	71.25	74.32	79.09	79.09	1/2"	12.7	47.47	48.39
1/2"	12.700	62.98	1/2"	12.700	59.35	57.02	35.52	48.62	43.56	43.56	3/8"	9.525	40.13	41.64
3/8"	9.525	42.18	3/8"	9.525	45.49	44.58	29.28	42.77	32.60	32.60	1/4"	6.35	31.51	33.76
1/4"	6.350	31.84	1/4"	6.350	35.43	33.45	23.42	38.18	23.57	23.57	4	4.76	25.95	29.58
4	4.760	27.72	4	4.760	30.31	28.68	19.80	35.00	18.80	18.80	8	2.38	11.69	19.45
10	2.000	15.99	8	2.380	21.70	20.65	10.80	25.16	10.35	10.35	16	1.19	2.77	9.93
20	0.850	4.39	16	1.190	14.08	11.10	4.91	11.47	2.95	2.95	40	0.42	0.39	2.14
30	0.590	2.26	40	0.420	9.22	2.01	1.34	1.22	0.15	0.15	60	0.25	0.31	1.30
40	0.420	0.30	60	0.250	6.68	0.86	0.98	0.63	0.11	0.11	100	0.149	0.17	0.48
60	0.250	0.11	100	0.149	4.28	0.27	0.40	0.25	0.08	0.08	200	0.074	0.07	0.11
100	0.149	0.02	200	0.074	2.10	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06				
D50 (mm)		11.5			10.2	10.5	15.0	13.0	13.4	13.4			13.0	13.0
D90 (mm)		19.0			21.5	20.0	22.0	23.0	21.5	21.5			22.0	20.0

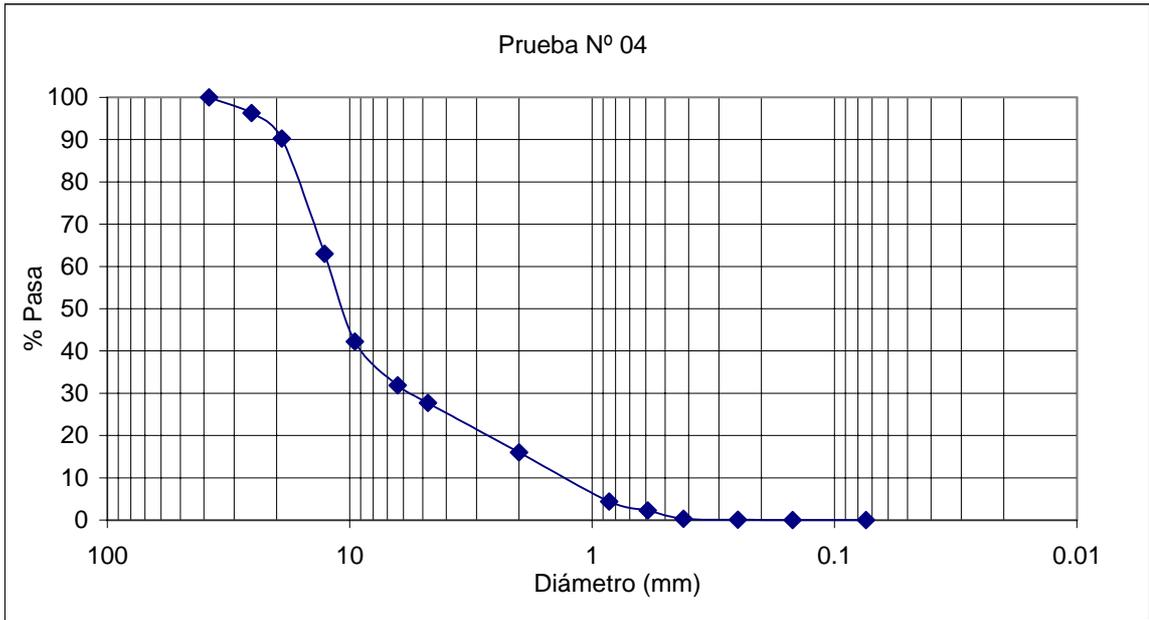


Fig. F.1. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+120

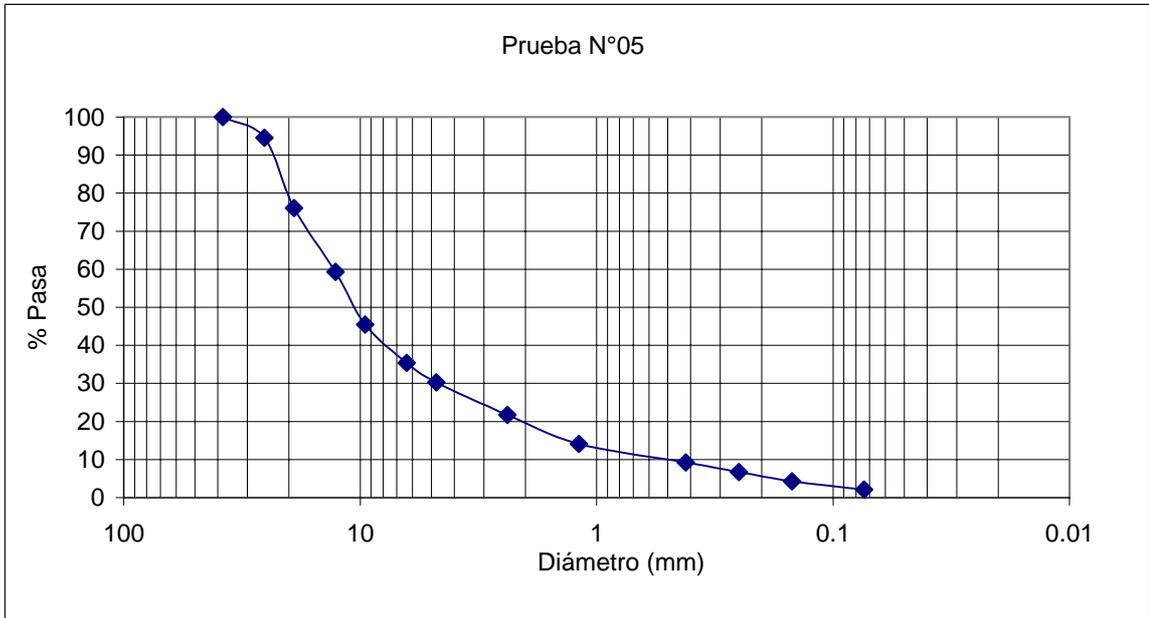


Fig. F.2. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversales 0+120 - 0+150

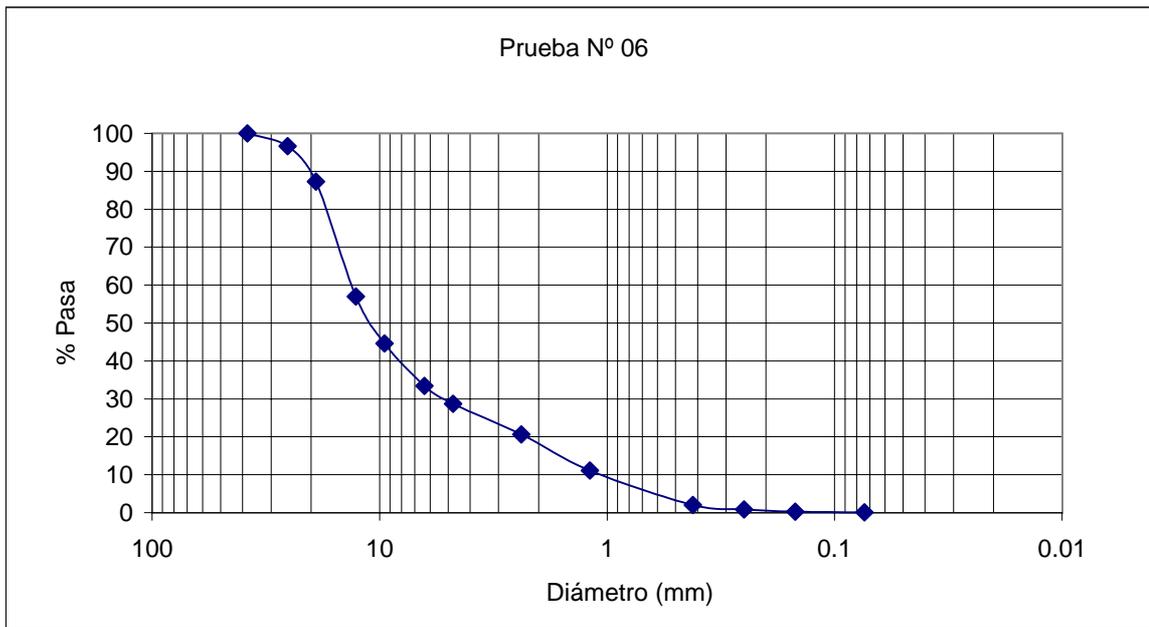


Fig. F.3. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversales 0+120 - 0+150

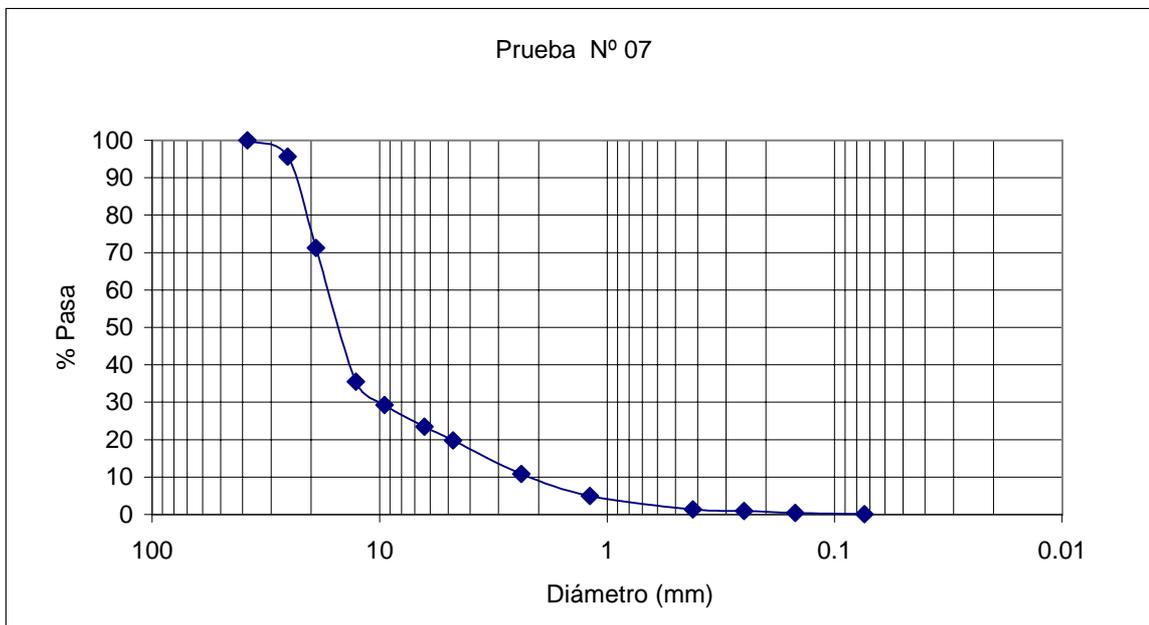


Fig. F.4. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversales 0+165

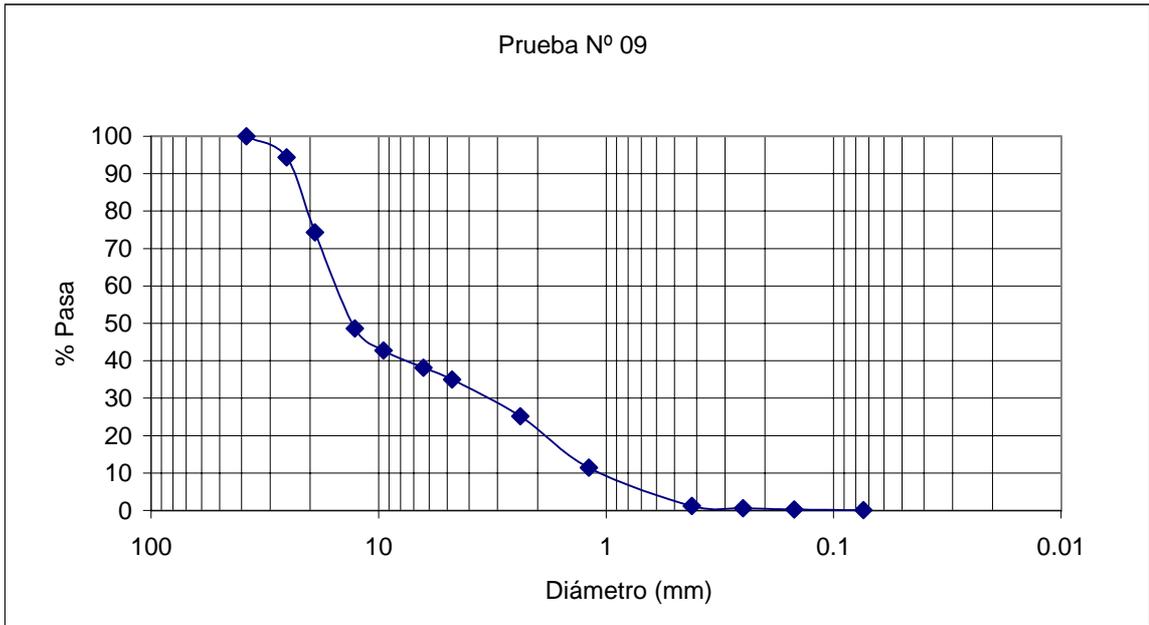


Fig. F.5. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

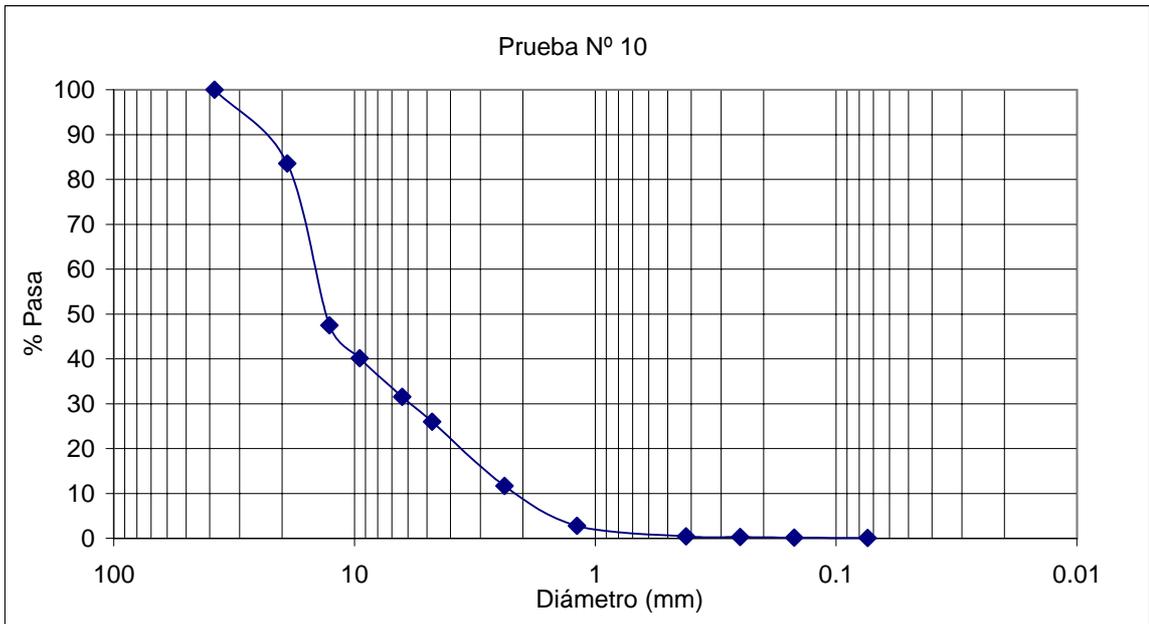


Fig. F.6 . Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

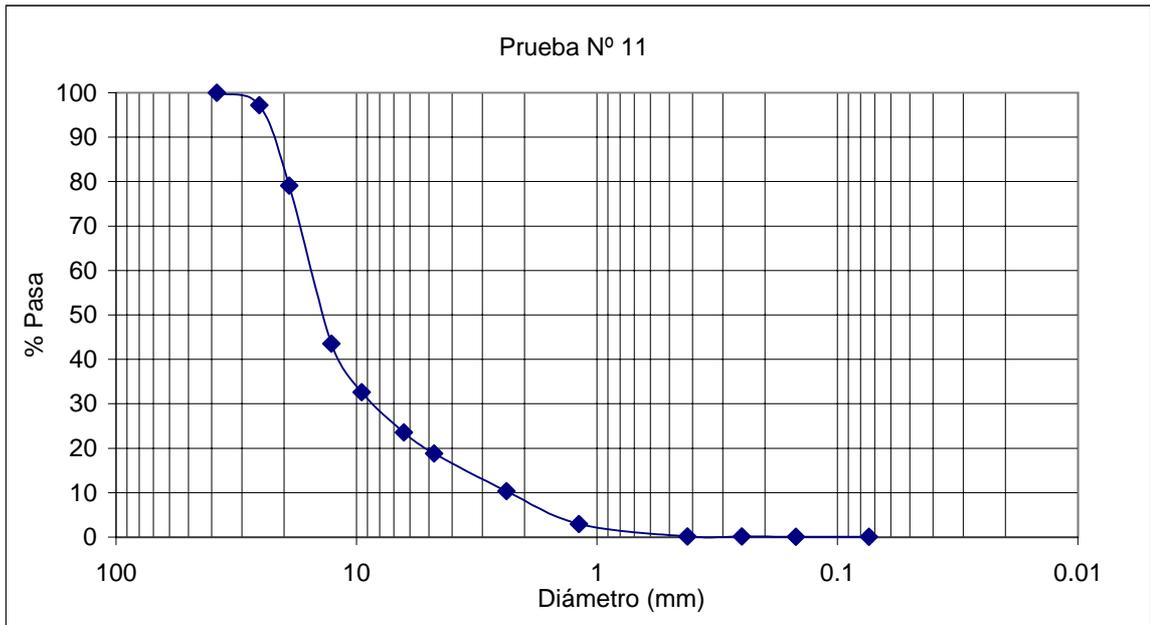


Fig. F.7. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

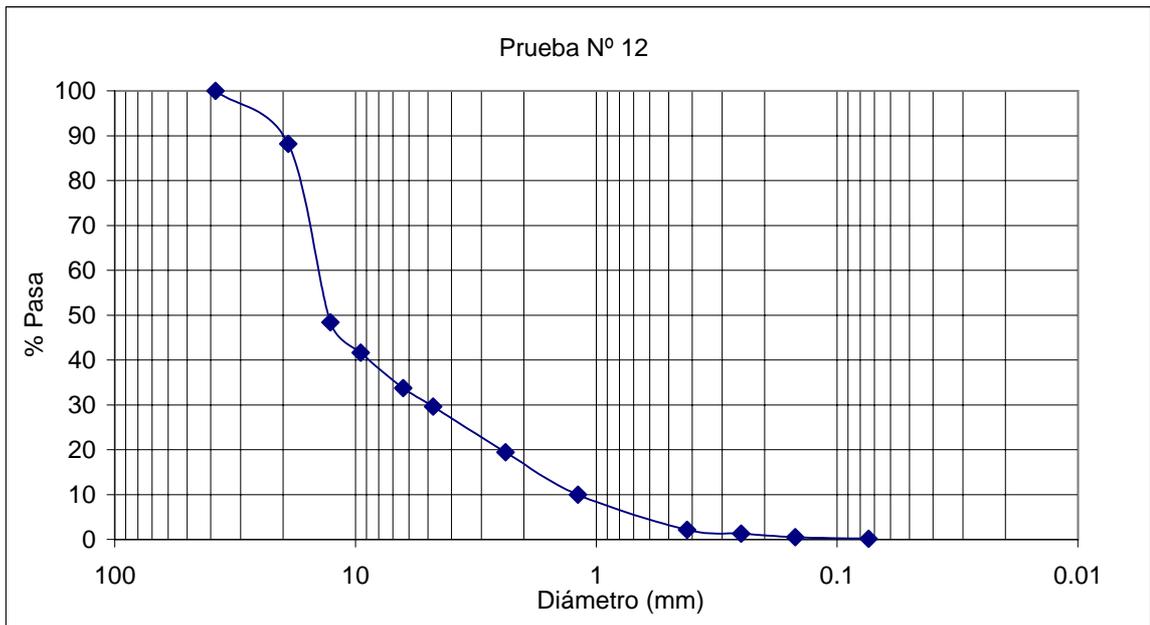


Fig. F.8. Fase I. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

Cuadro F.2. Análisis Granulométrico del material de acorazamiento

		FASE II										FASE III		
Malla	Malla mm	PRUEBA N°			Malla	Malla mm	PRUEBA N°					Malla	Malla mm	PRUEBA N° 12
		1	9	10			2	5	6	8	11			
		% Pasa	% Pasa	% Pasa			% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa			
1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	1 1/2"	38.100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	3"	76.200	100.00
1"	25.400	98.13	95.49	90.28	1"	25.400	94.85	95.44	93.93	93.01	92.48	2"	50.300	95.73
3/4"	19.050	43.30	37.54	32.10	3/4"	19.050	26.22	41.11	31.09	39.93	32.71	1 1/2"	38.100	89.73
1/2"	12.700	10.35	8.75	6.21	1/2"	12.700	0.84	10.03	4.98	5.66	3.82	1"	25.400	87.76
3/8"	9.525	3.31	3.86	1.57	3/8"	9.525	0.26	4.06	1.18	1.60	0.43	3/4"	19.050	46.15
1/4"	6.350	0.36	0.20	0.02	1/4"	6.350	0.06	0.33	0.05	0.03	0.04	1/2"	12.700	0.03
4	4.760	0.24	0.00	0.01	200	0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	200	0.074	0.00
200	0.074	0.00	0.00	0.00										
D50 (mm)		20.0	20.1	20.2			20.8	20.2	20.2	20.0	20.2			20.0
D90 (mm)		23.0	23.0	25.0			23.0	23.0	23.0	23.5	24.0			40.0

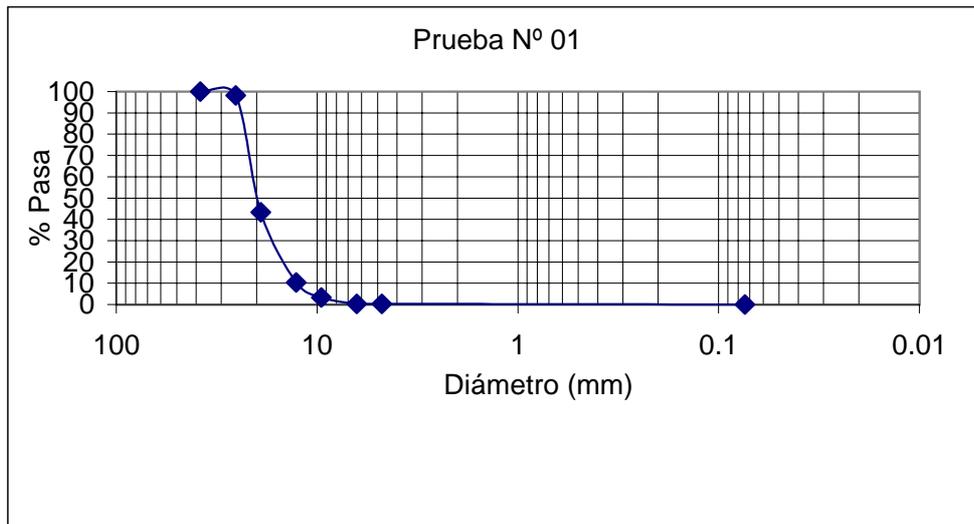


Fig. F.9. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+150

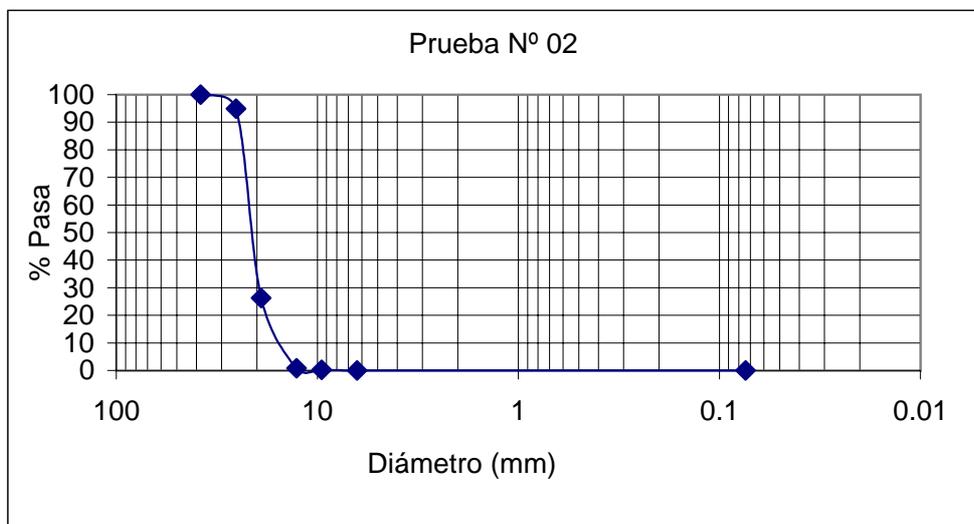


Fig. F.10. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+150

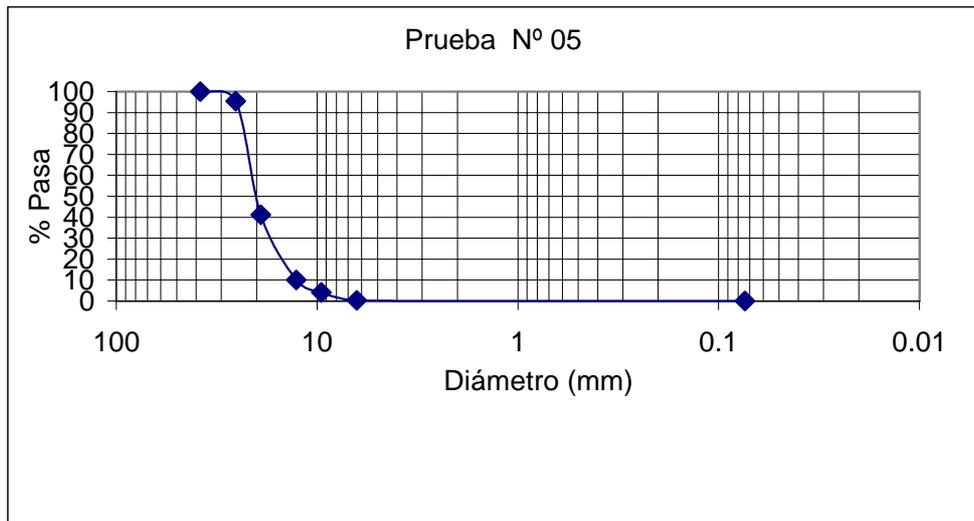


Fig. F.11. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

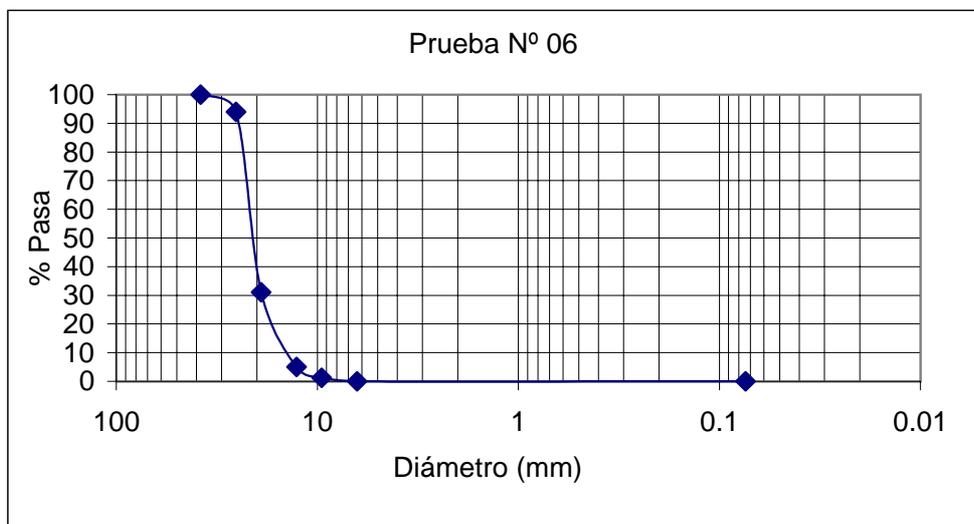


Fig. F.12. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

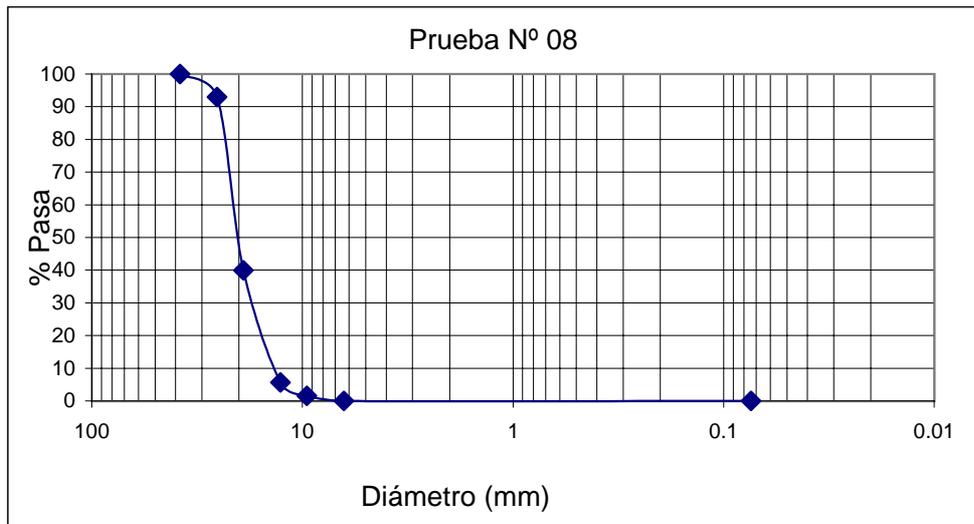


Fig. F.13. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

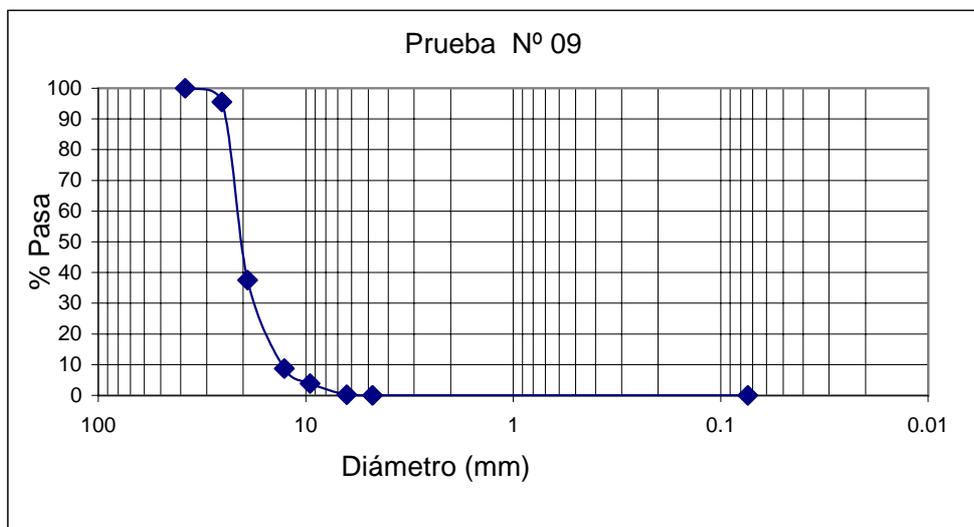


Fig. F.14. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

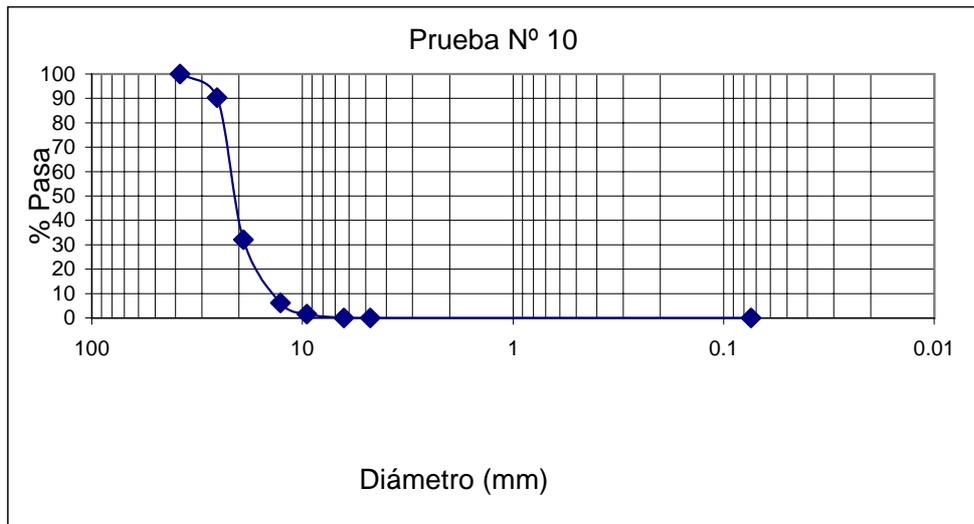


Fig. F.15. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

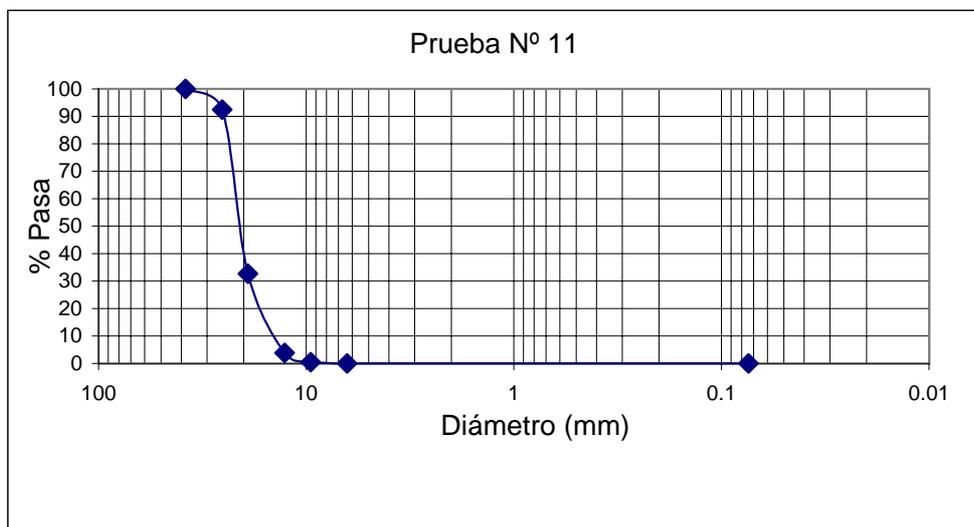


Fig. F.16. Fase II. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

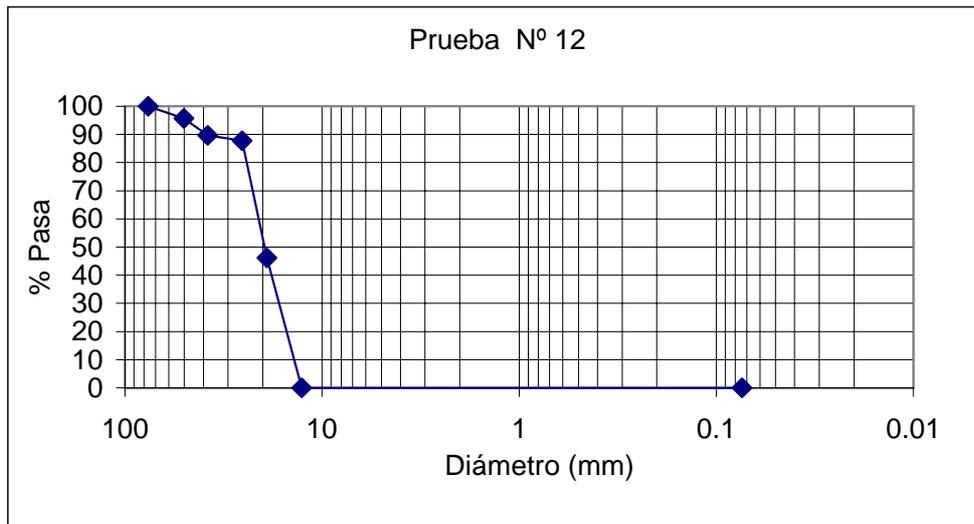


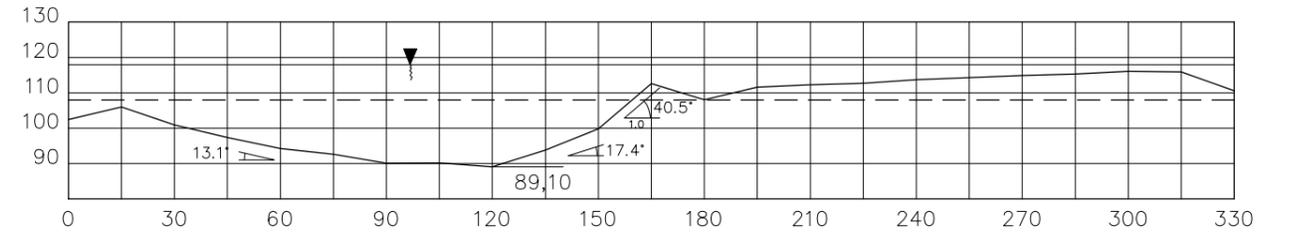
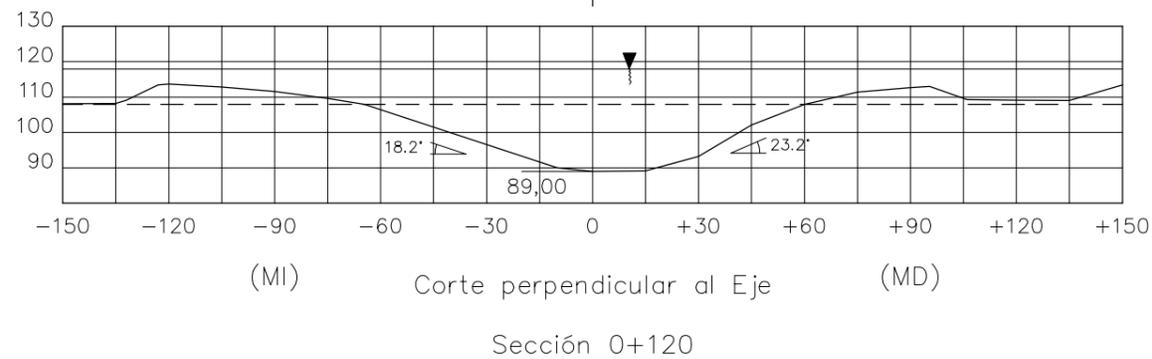
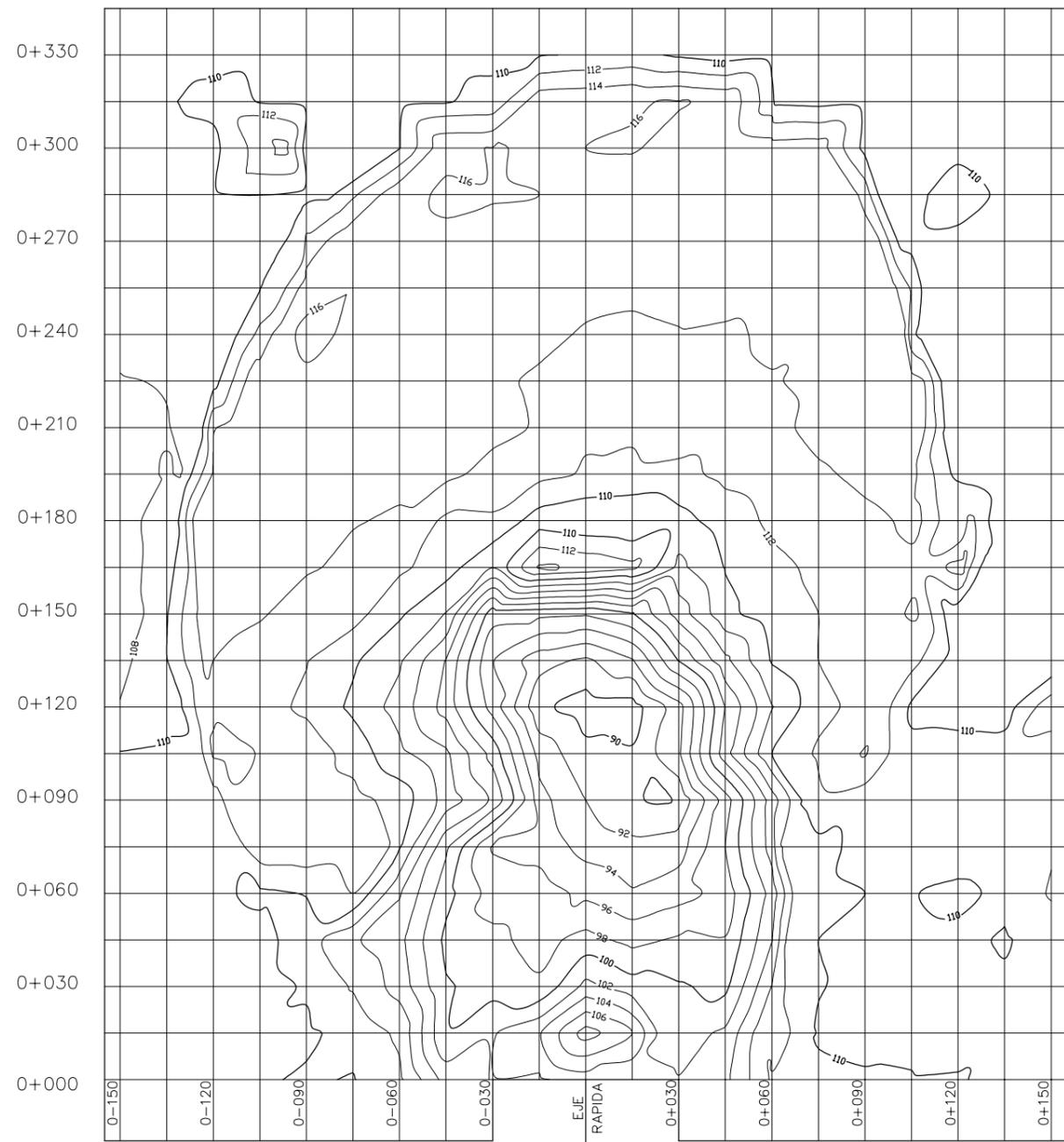
Fig. F.17. Fase III. Material de acorazamiento. Muestra en el eje y sección transversal 0+180

ANEXO G

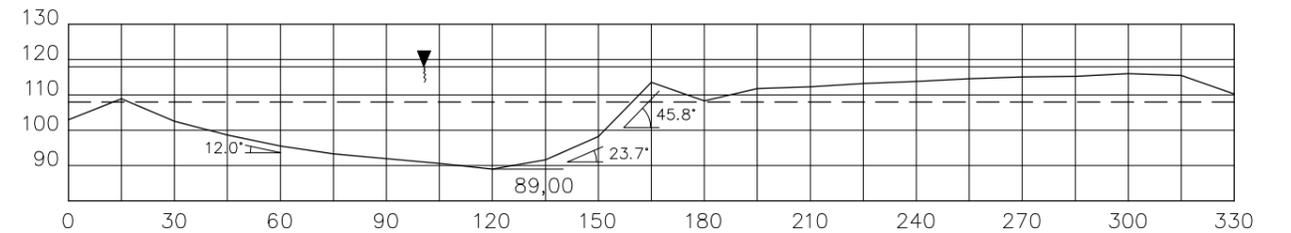
Resultados del Proceso de Erosión
Geometría de la poza de erosión

Cuadro G.1. Altura de la profundidad de erosión al termino de cada prueba

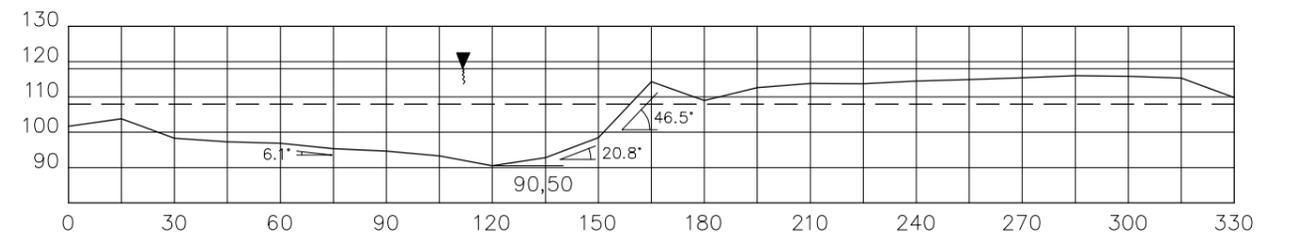
Fase	N° Prueba	Q (m3/s)	h _{CA} (m)	hs (m)
I	4	0.02	0.05	0.1834
	1	0.02	0.10	0.1894
	2	0.02	0.25	0.1154
	3	0.02	0.50	0.00
	5	0.04	0.05	0.3094
	6	0.04	0.10	0.3005
	7	0.04	0.25	0.2449
	8	0.04	0.50	0.00
	9	0.06	0.05	0.3894
	10	0.06	0.10	0.4104
	11	0.06	0.25	0.3489
	12	0.06	0.50	0.0764
II	1	0.02	0.05	0.1551
	2	0.02	0.10	0.1504
	3	0.02	0.25	0.00
	4	0.02	0.50	0.00
	5	0.04	0.05	0.2733
	6	0.04	0.10	0.2513
	8	0.04	0.25	0.1621
	7	0.04	0.50	0.00
	9	0.06	0.05	0.3469
	10	0.06	0.10	0.3524
	11	0.06	0.25	0.3004
	12	0.06	0.50	0.00
III	1	0.02	0.05	0.0604
	2	0.02	0.10	0.0579
	3	0.02	0.25	0.00
	4	0.02	0.50	0.00
	6	0.04	0.05	0.1374
	7	0.04	0.10	0.1268
	8	0.04	0.25	0.0623
	5	0.04	0.50	0.00
	9	0.06	0.05	0.1664
	12	0.06	0.10	0.1709
	11	0.06	0.25	0.1275
	10	0.06	0.50	0.00



Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

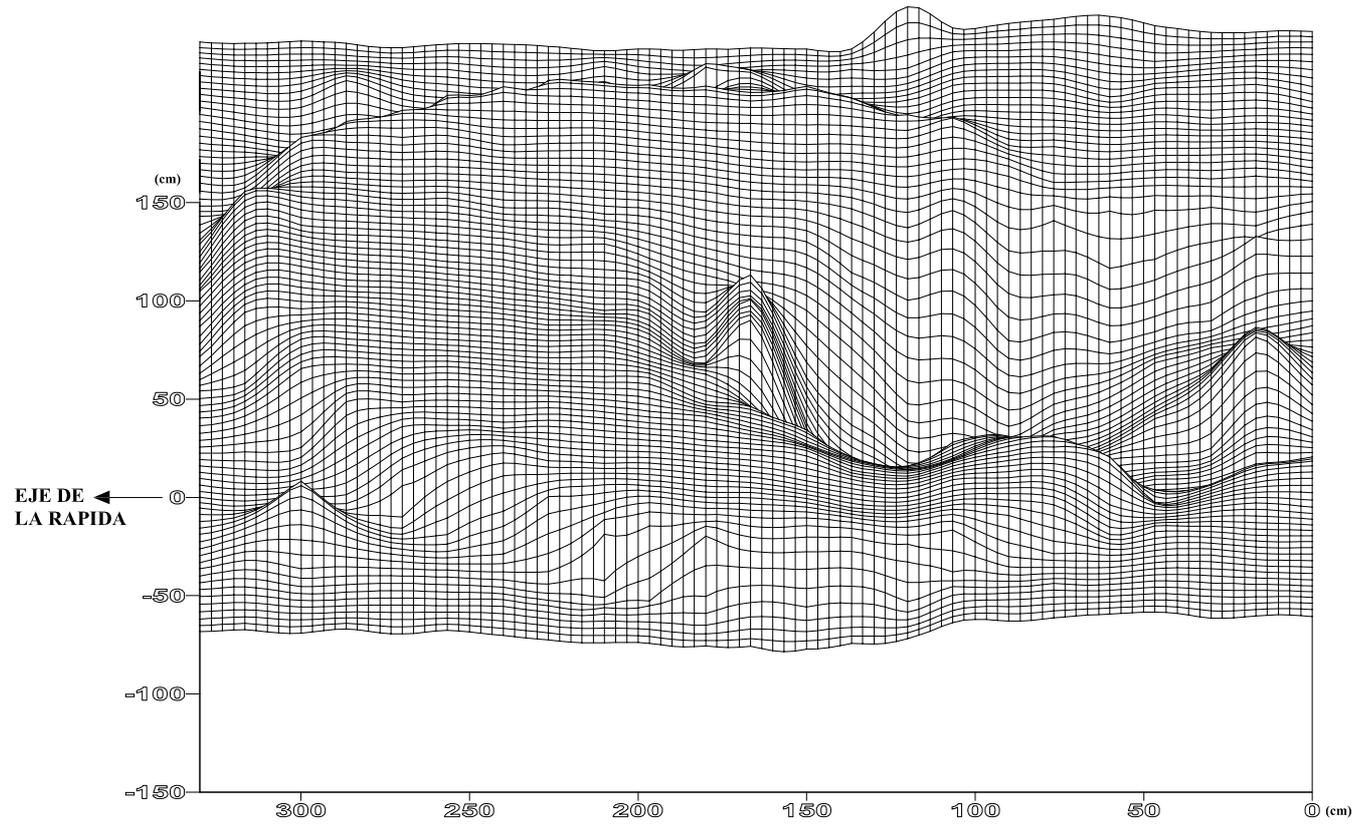
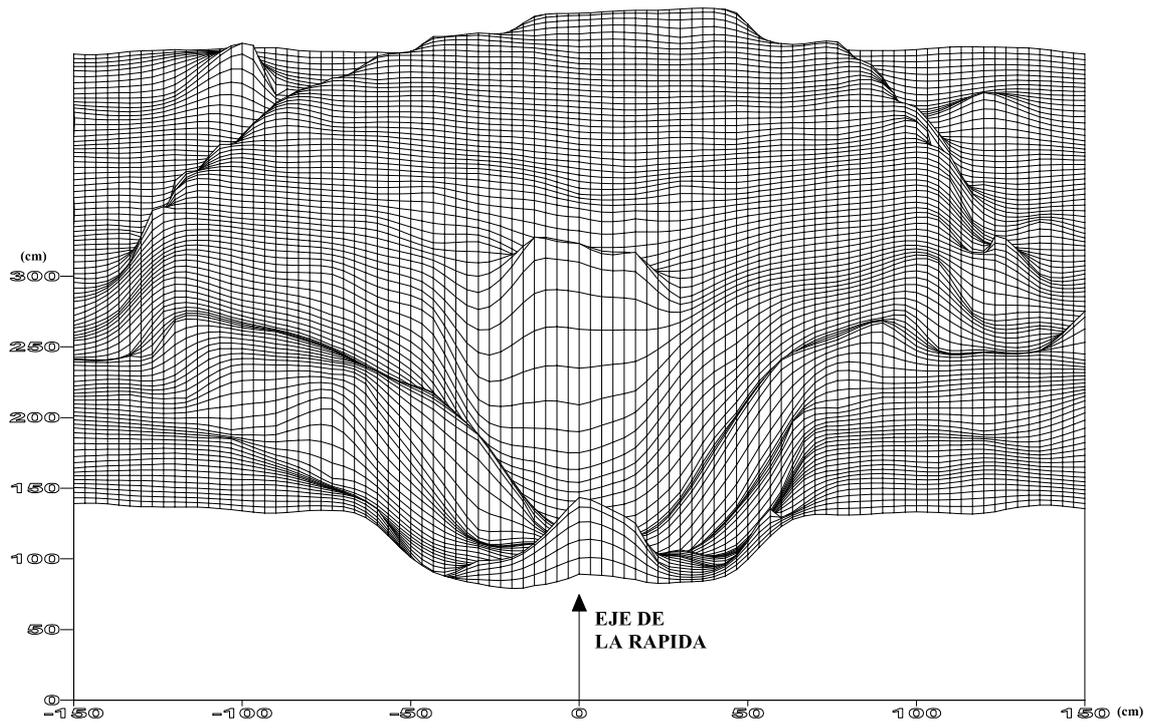
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

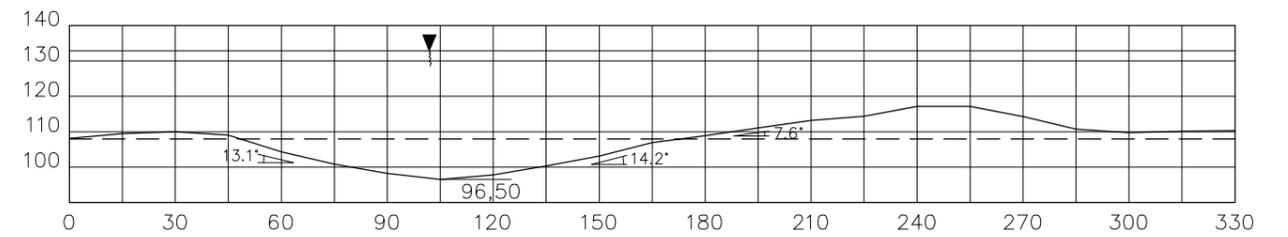
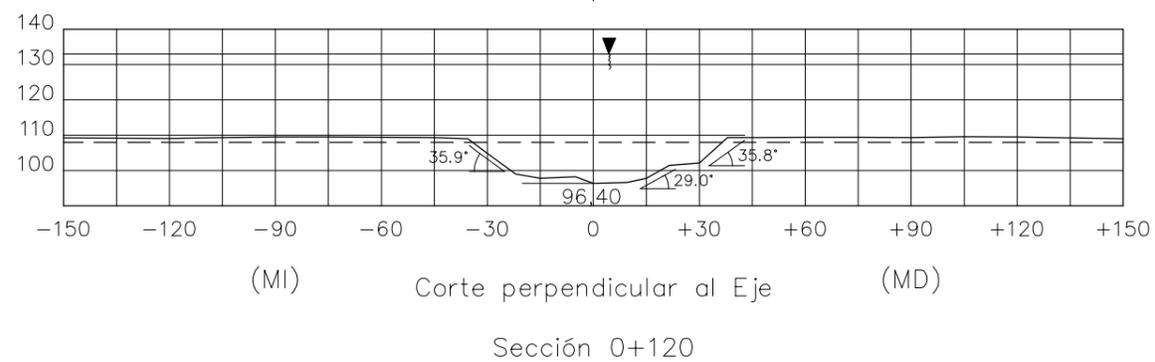
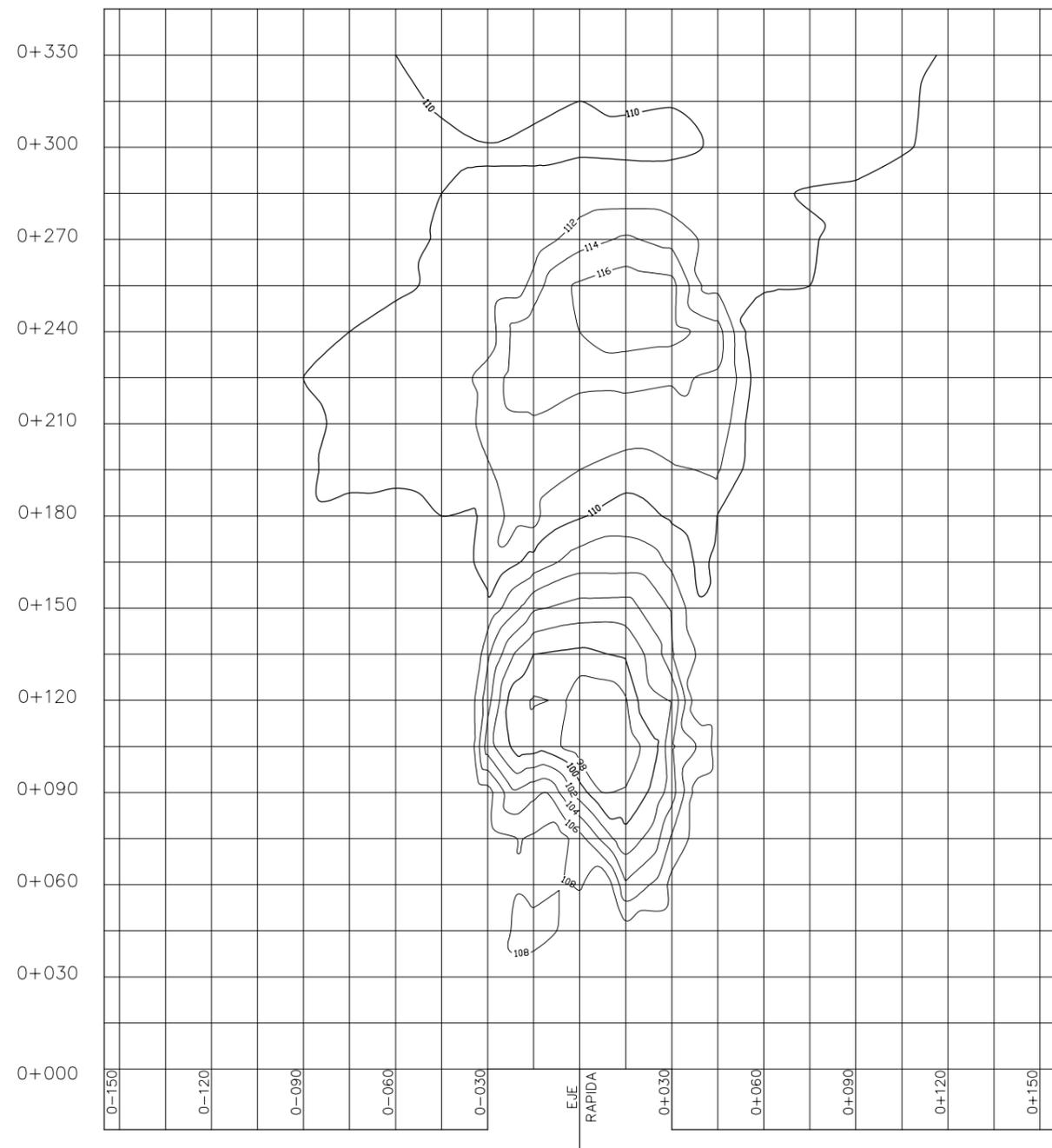
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 1
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$ $d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	31-03-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-01-A



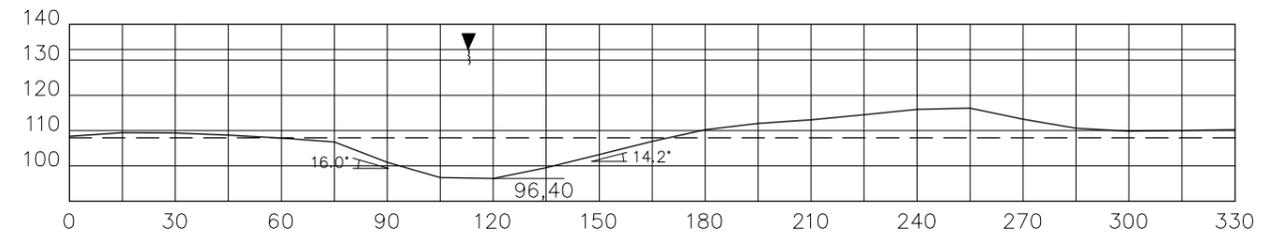
NOTA

Profundidad de erosión (hs) = 0.189 m

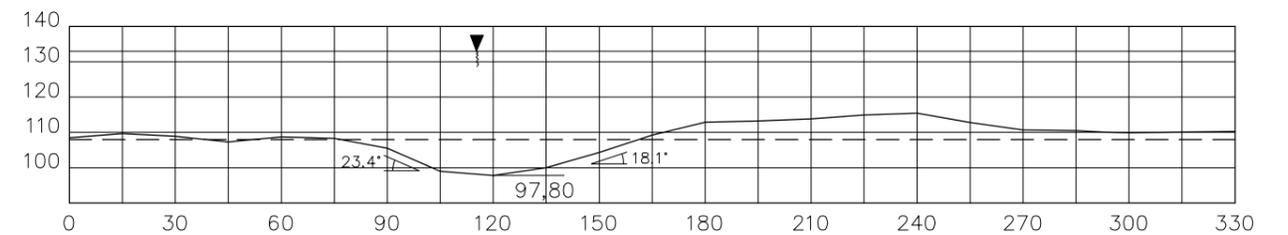
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 1	
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.02 m ³ /s	d ₅₀ = 1.60 mm
DibujóCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.10 m	d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	31-03-03	Escala:	INDICADA
		Lámina N°	G-01-B



Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

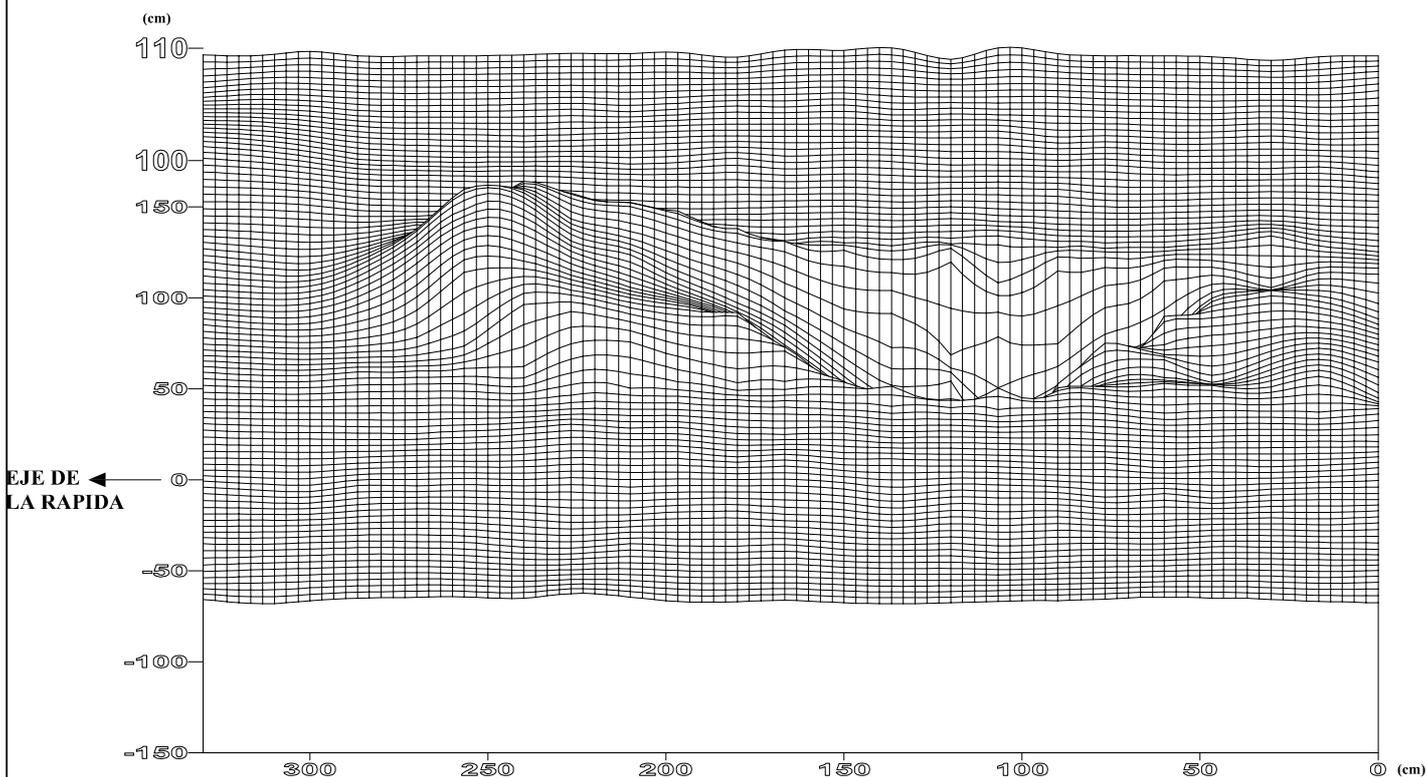
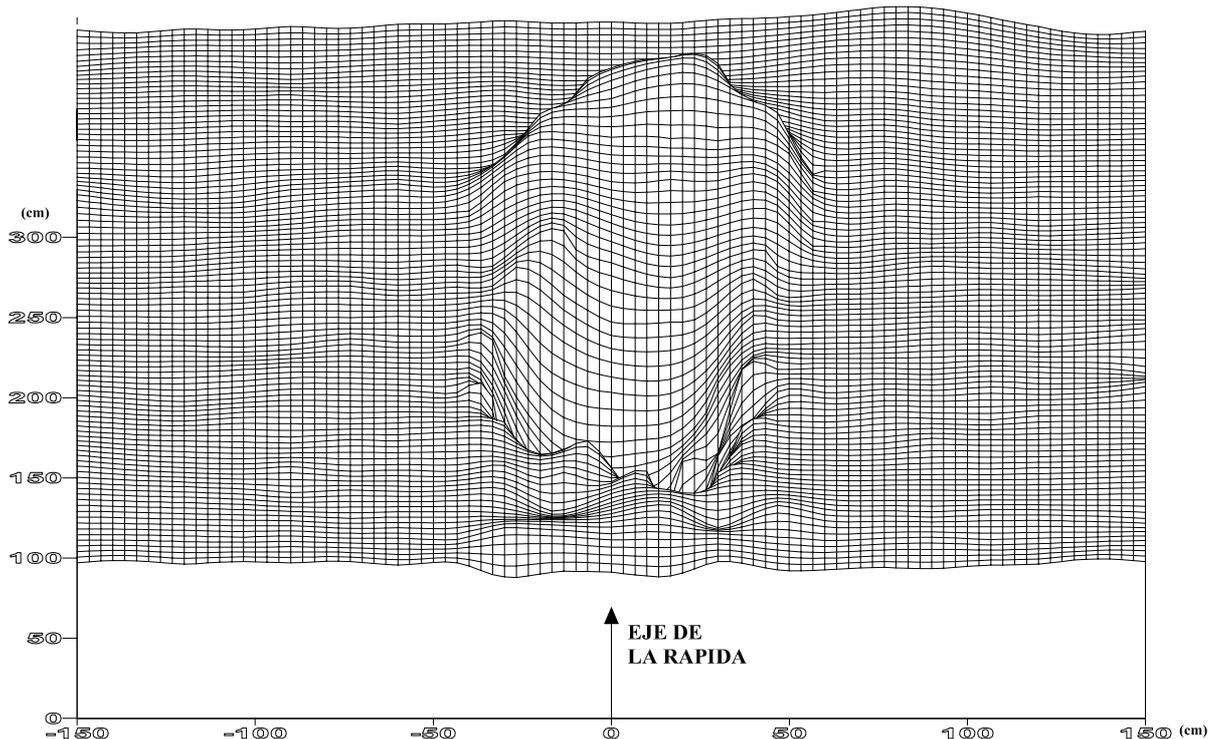


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

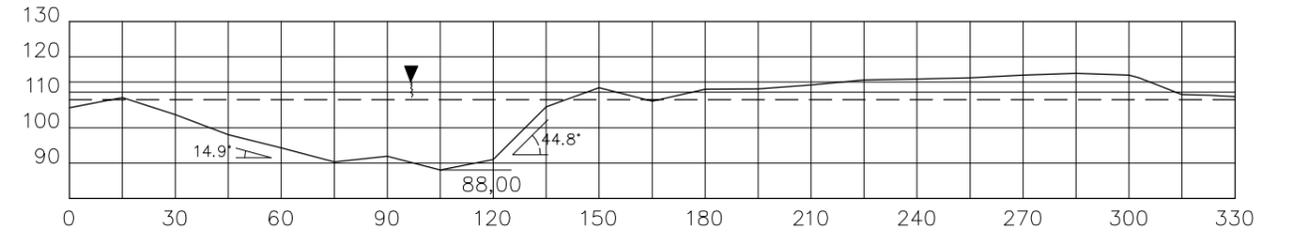
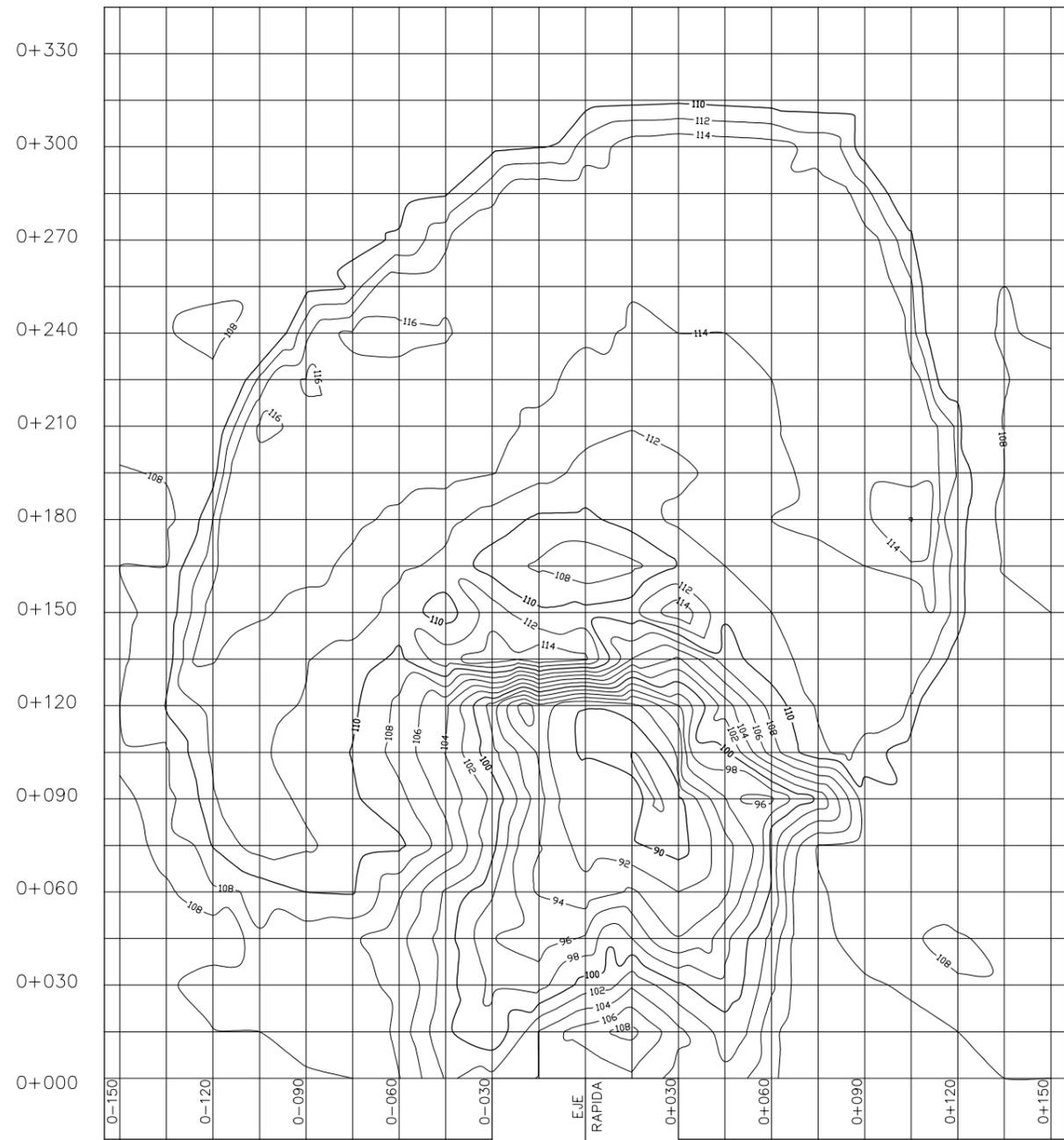
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 2	
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.02 m ³ /s	d ₅₀ = 1.60 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.25 m	d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	02-04-03	Escala:	1:20
			Lámina N° G-02-A



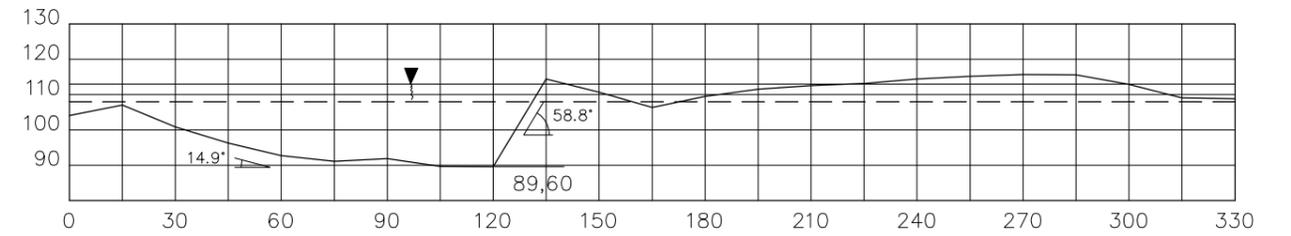
NOTA

Profundidad de erosión (hs) = 0.115 m

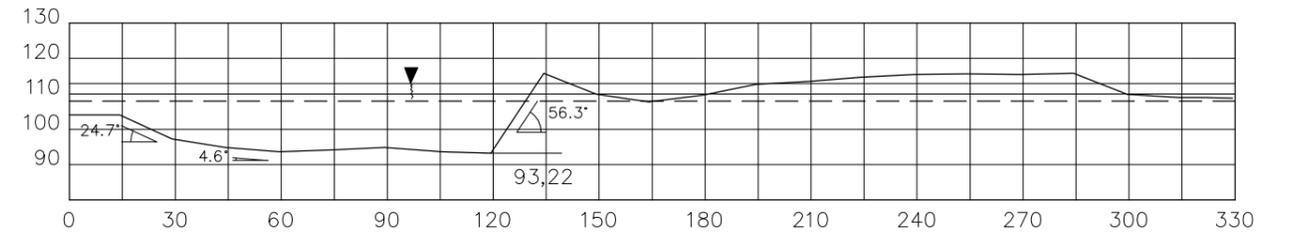
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 2	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujóCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.25 \text{ m}$	$d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	02-04-03	Escala:	INDICADA
		Lámina N°	G-02-B



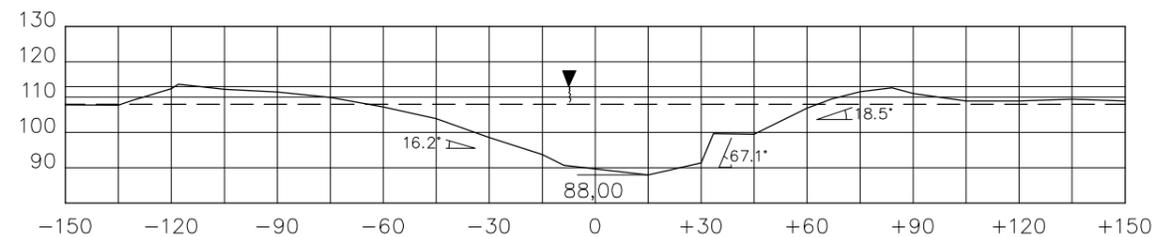
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



(MI) Corte perpendicular al Eje (MD)
Sección 0+105

Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

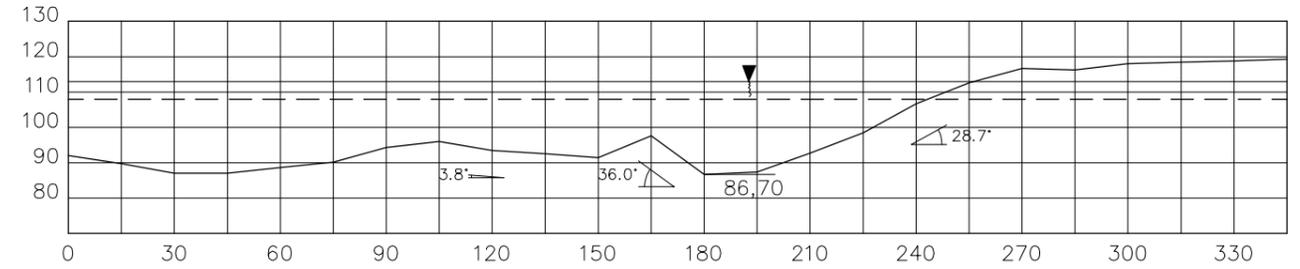
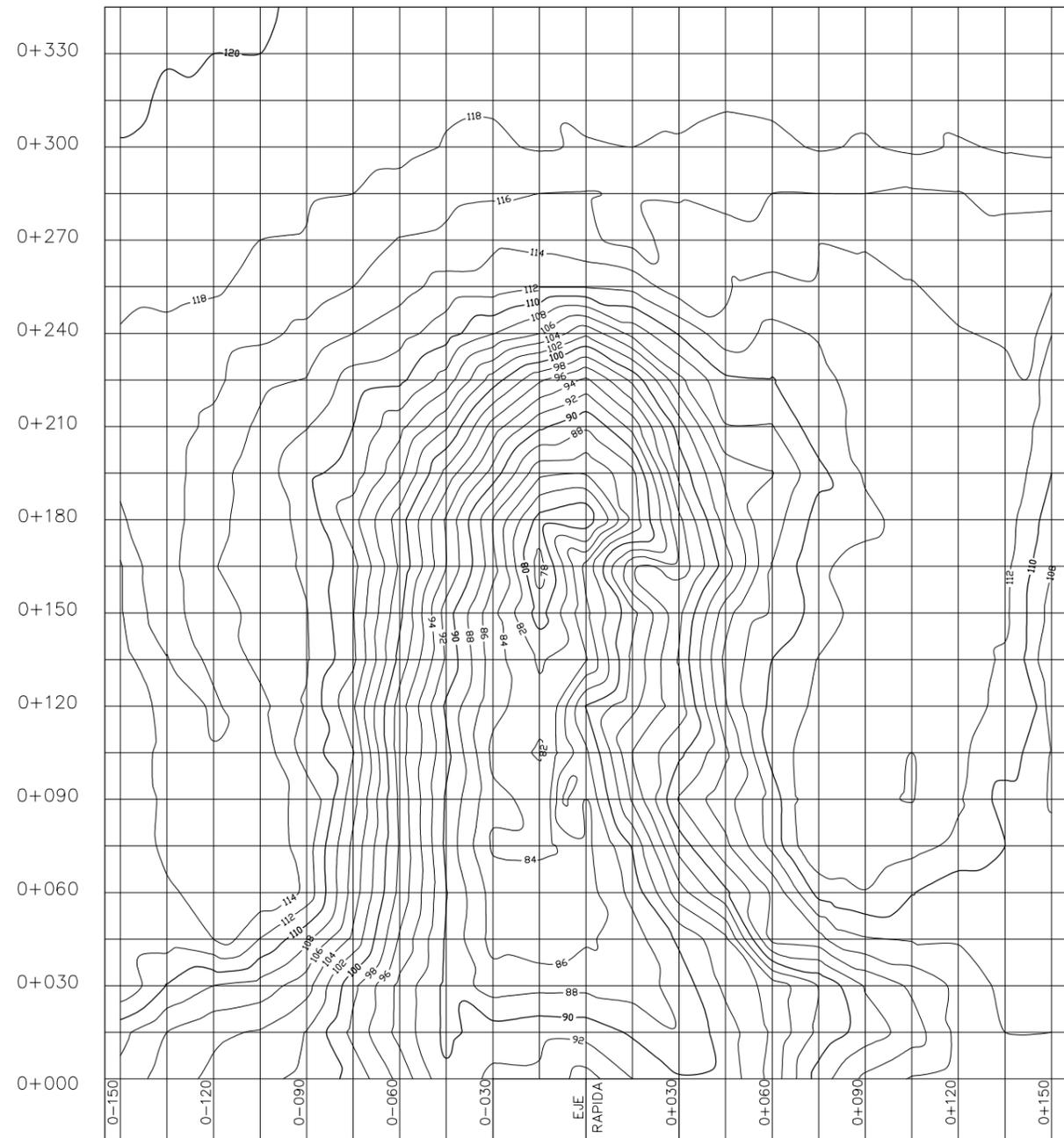


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

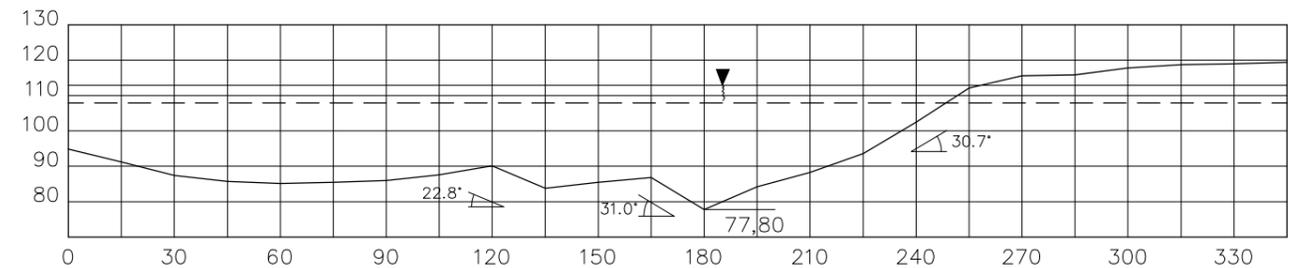
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

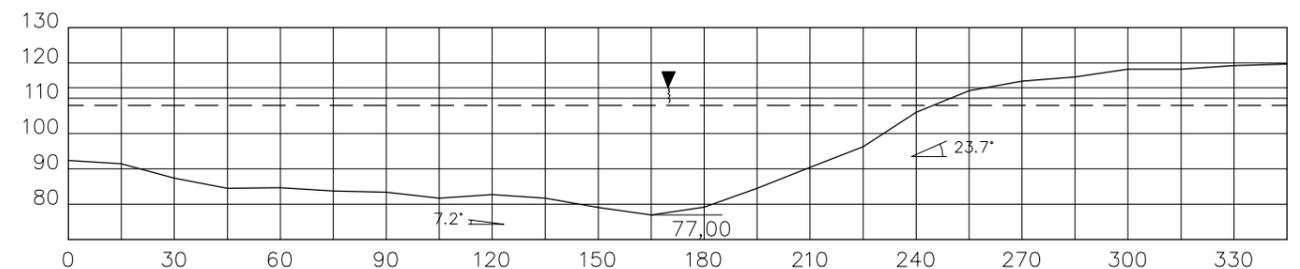
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 4	
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.02 m ³ /s	d ₅₀ = 1.60 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.05 m	d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	04-04-03	Escala:	1:20
			Lámina N° G-03



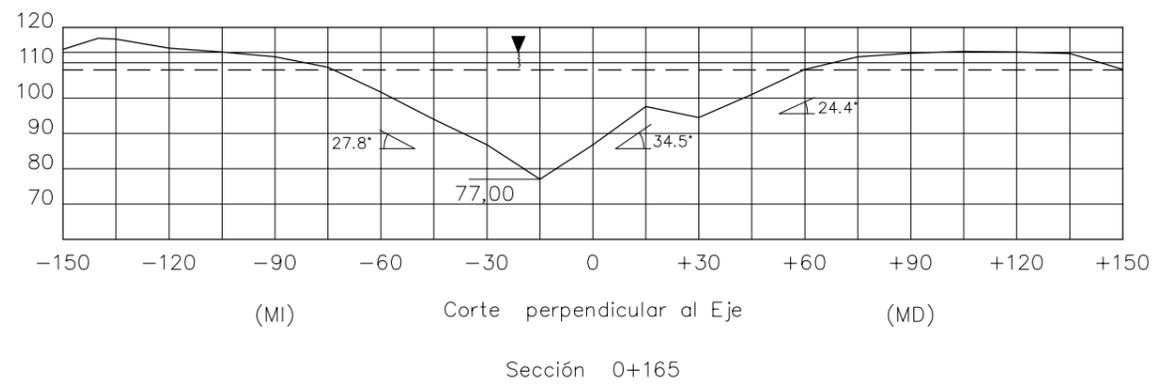
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



Sección 0+165

Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

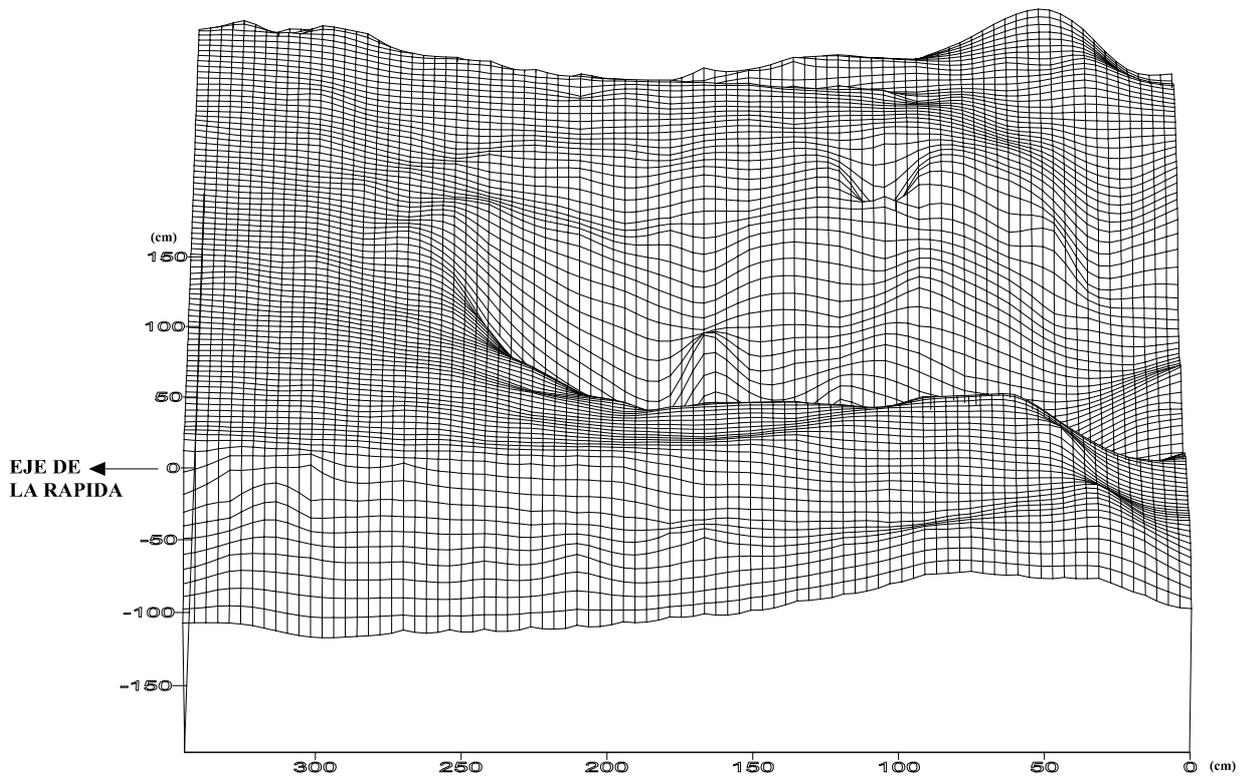
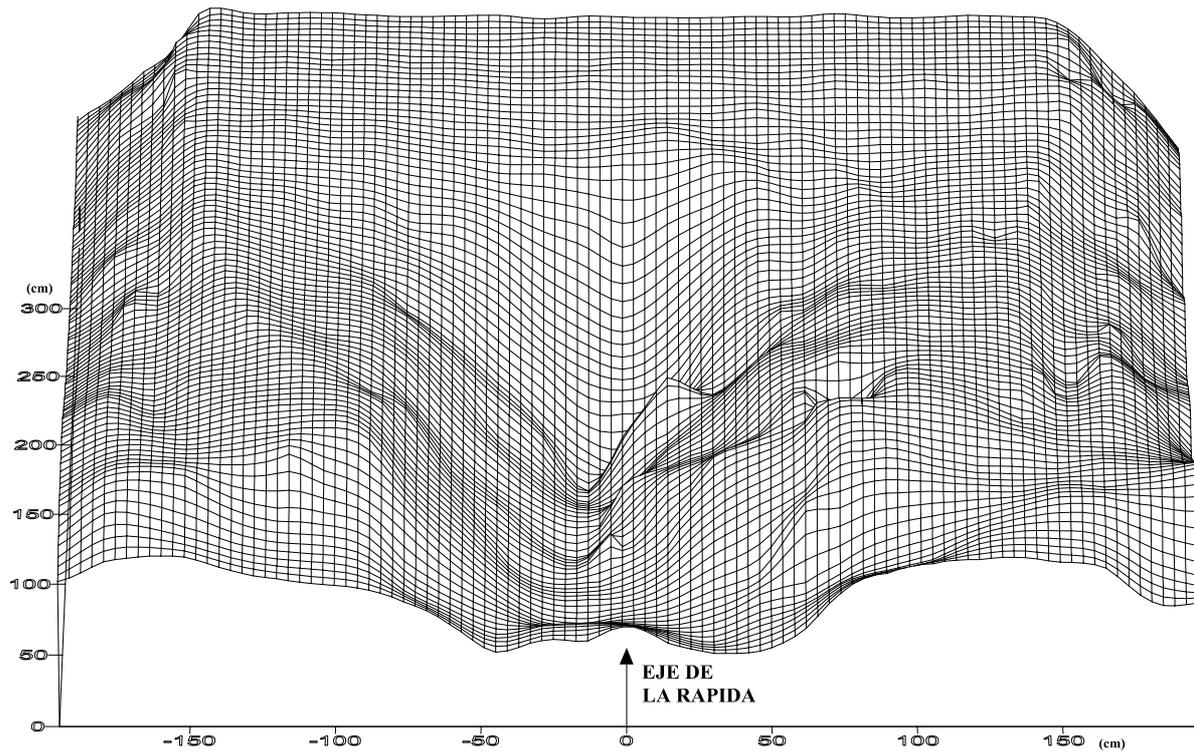
---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

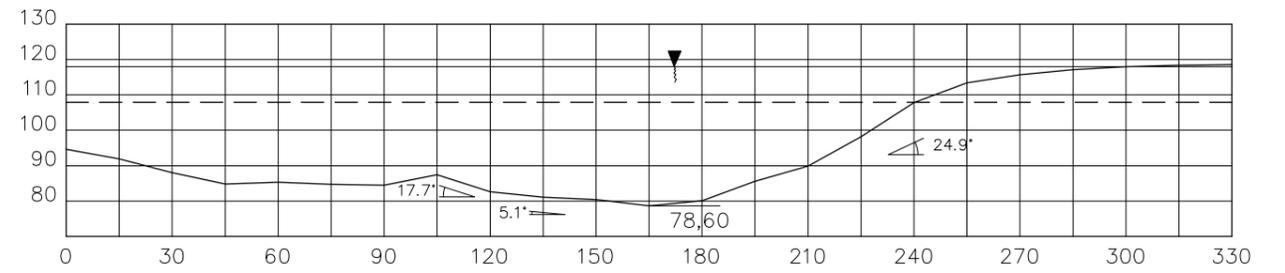
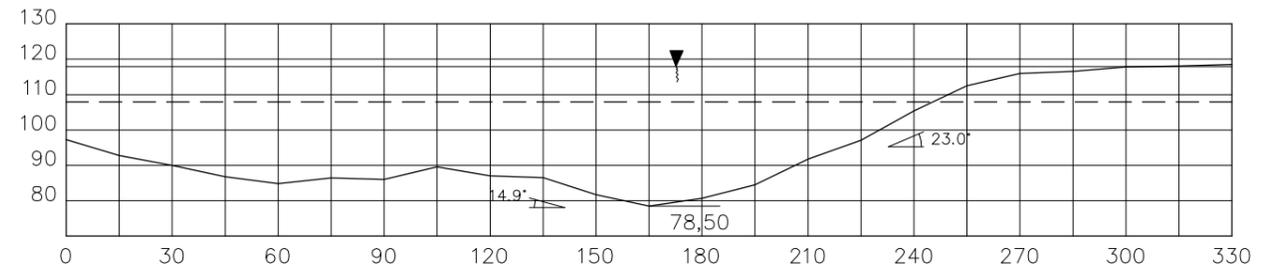
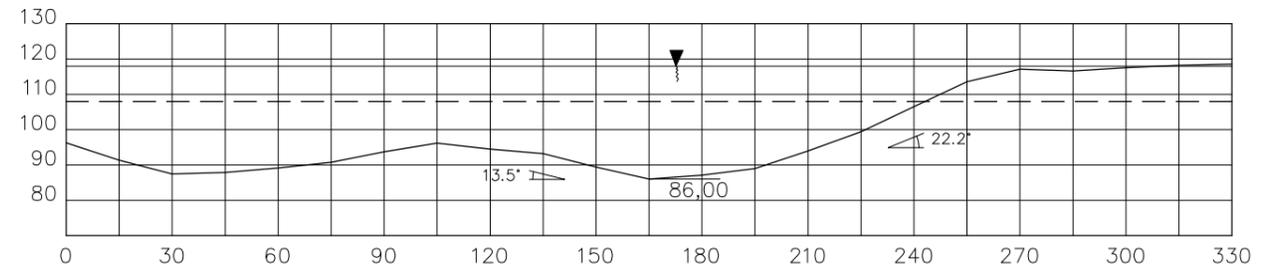
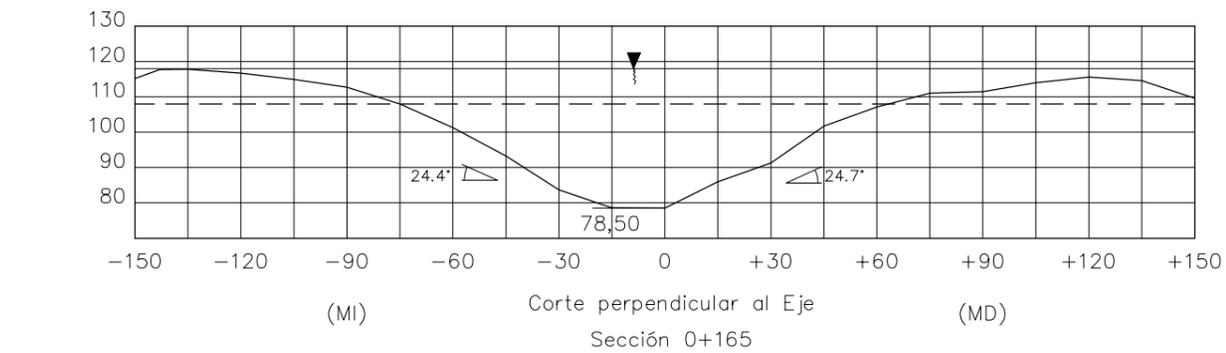
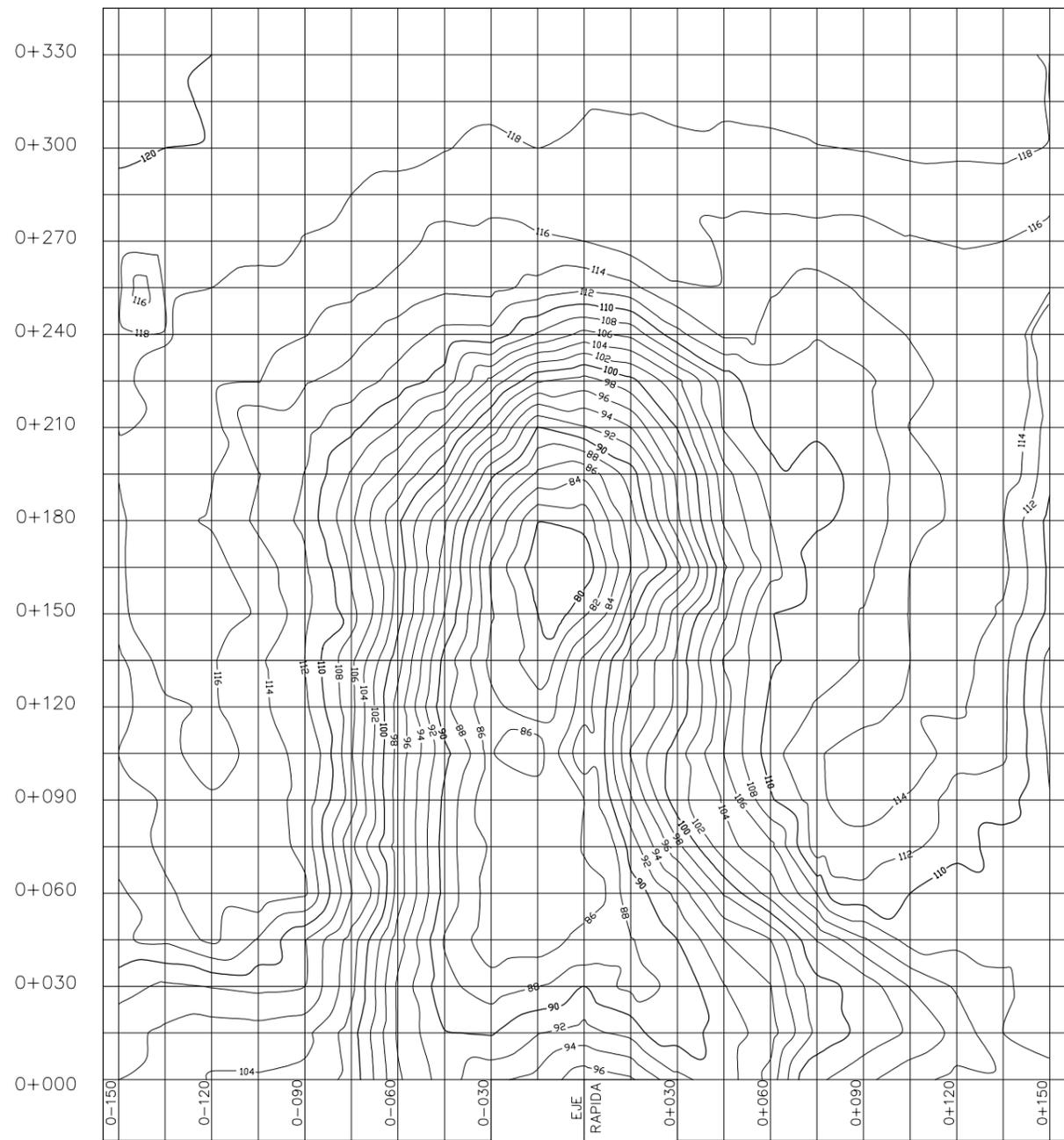
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 5	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.05 \text{ m}$	$d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	07-04-03	Escala:	1:20
			Lámina N° G-04-A



NOTA

Profundidad de erosión (hs) = 0.309 m

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 5	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.05 \text{ m}$	$d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	07-04-03	Escala:	INDICADA
			Lamina N° G-04-B



Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

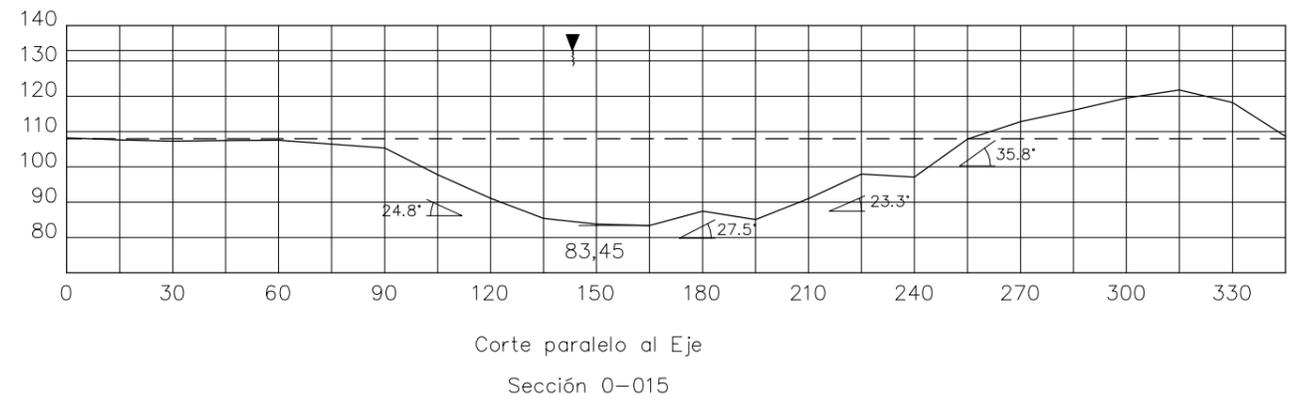
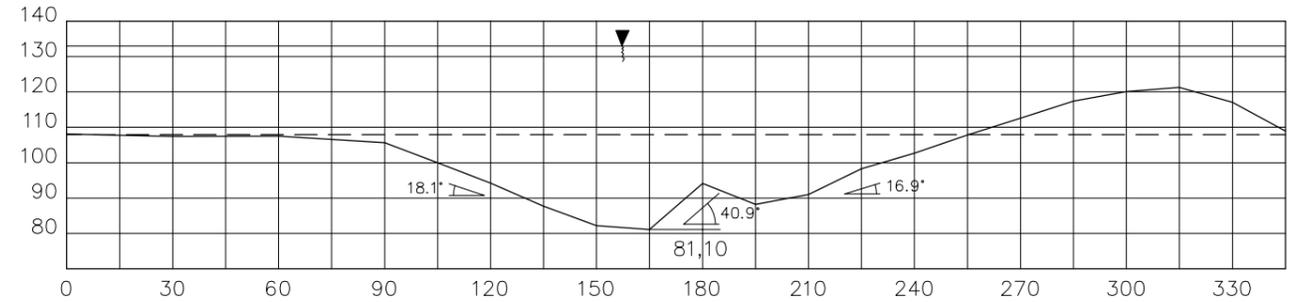
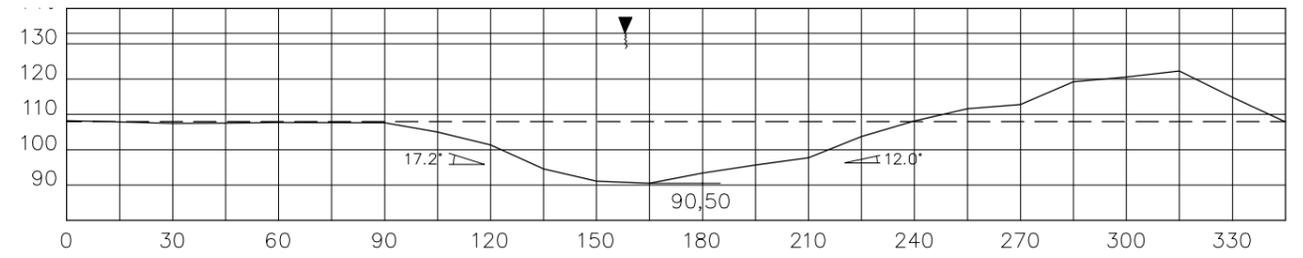
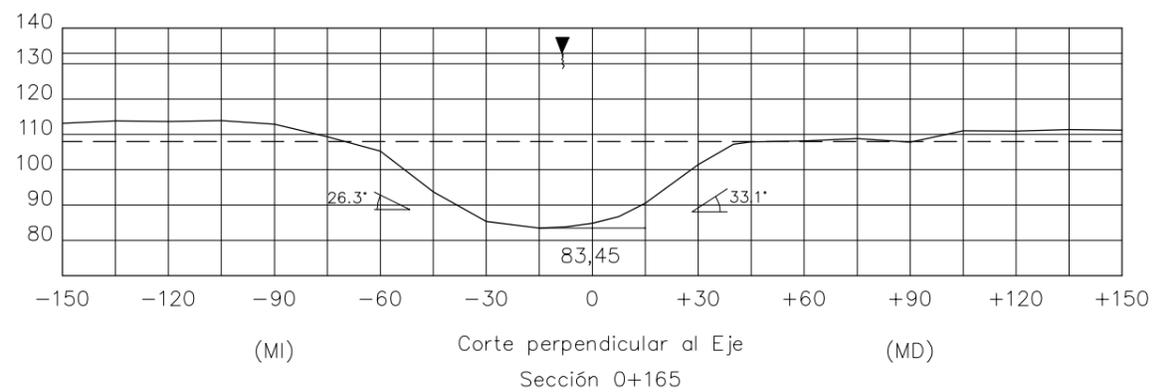
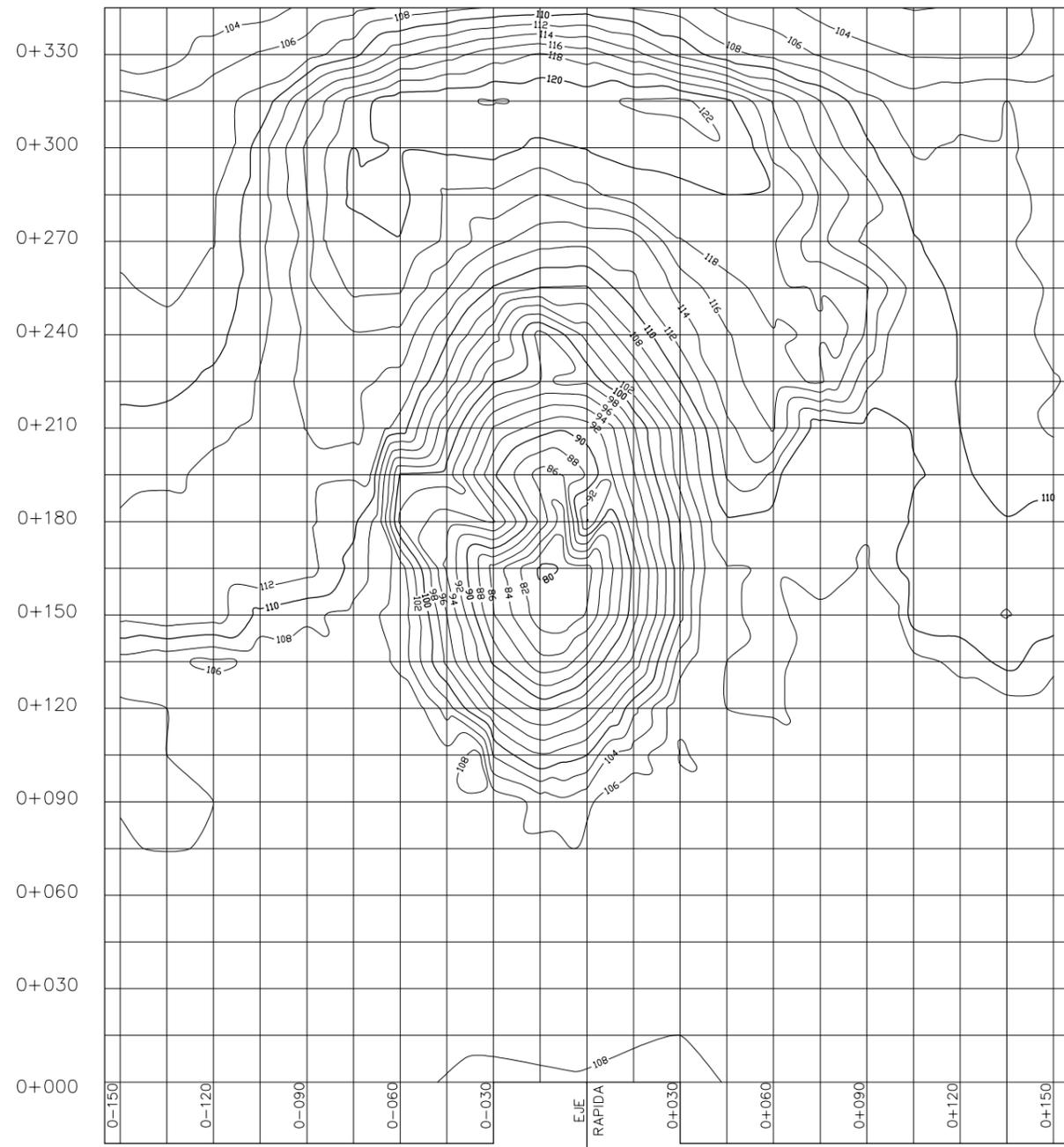


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 6	
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.04 m ³ /s	d ₅₀ = 1.60 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.10 m	d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	09-04-03	Escala:	1:20
		Lámina N°	G-05



Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

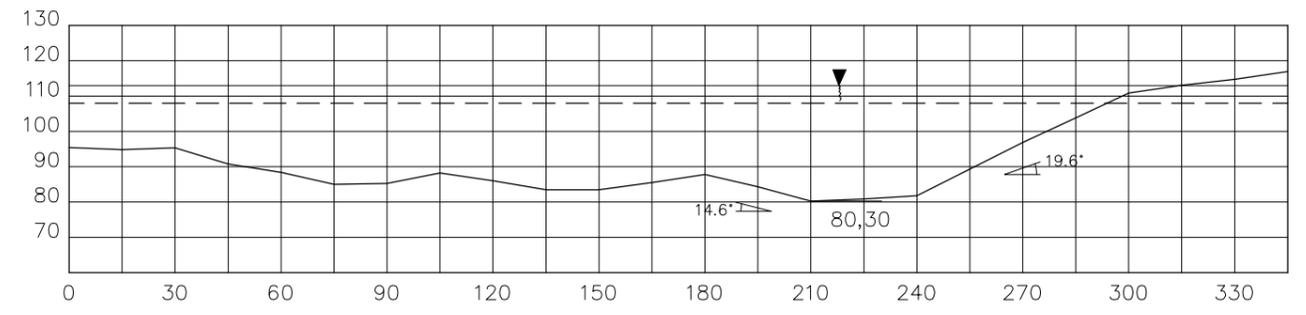
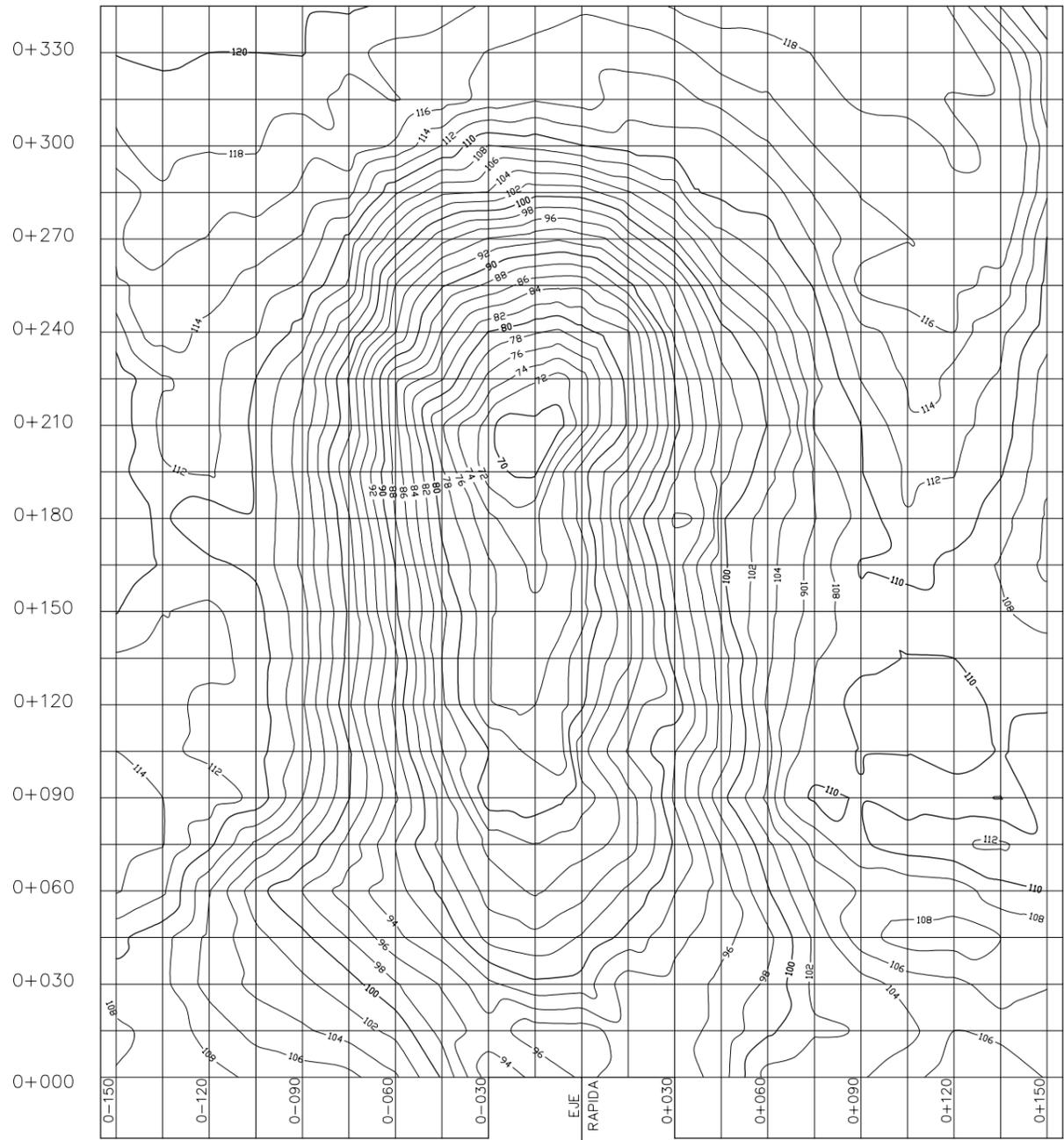


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

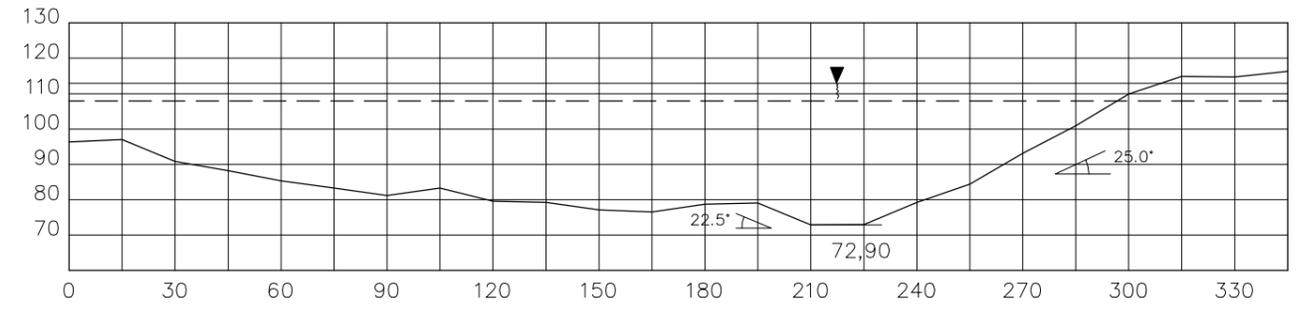
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

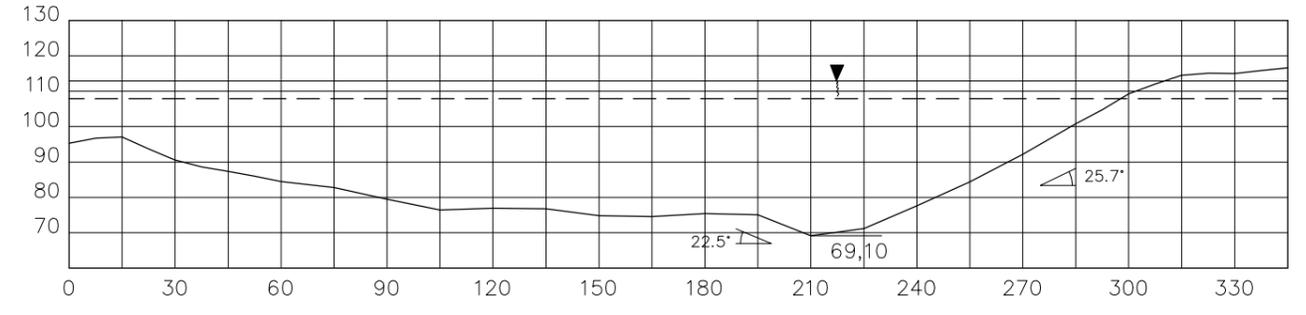
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 7	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.25 \text{ m}$	$d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	11-04-03	Escala:	1:20
		Lámina N°	G-06



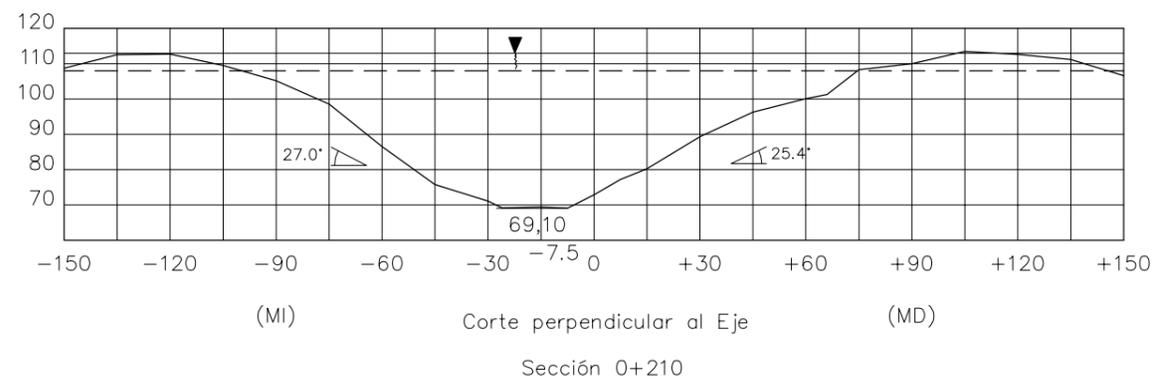
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-007.5



Corte perpendicular al Eje
Sección 0+210

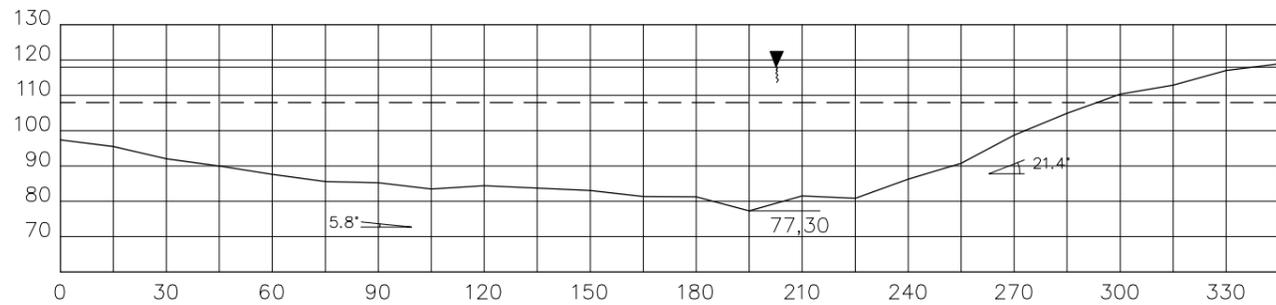
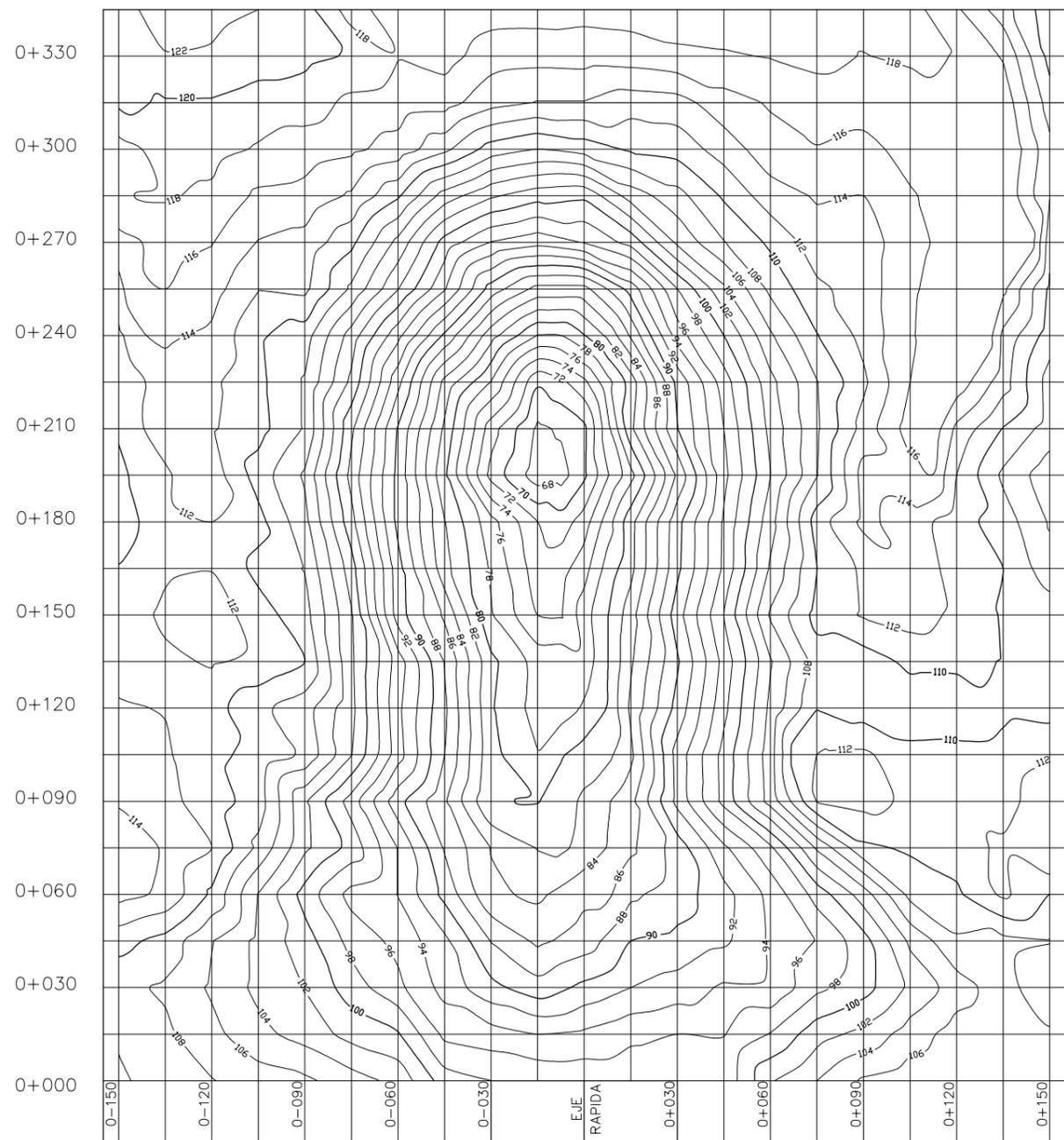
Nota:

Las dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

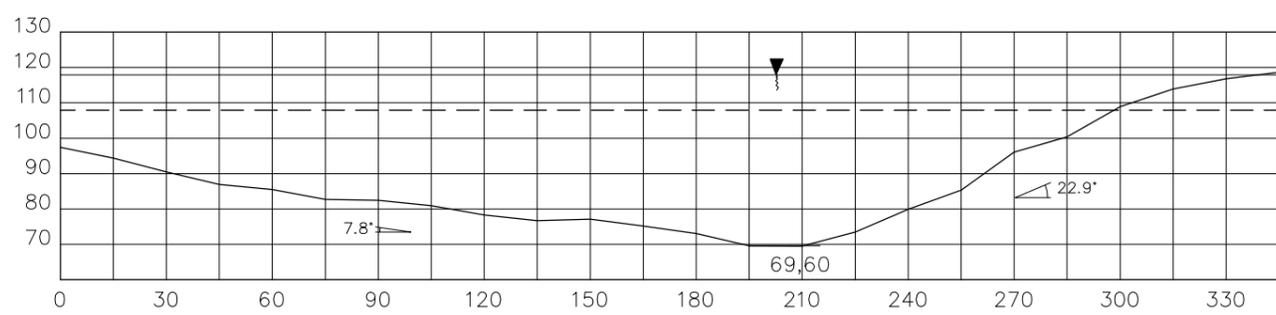
LEYENDA:

- Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
- Condición Final
- MD Margen Derecha
- MI Margen Izquierda

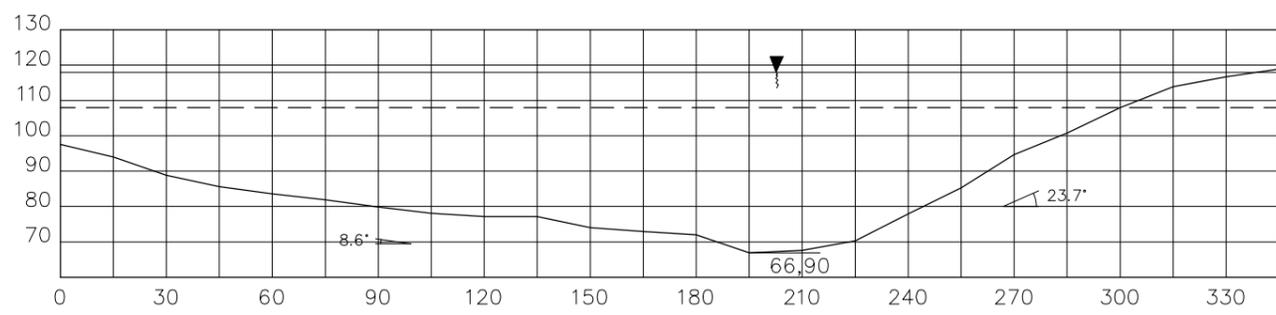
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 9
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.05 \text{ m}$ $d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	16-04-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-07



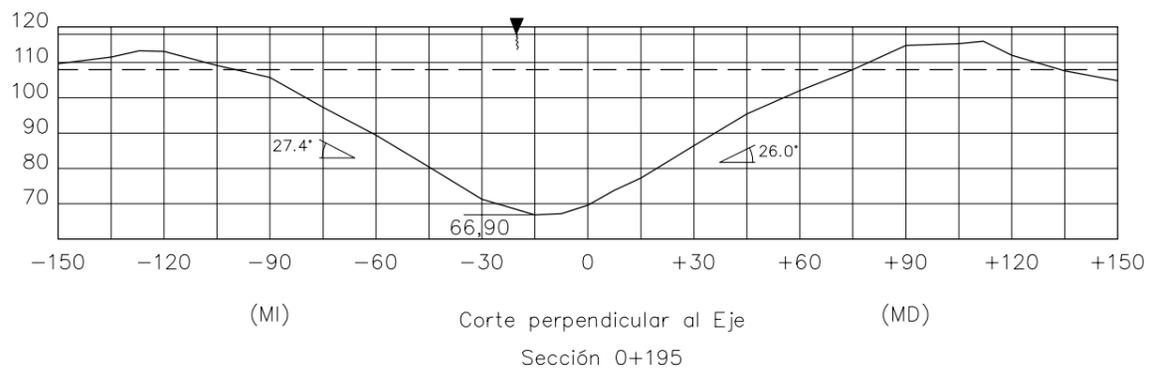
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



Corte perpendicular al Eje
Sección 0+195

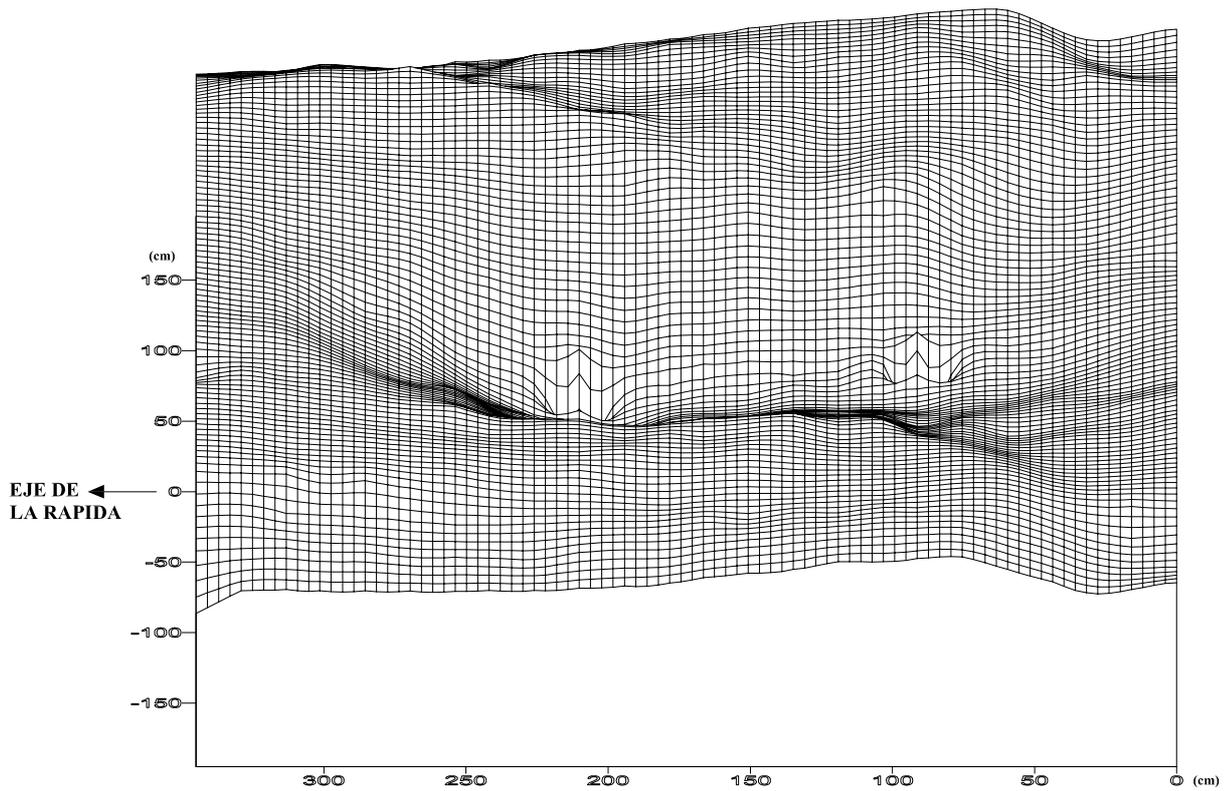
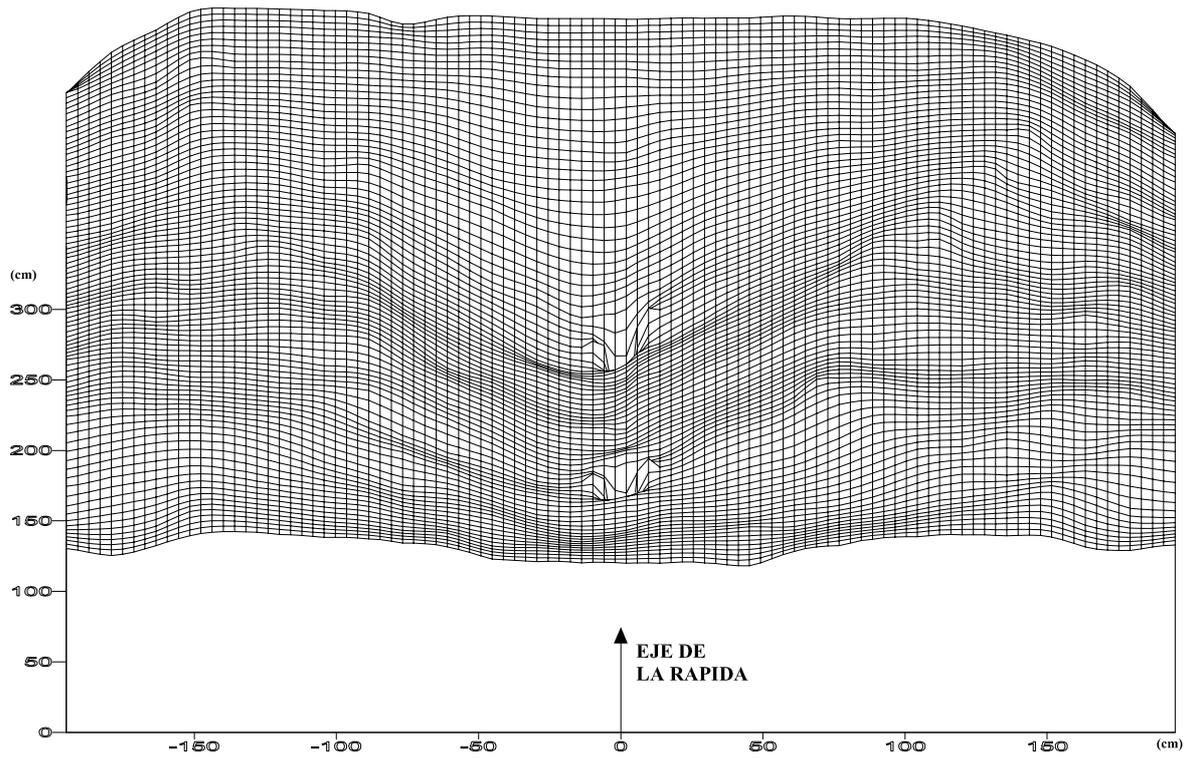
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

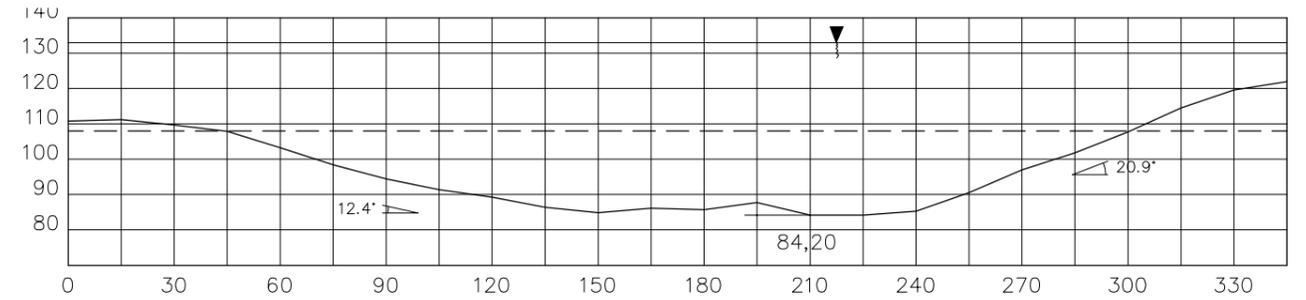
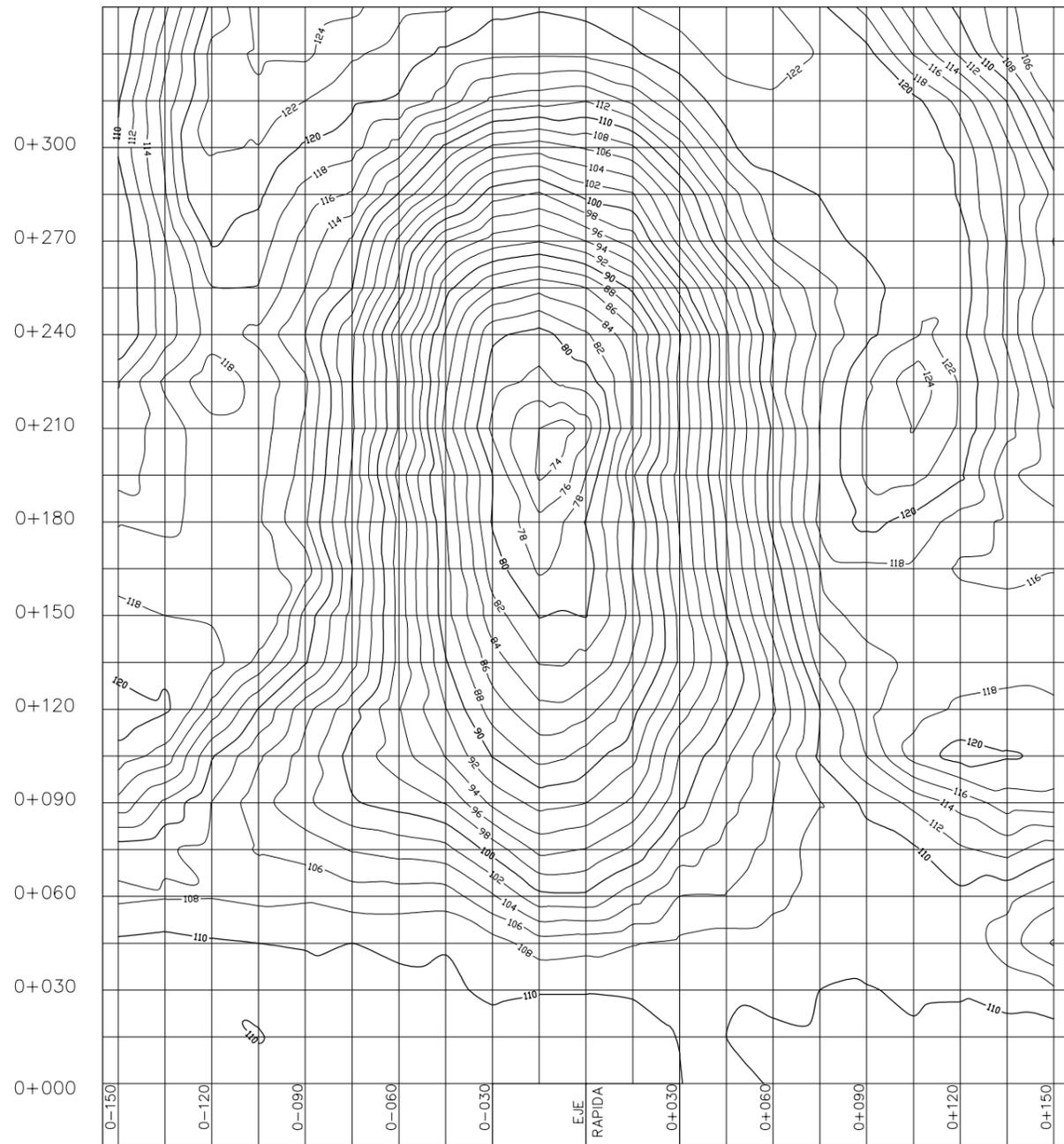
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 10
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.06 m ³ /s d ₅₀ = 1.60 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.10 m d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	22-04-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-08-A



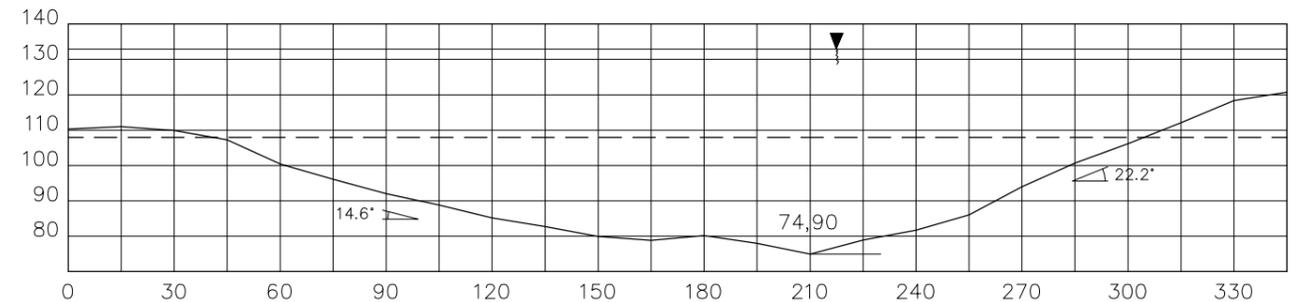
NOTA

Profundidad de erosión (hs) = 0.410 m

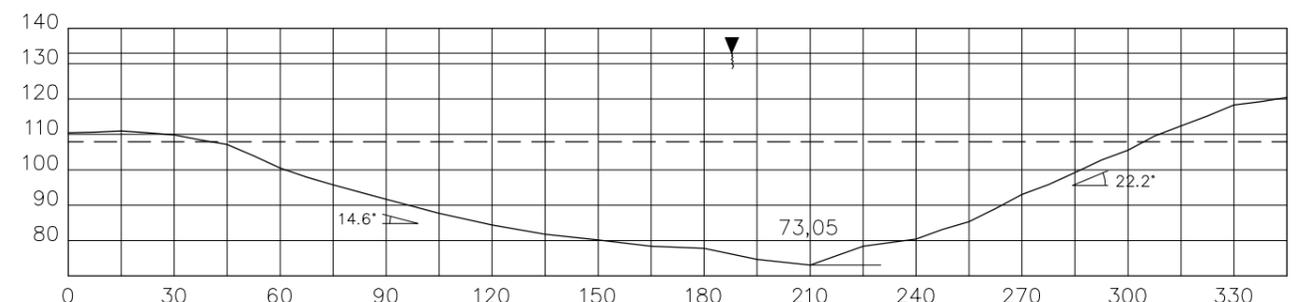
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 10	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
Dibujador:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$	$d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	22-04-03	Escala:	INDICADA
		Lamina N°	G-08-B



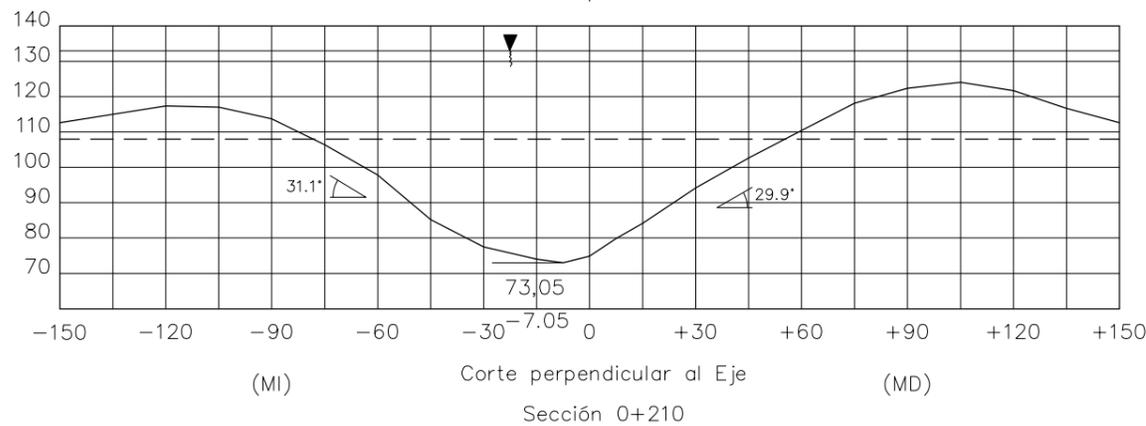
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-007.5



Corte perpendicular al Eje
Sección 0+210

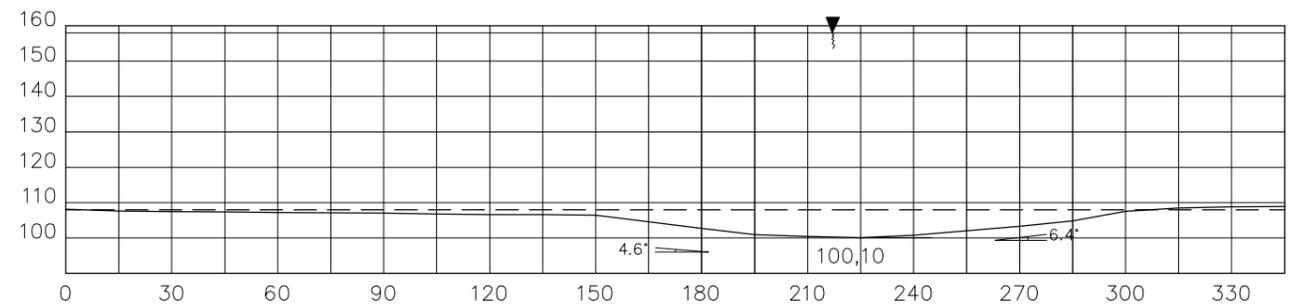
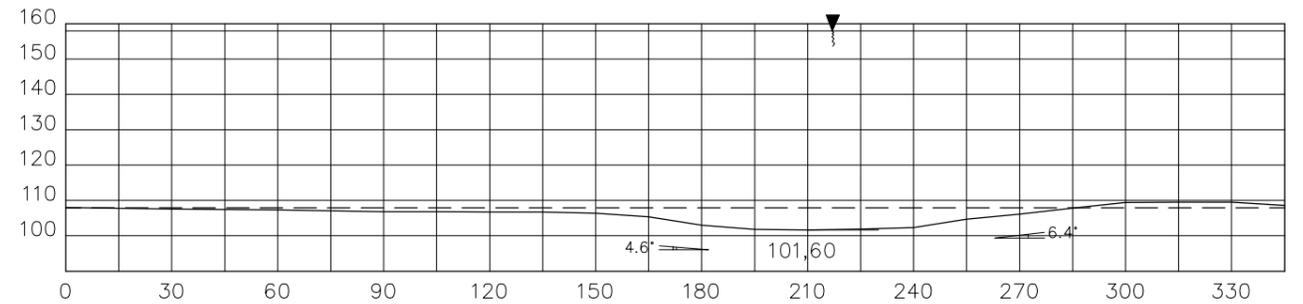
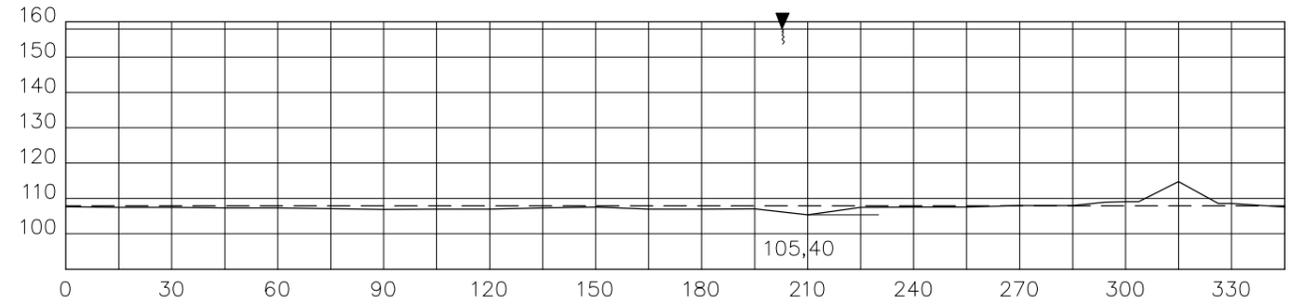
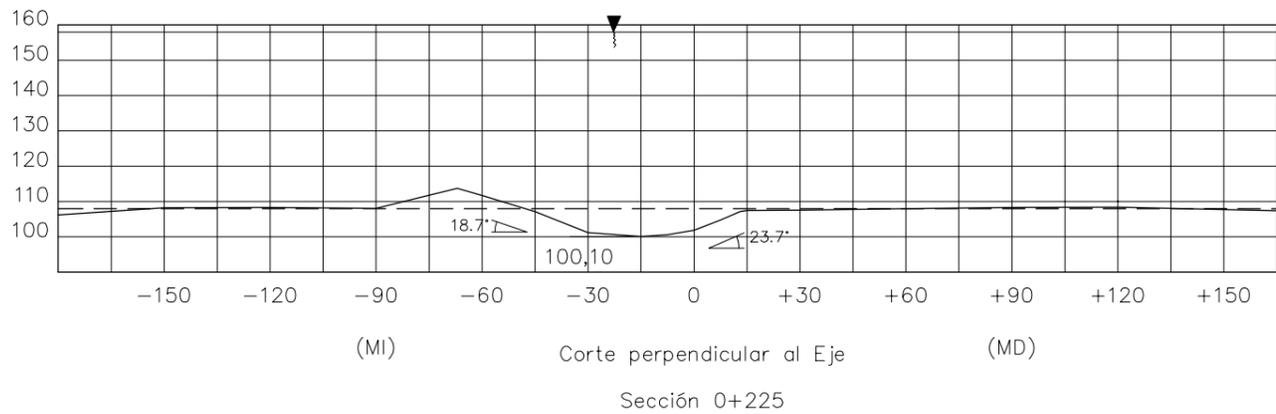
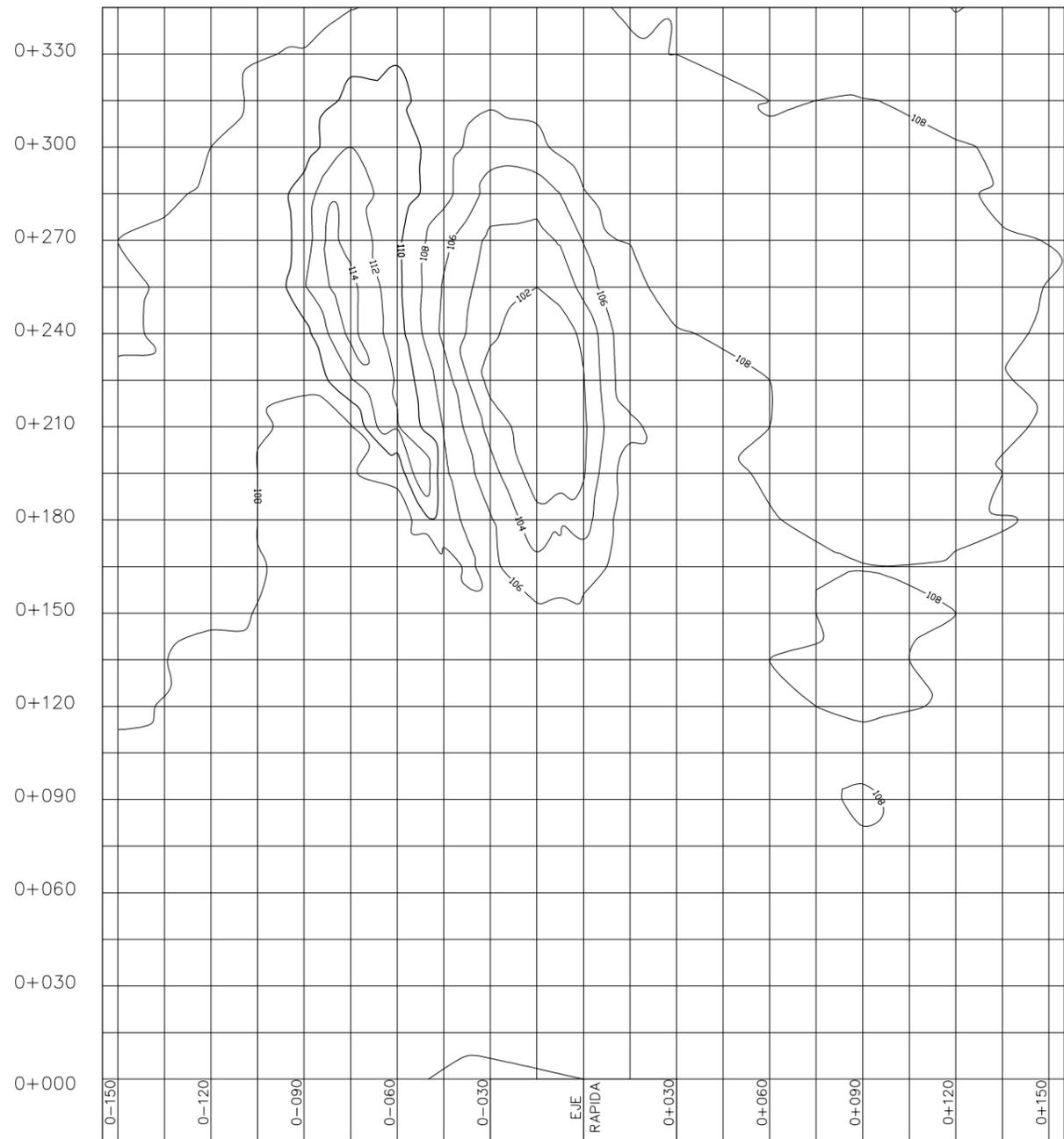
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 11
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.06 m ³ /s d ₅₀ = 1.60 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.25 m d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	24-04-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-09



Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

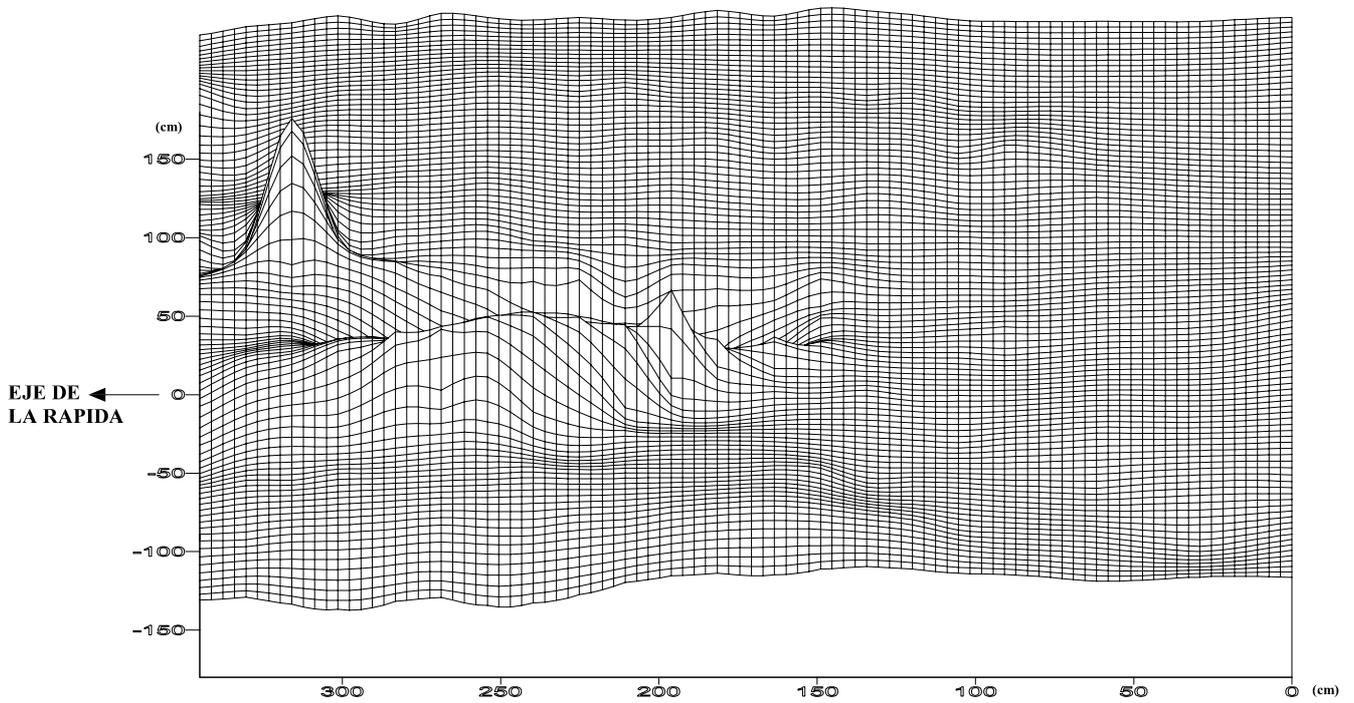
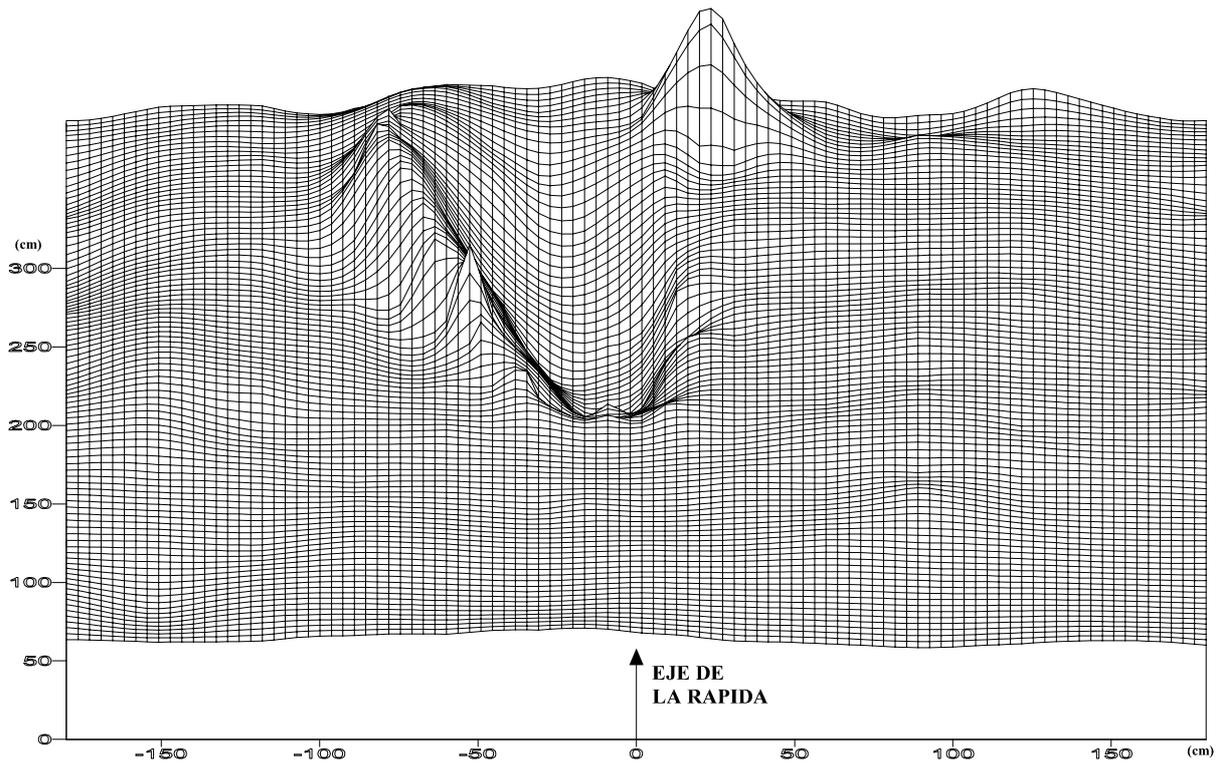


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

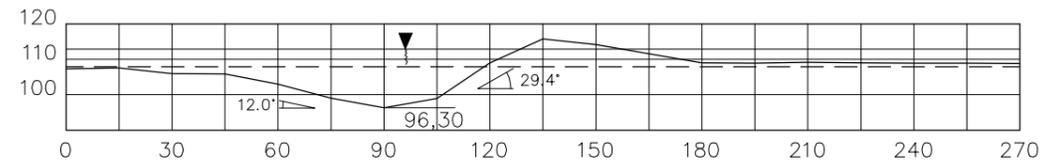
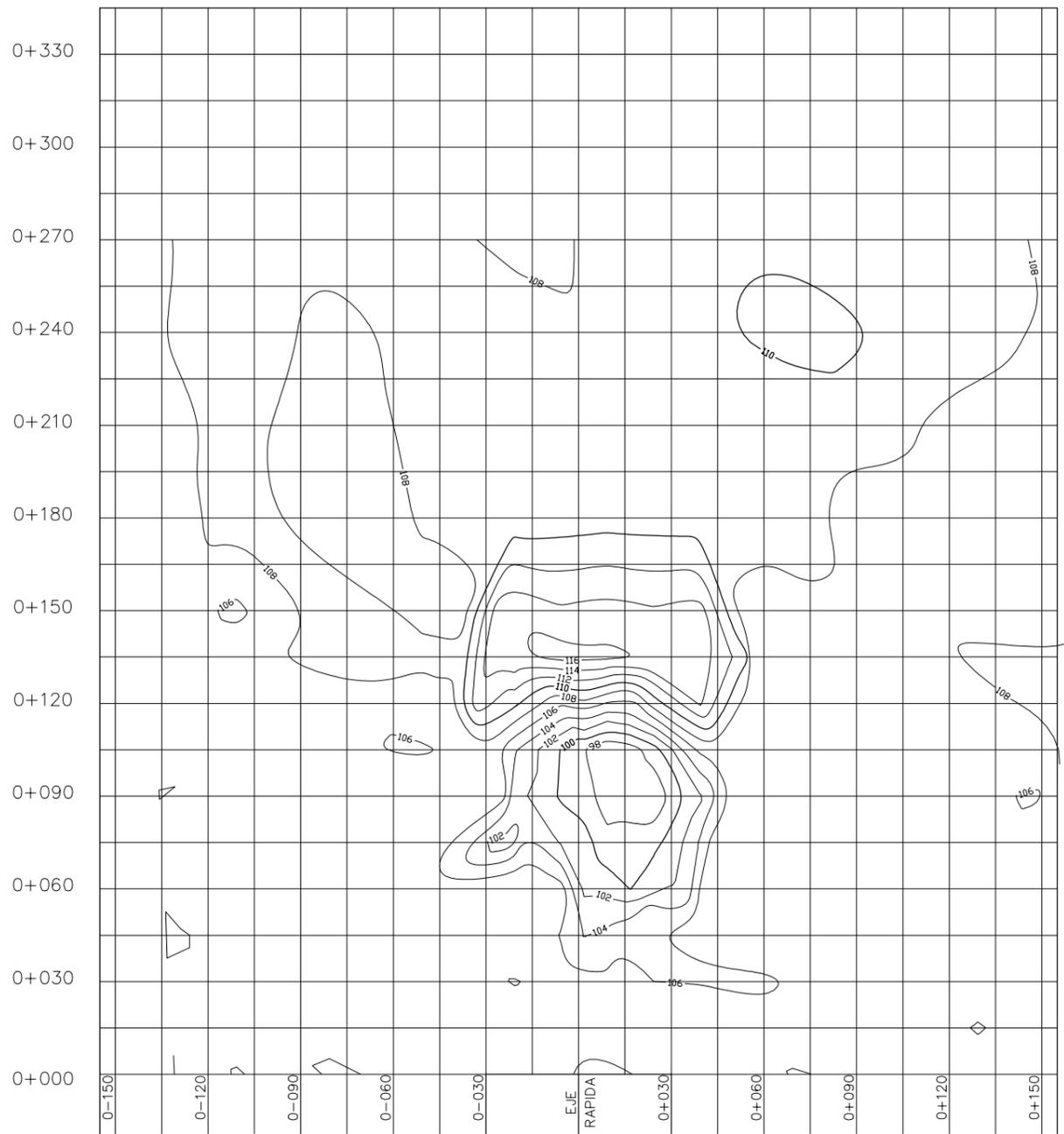
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 12	
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.06 m ³ /s	d ₅₀ = 1.60 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.50 m	d ₈₅ = 4.81 mm
Fecha:	28-04-03	Escala:	1:20
		Lámina N°	G-10-A



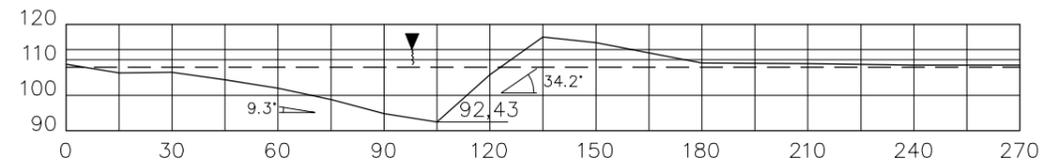
NOTA

Profundidad de erosión (hs) = 0.076 m

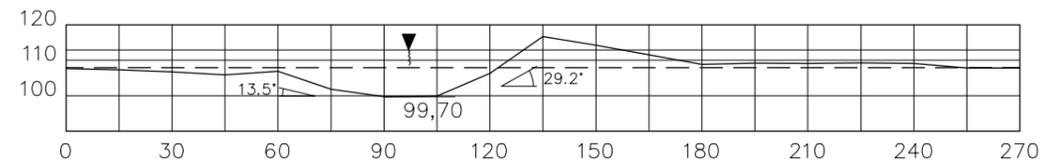
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE I : PRUEBA N° 12	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 1.60 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.50 \text{ m}$	$d_{85} = 4.81 \text{ mm}$
Fecha:	28-04-03	Escala:	INDICADA
		Lamina N°	G-10-B



Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



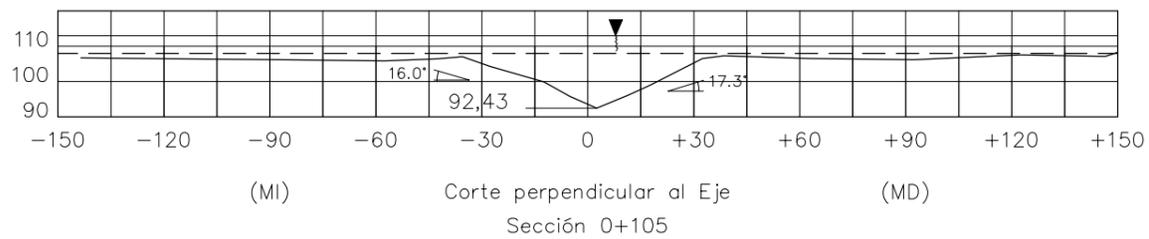
Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

Nota:

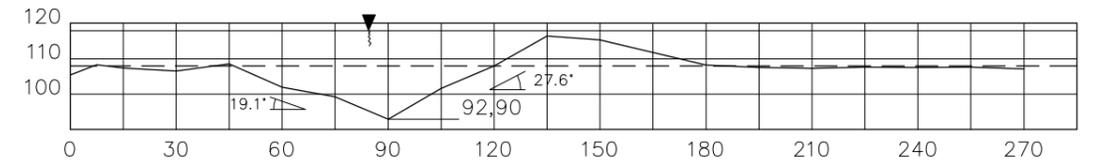
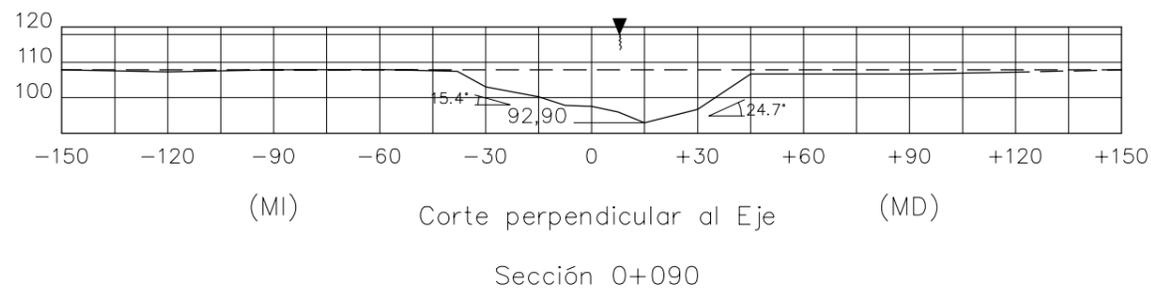
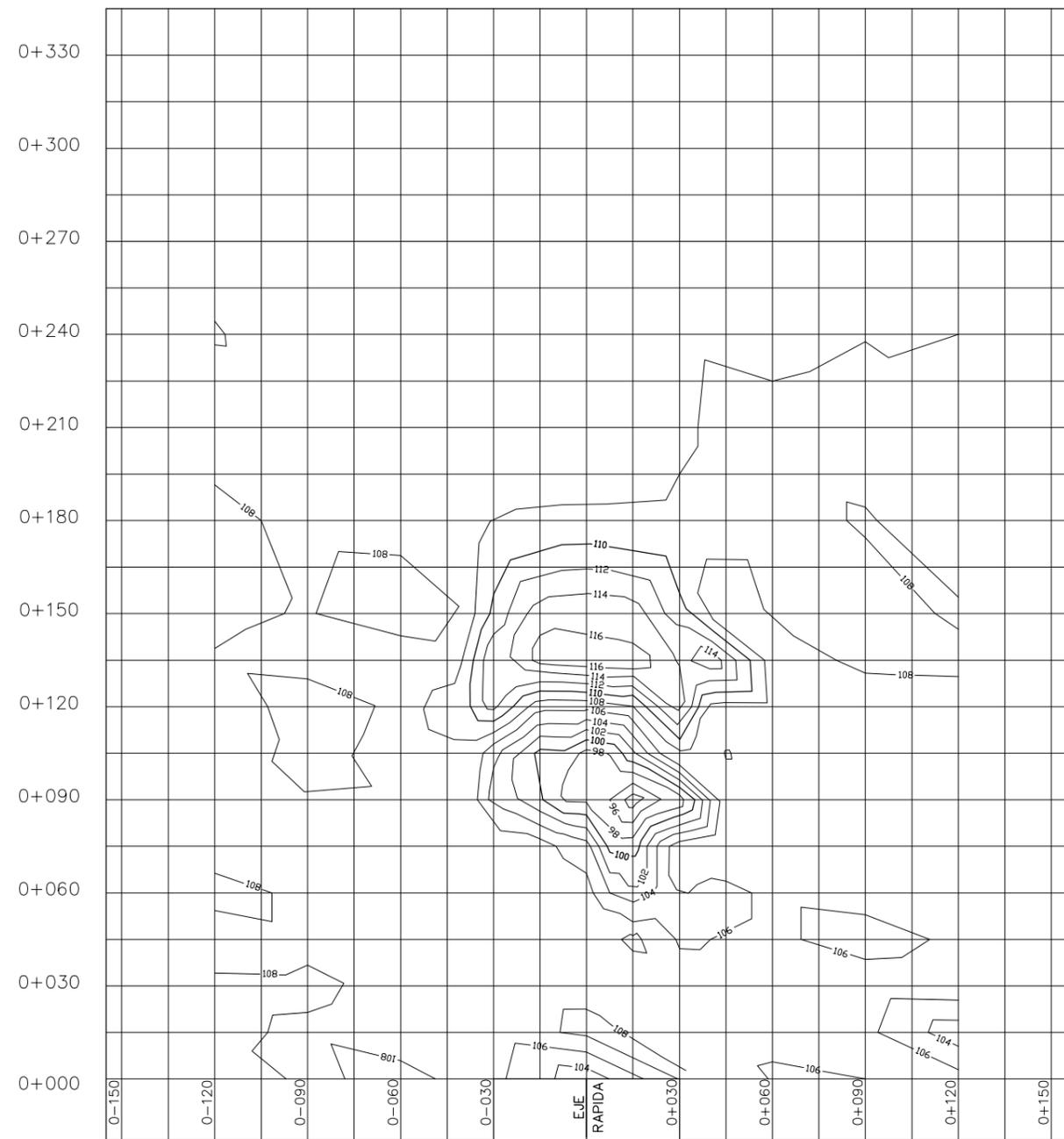
La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

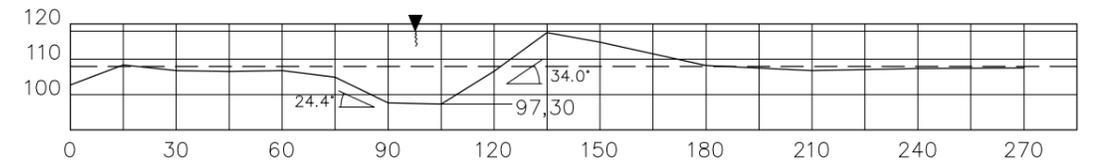
---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda



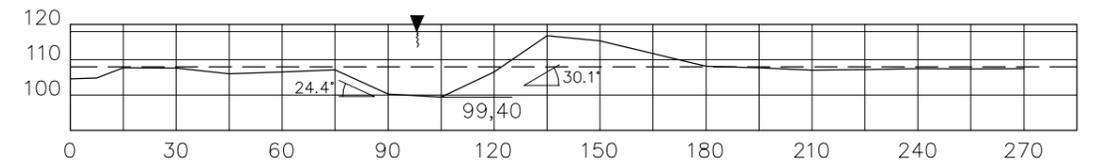
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 1
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.02 m ³ /s d ₅₀ = 17.88 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.05 m d ₈₅ = 23.43 mm
Fecha:	07-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-11



Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

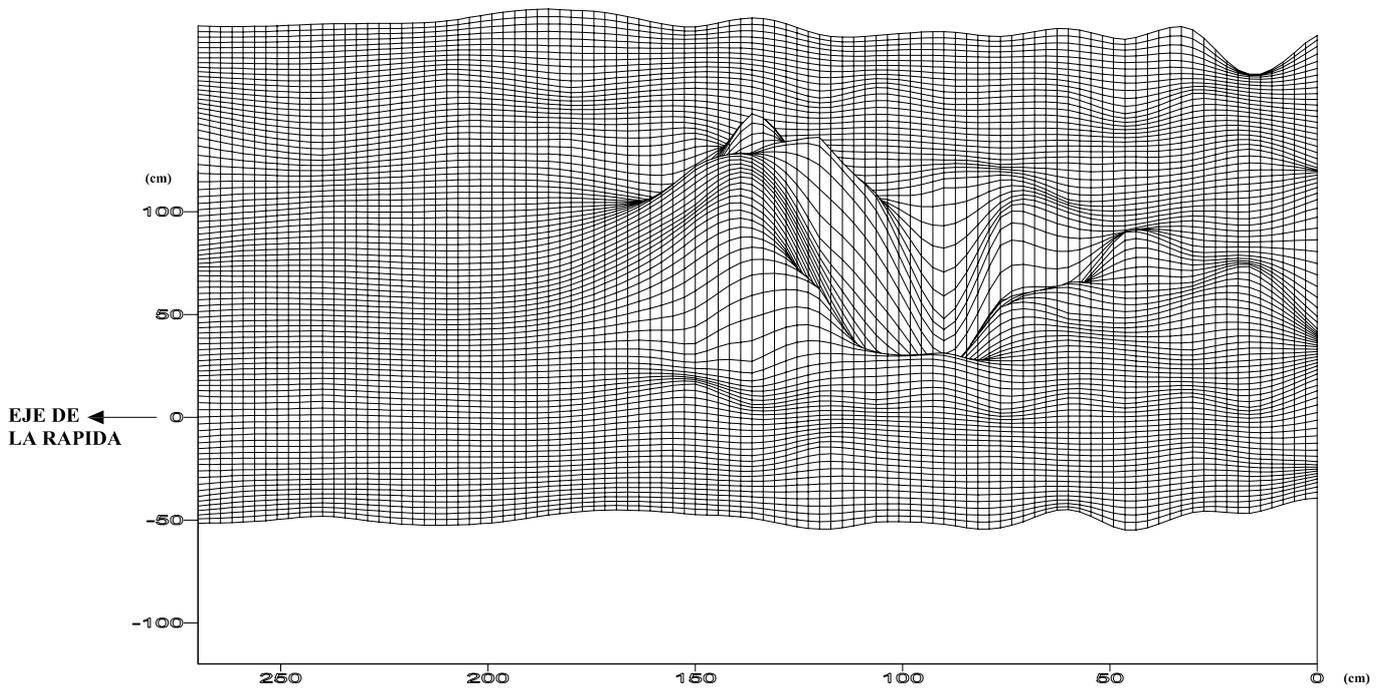
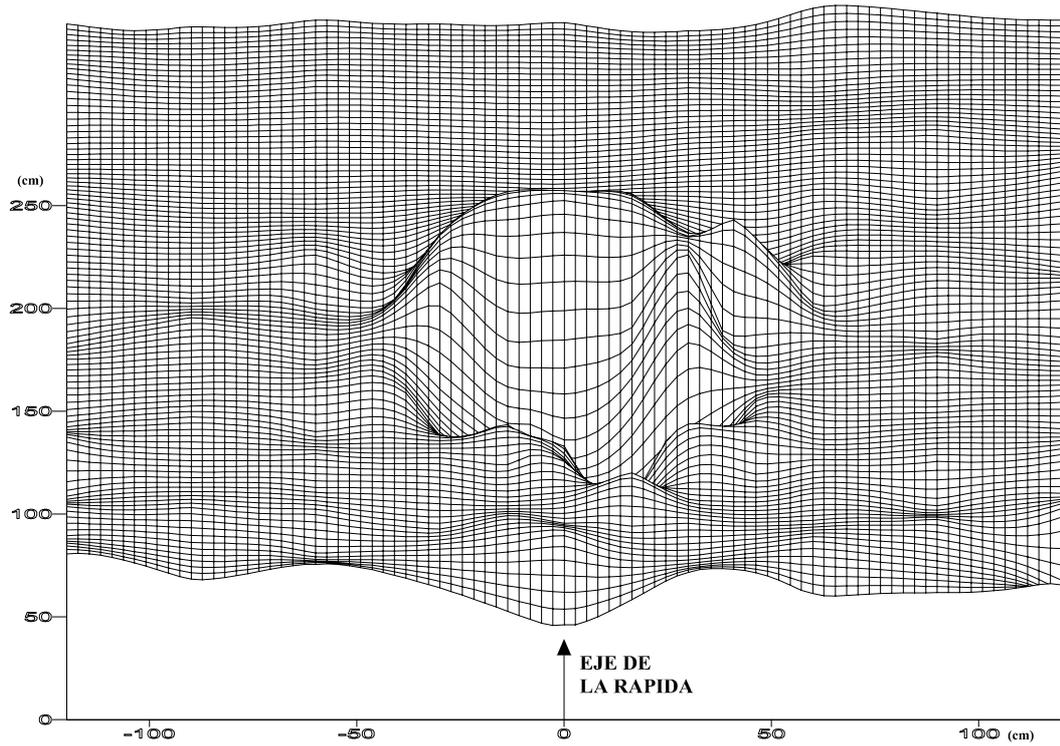
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

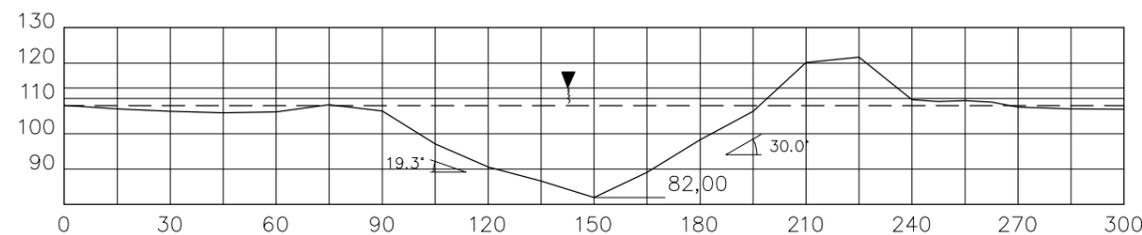
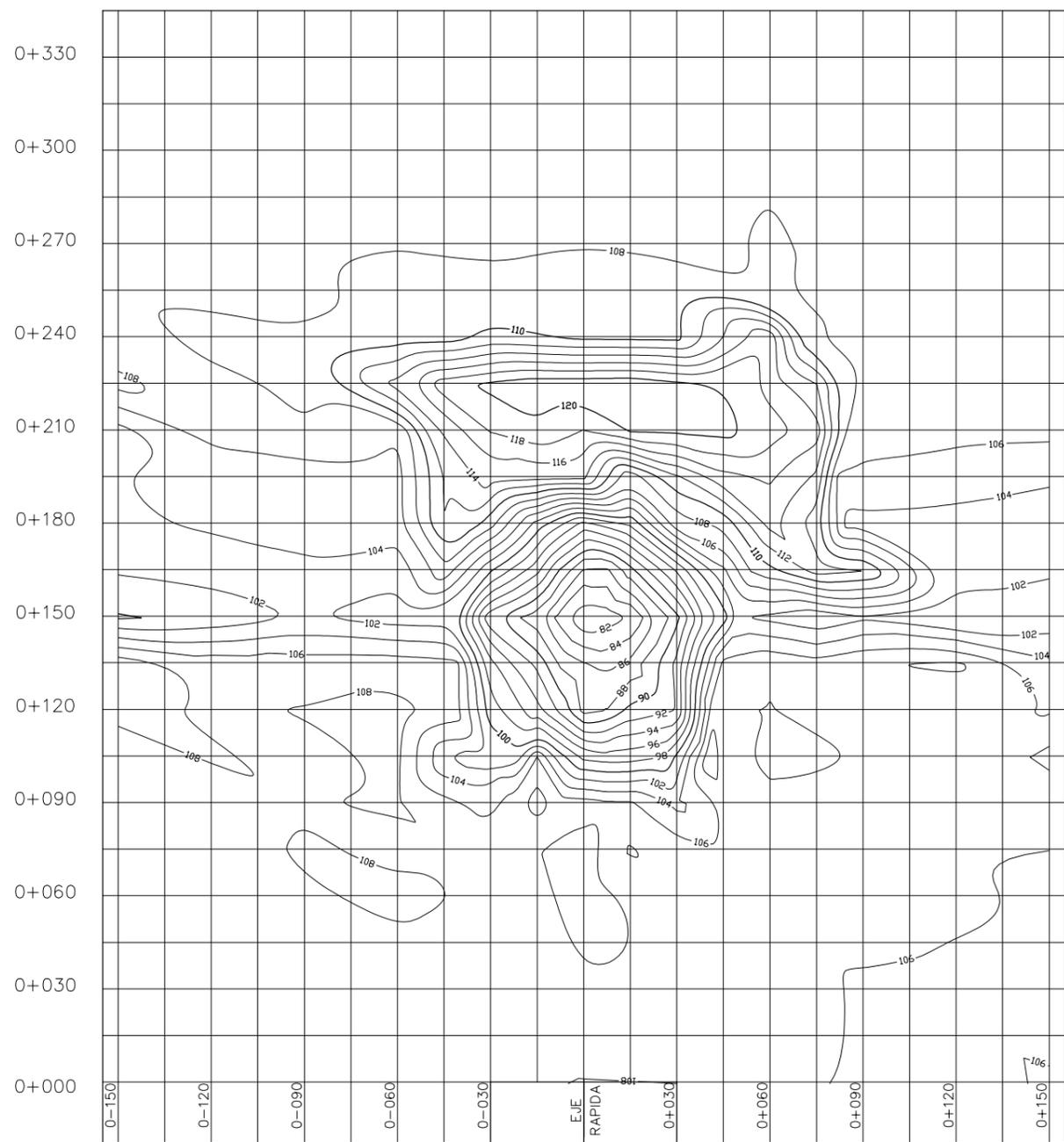
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 2
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$ $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	08-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-12-A



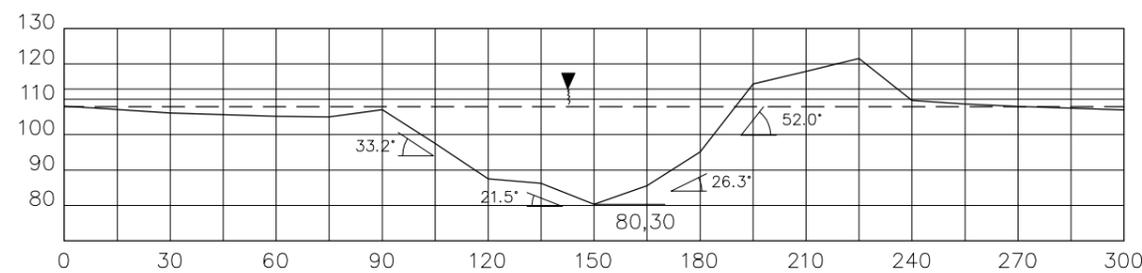
NOTA

Profundidad de erosión (hs) = 0.150 m

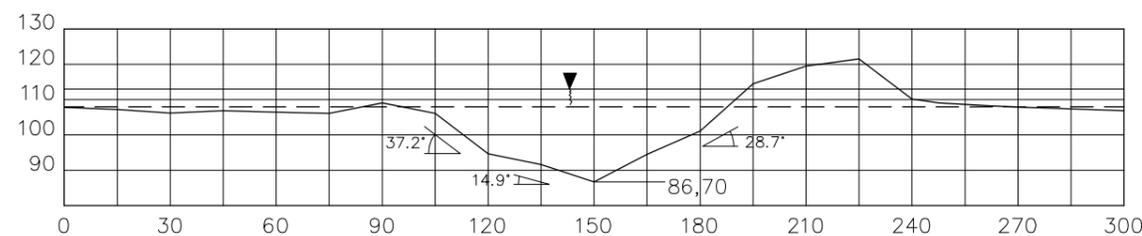
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 2	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$	$d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	08-05-03	Escala:	INDICADA
		Lamina N°	G-12-B



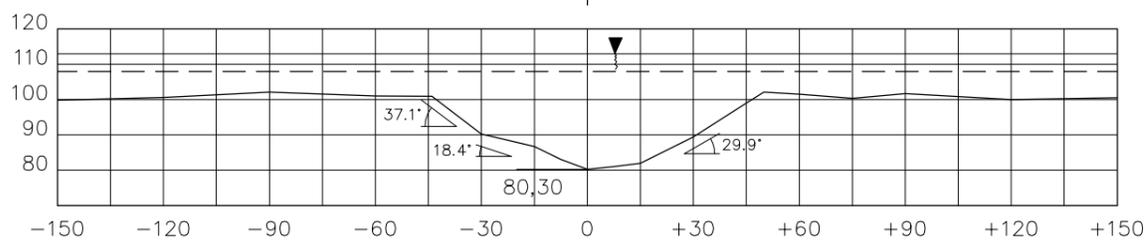
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



(MI) Corte perpendicular al Eje (MD)
Sección 0+150

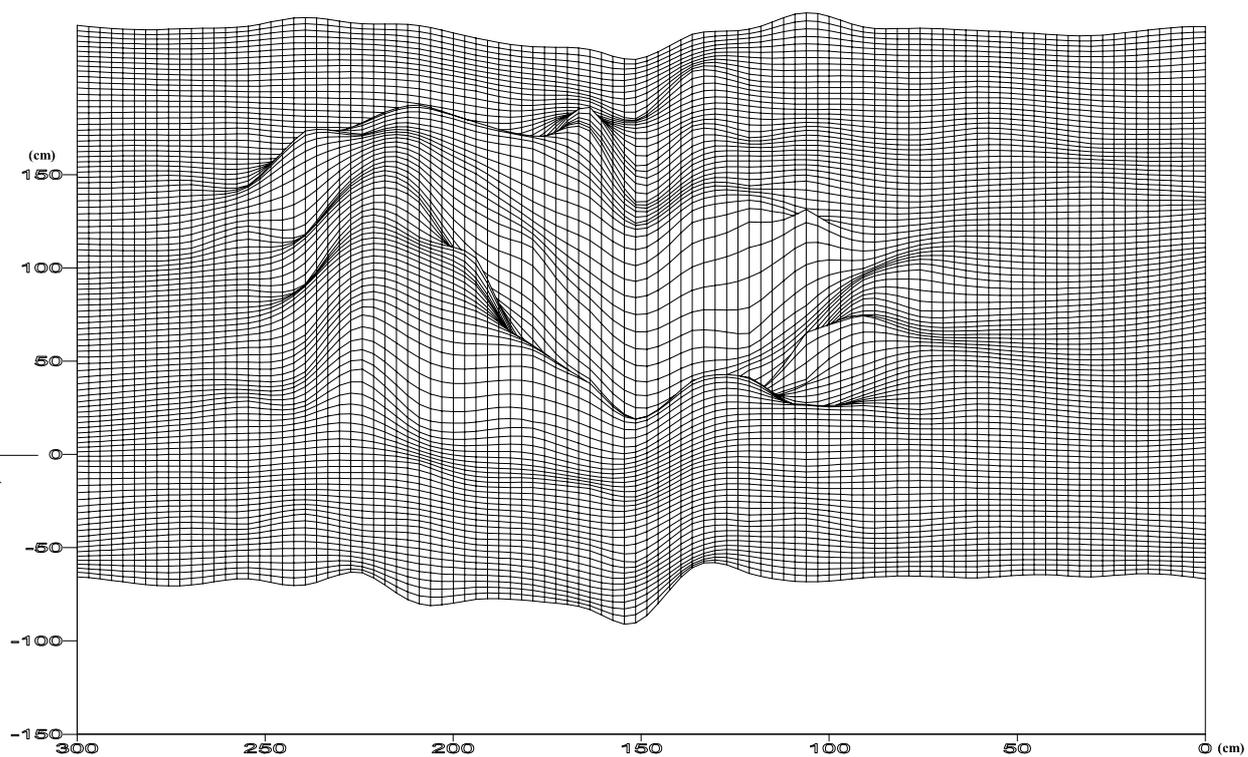
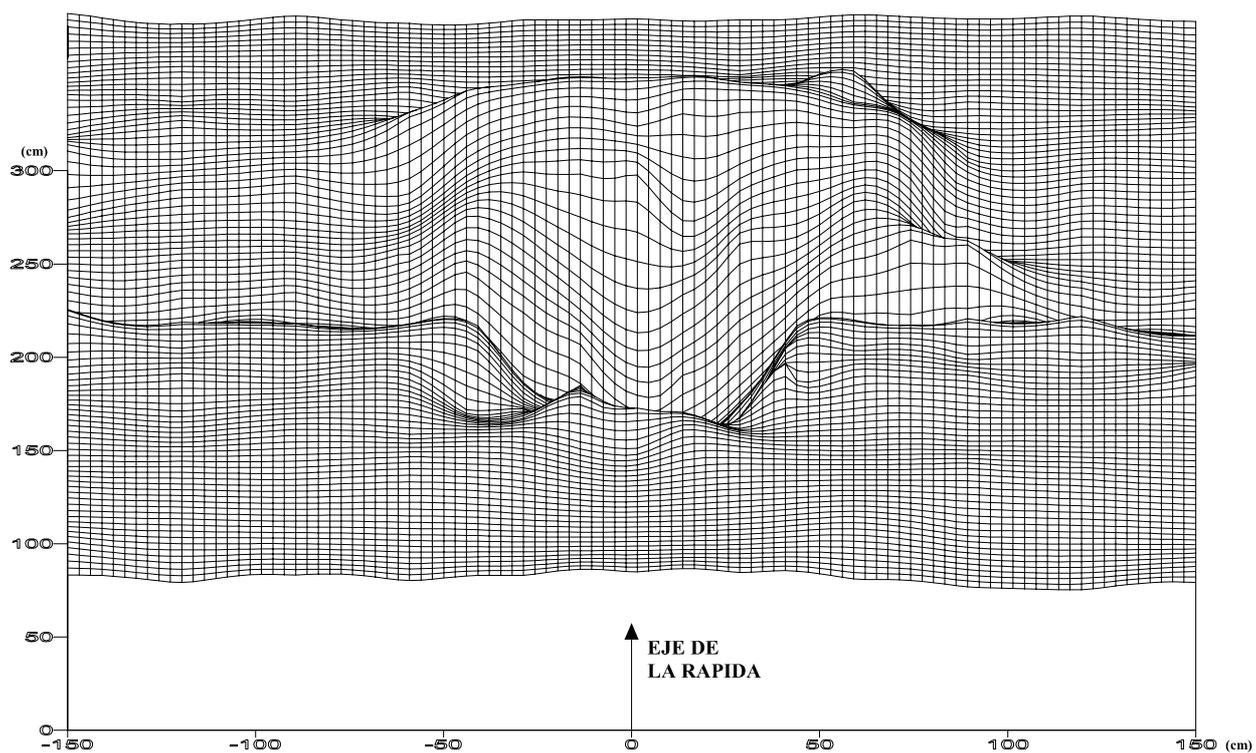
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

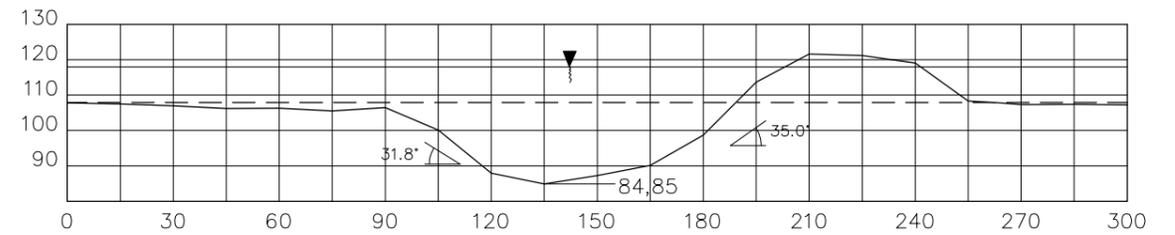
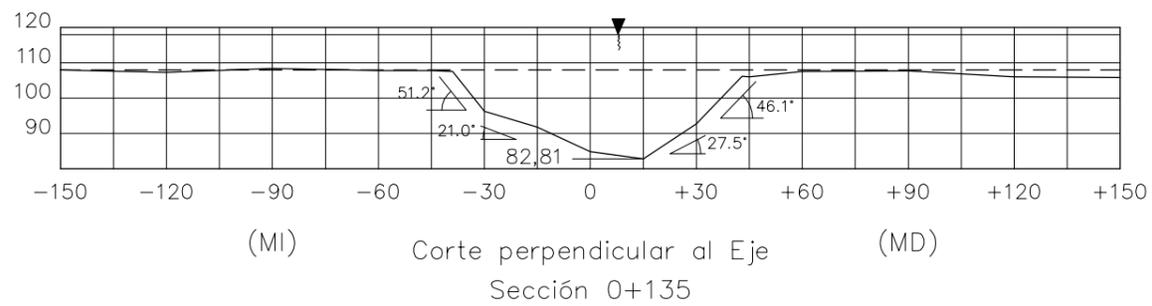
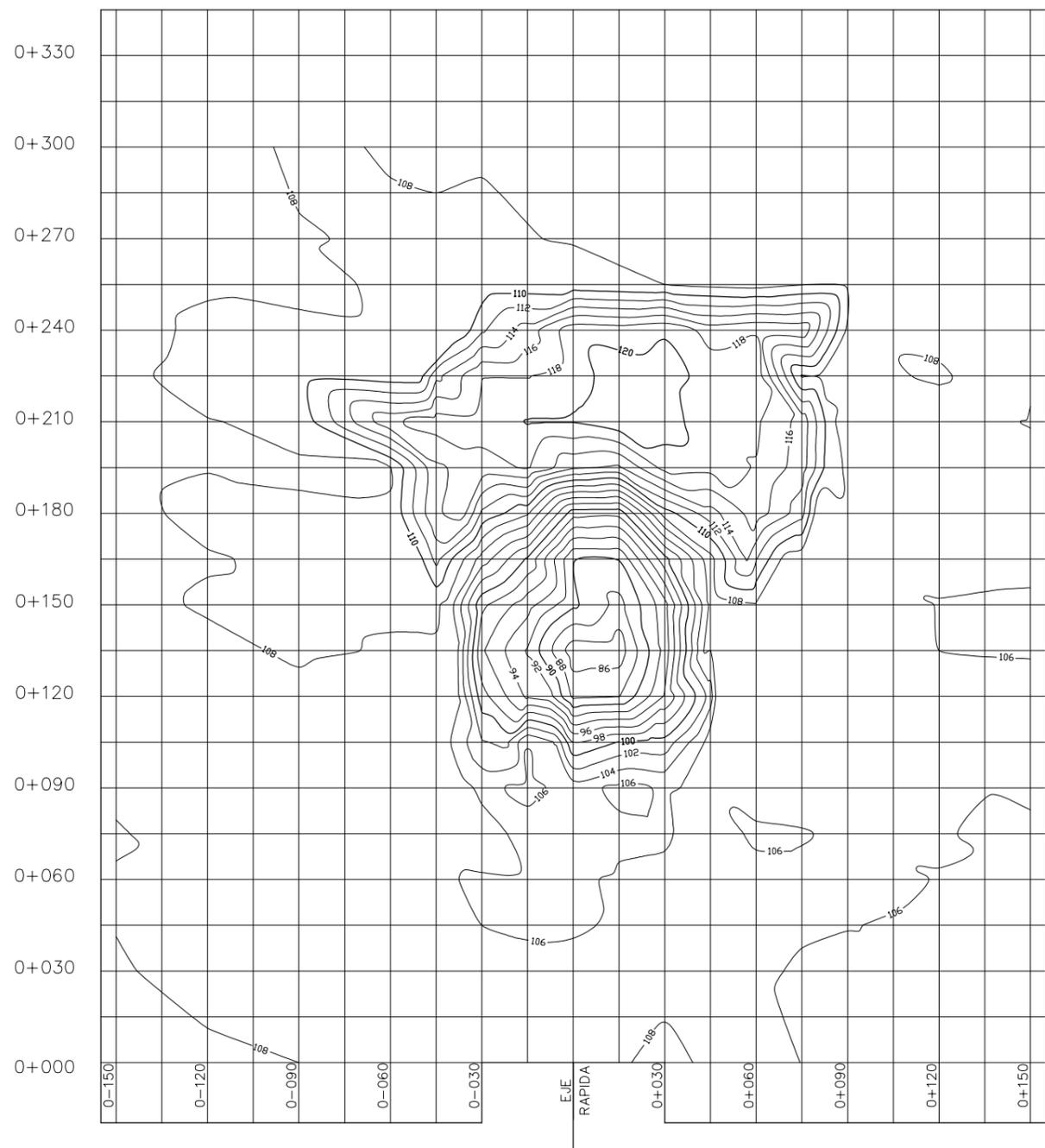
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 5
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.04 m ³ /s d ₅₀ = 17.88 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.05 m d ₈₅ = 23.43 mm
Fecha:	12-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-13-A



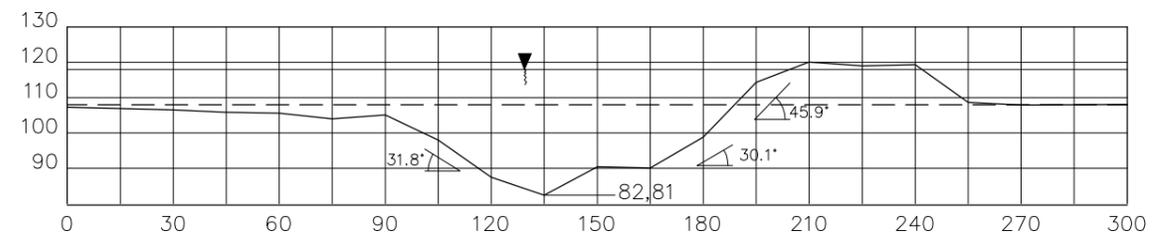
NOTA

Profundidad de erosión (h_s) = 0.273 m

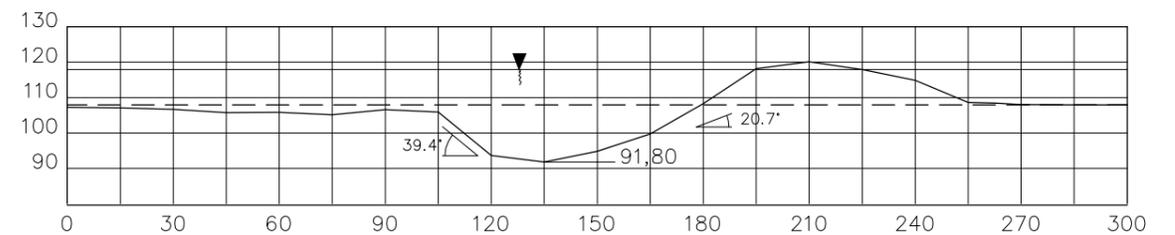
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 5	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujocAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.05 \text{ m}$	$d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	12-05-03	Escala:	INDICADA
		Lamina N°	G-13-B



Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

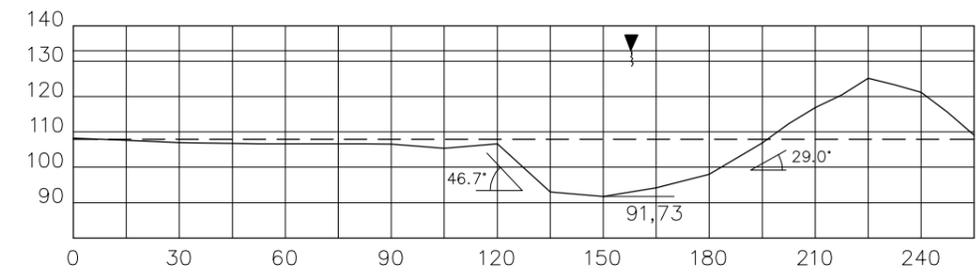
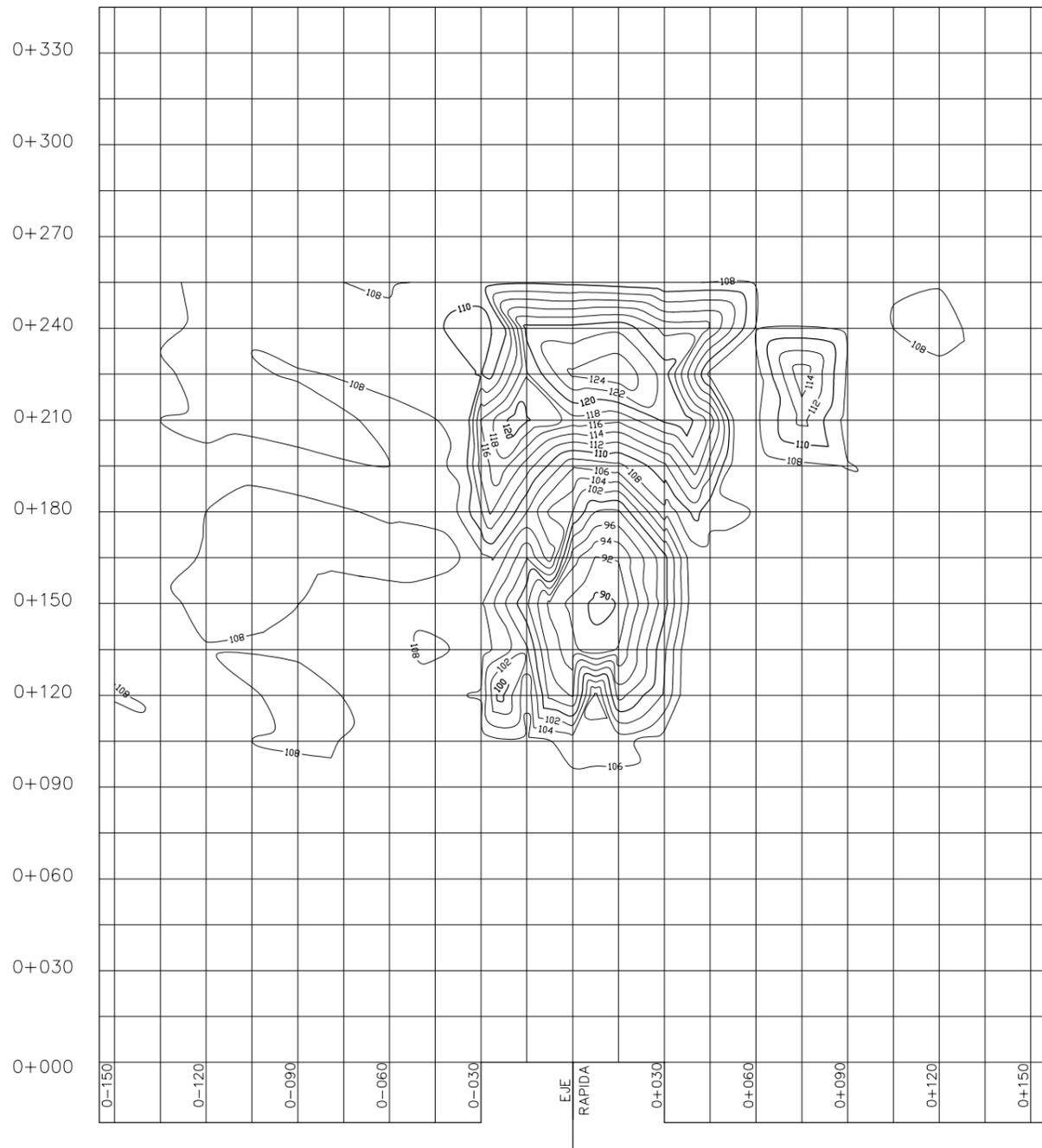
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

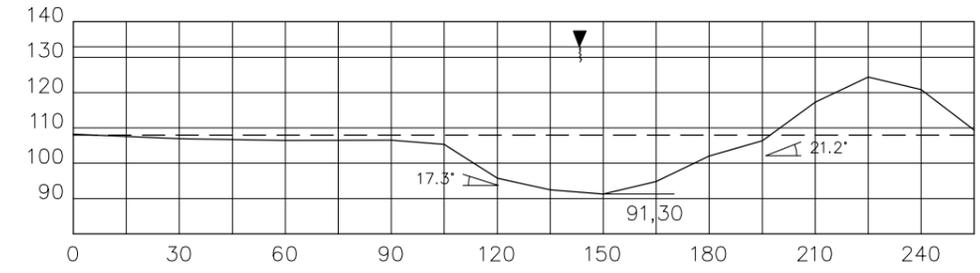
LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

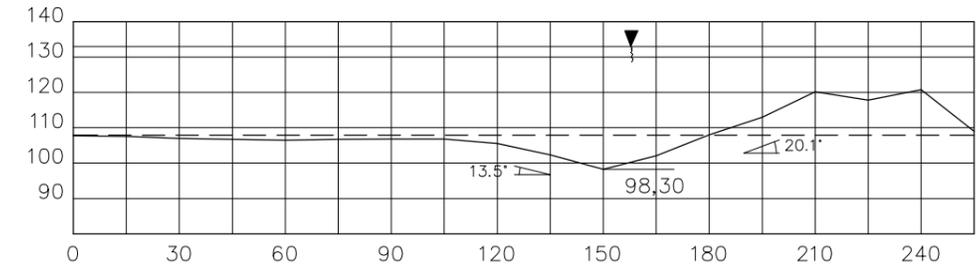
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 6
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$ $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	13-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-14



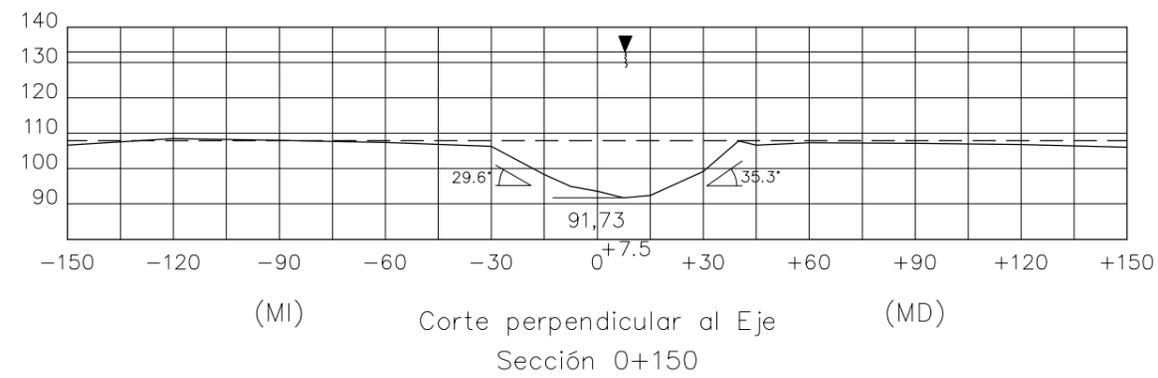
Corte paralelo al Eje
Sección 0+007.5



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



Corte perpendicular al Eje
Sección 0+150

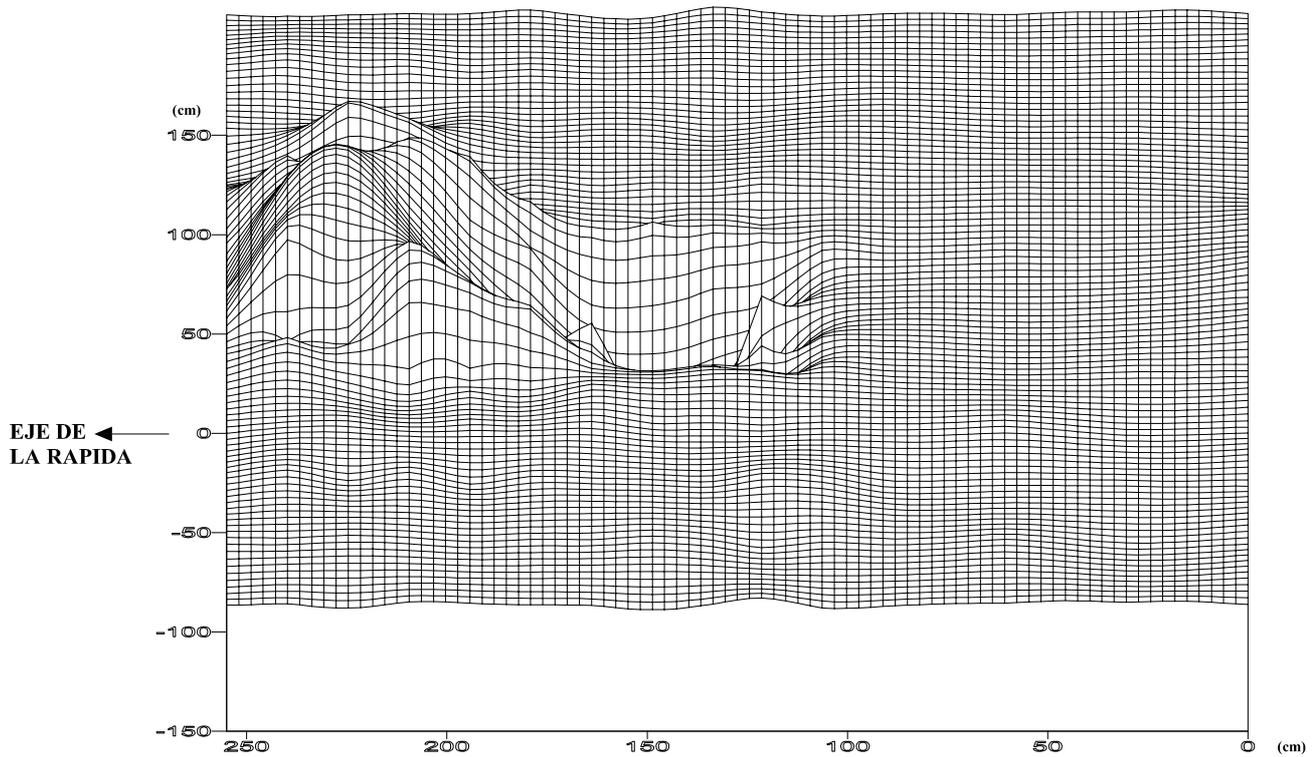
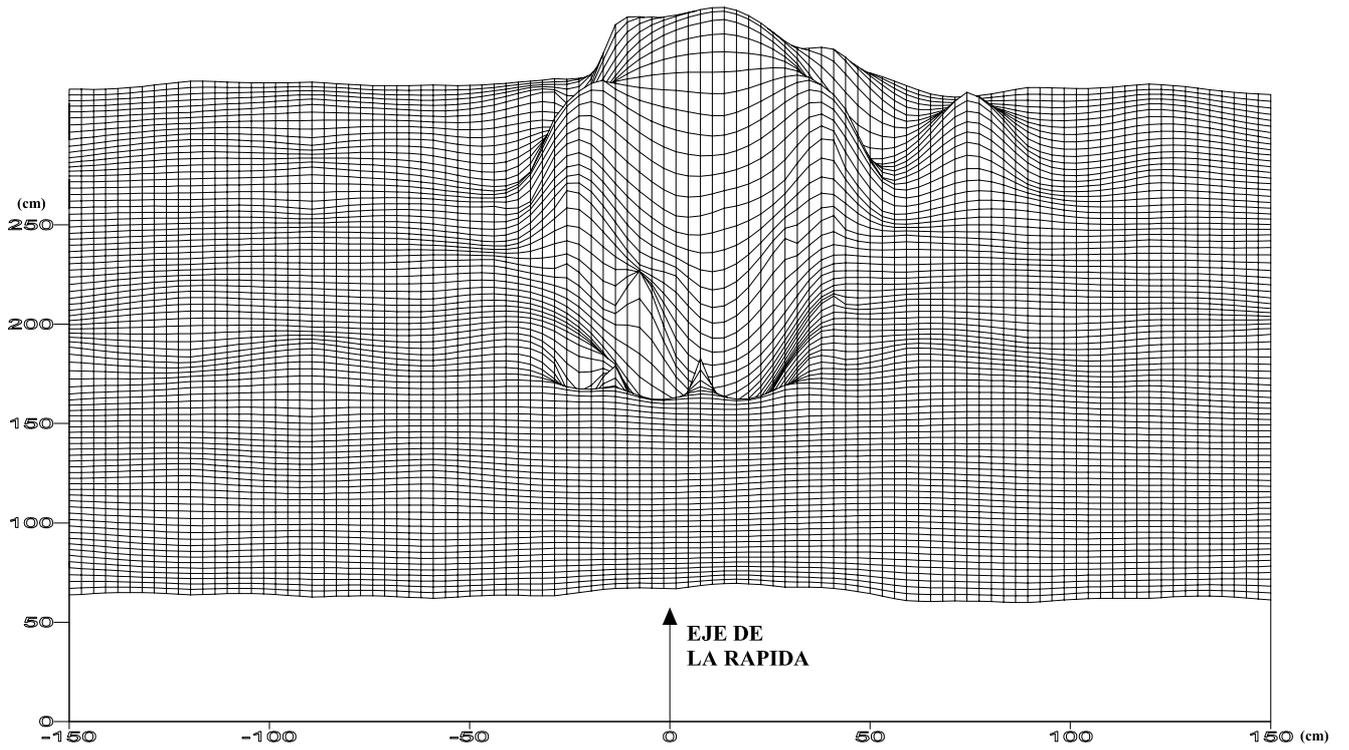
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

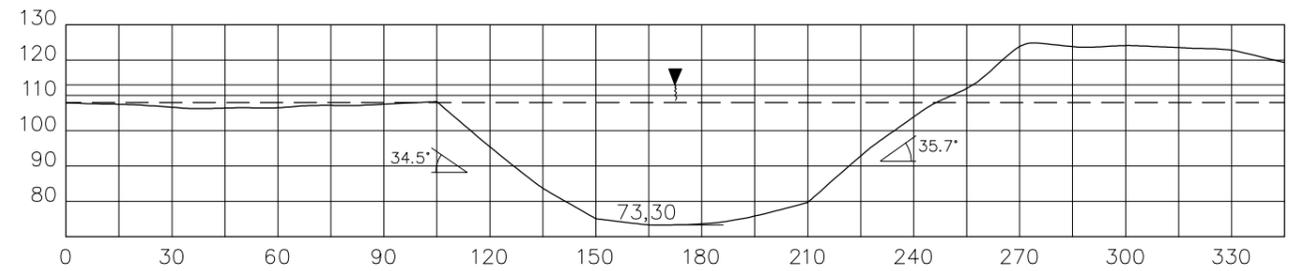
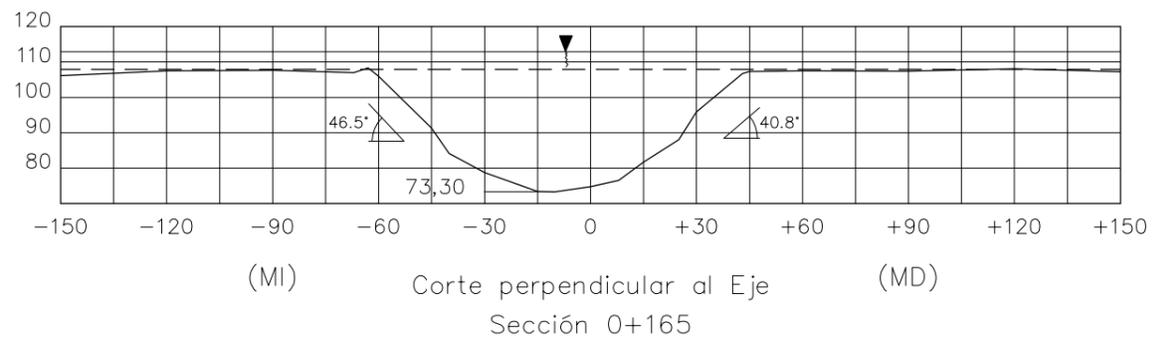
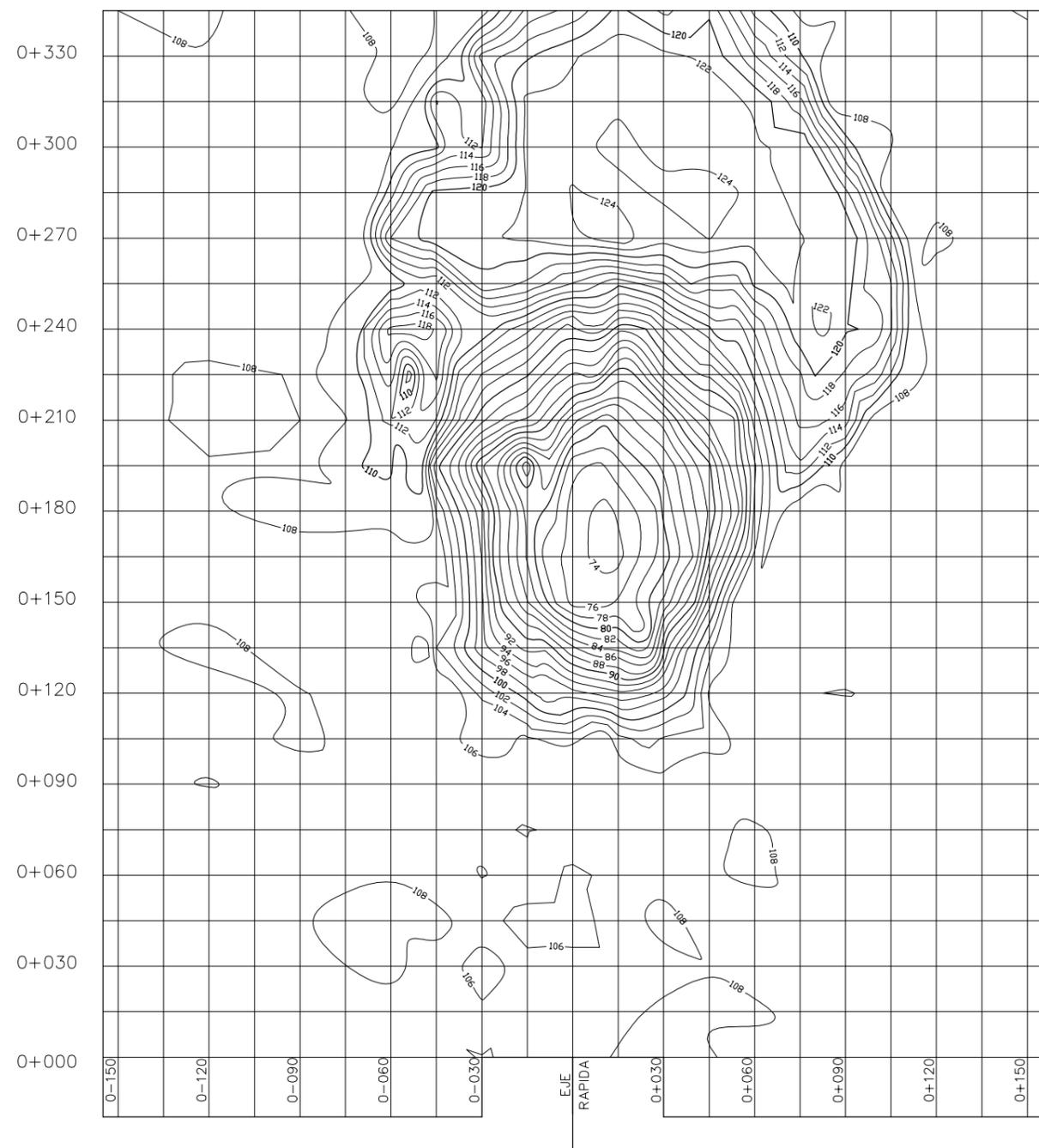
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 8
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.25 \text{ m}$ $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	14-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-15-A



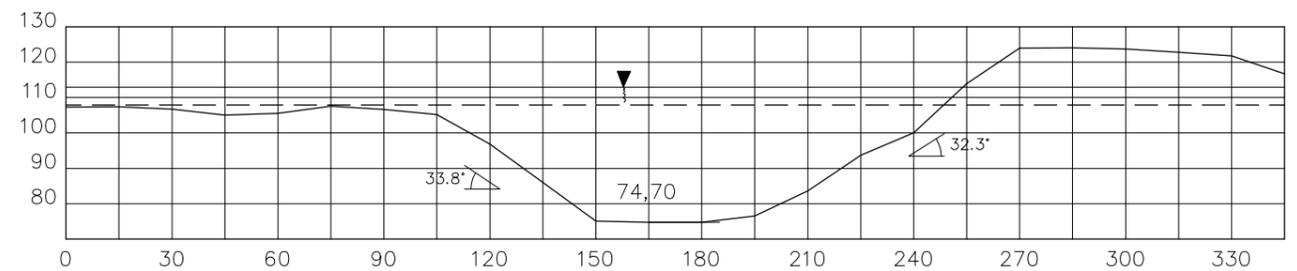
NOTA

Profundidad de erosión (h_s) = 0.162 m

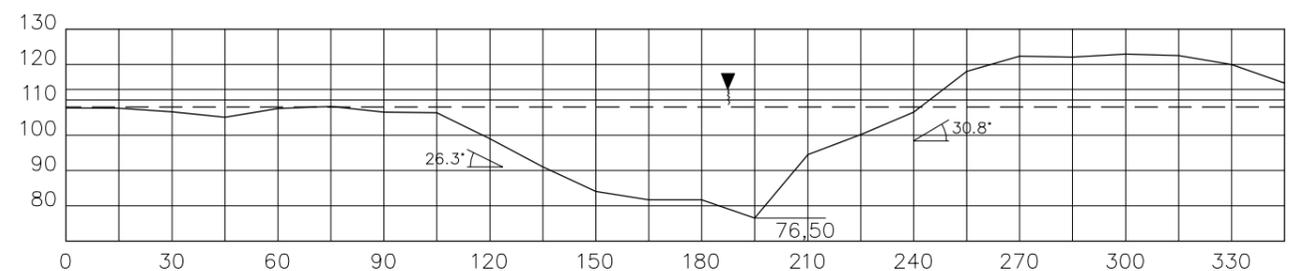
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION			
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI			
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 8	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujóCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.25 \text{ m}$	$d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	14-05-03	Escala:	INDICADA
			Lámina N° G-15-B



Corte paralelo al Eje
Sección 0+010



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

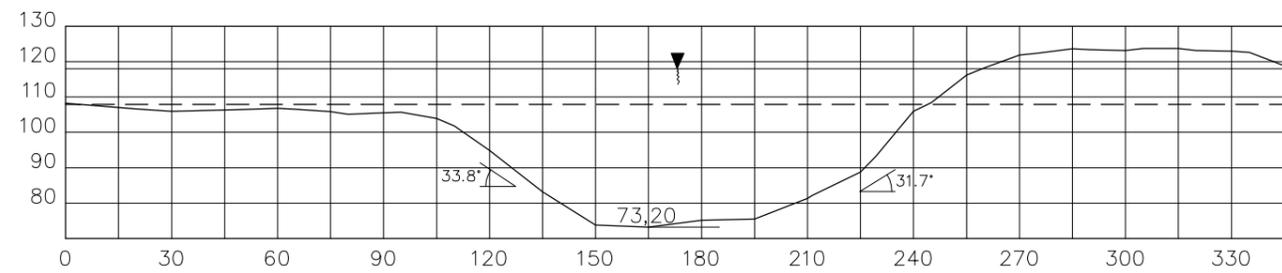
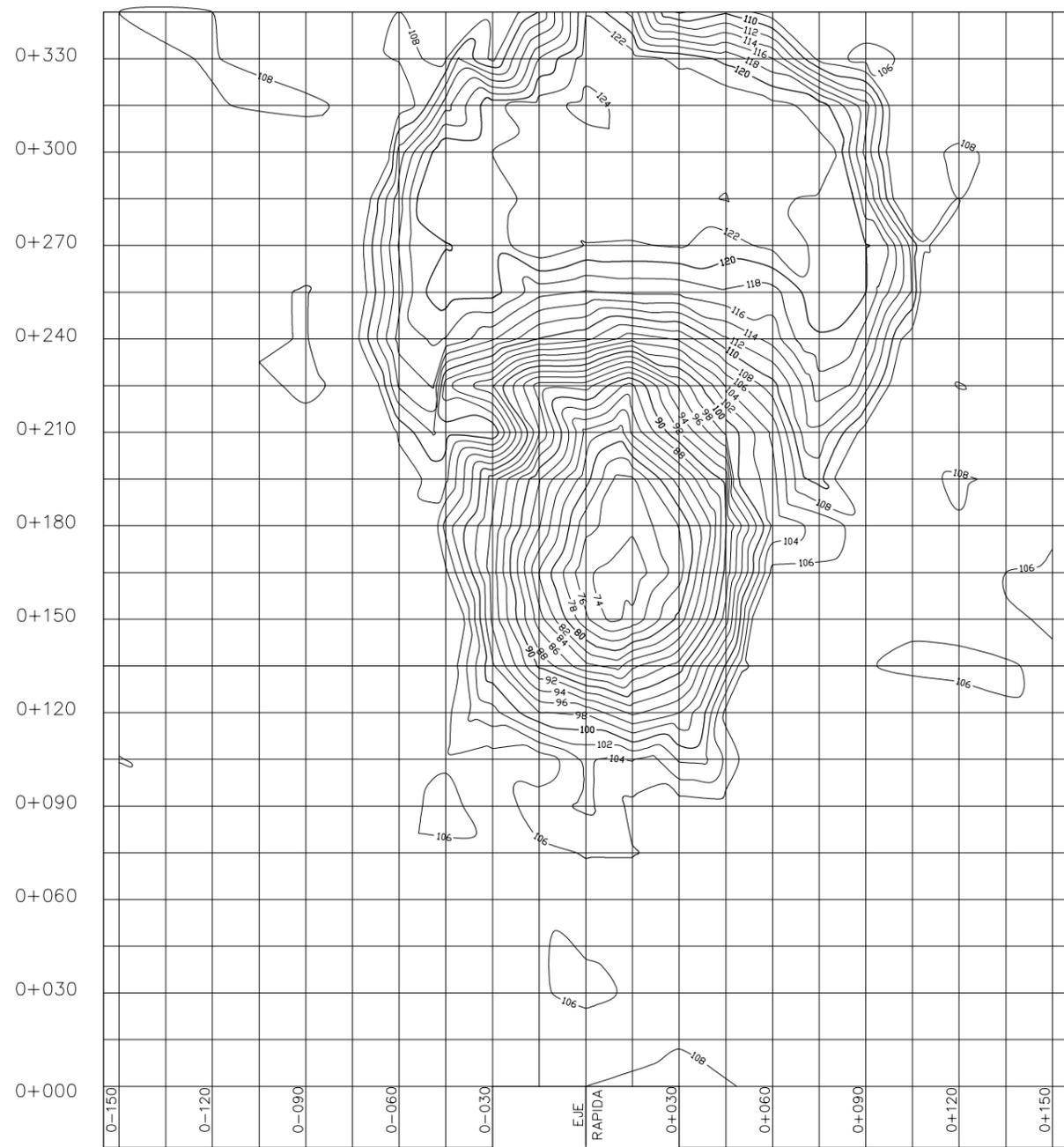
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

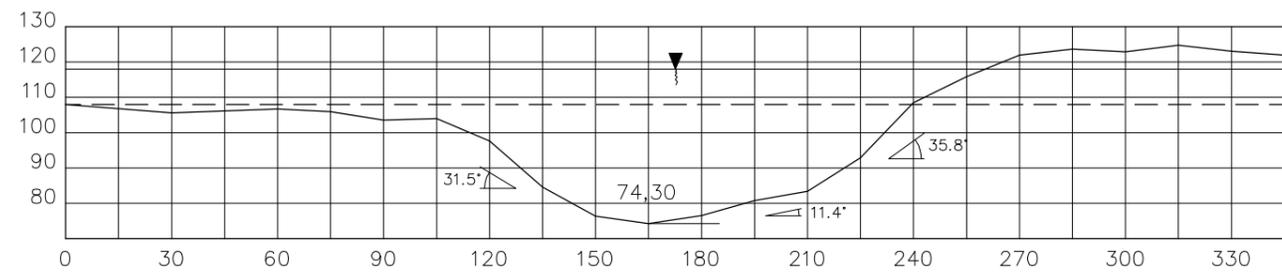
LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

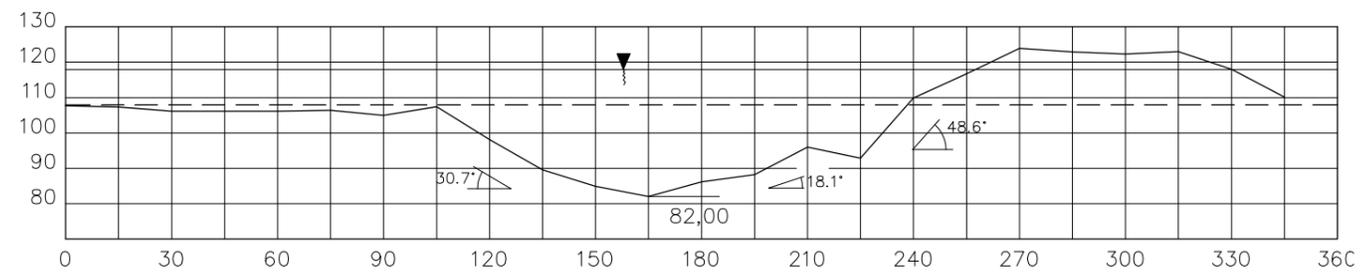
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 9
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.05 \text{ m}$ $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	15-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-16



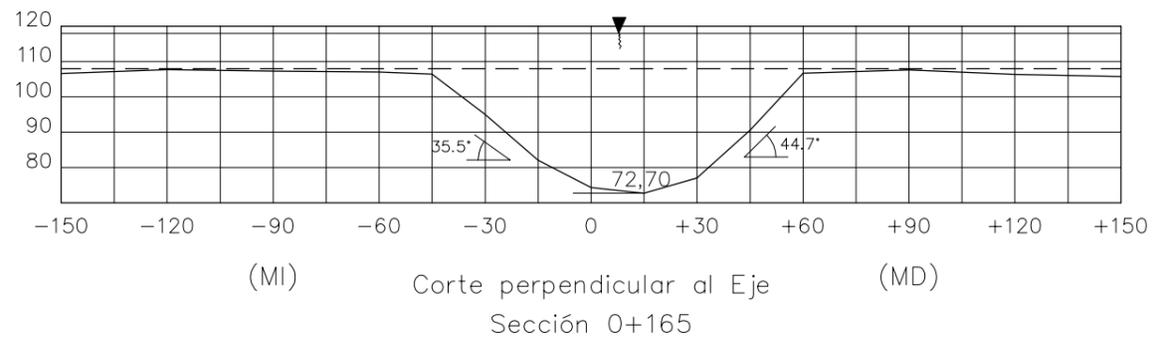
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



Corte perpendicular al Eje
Sección 0+165

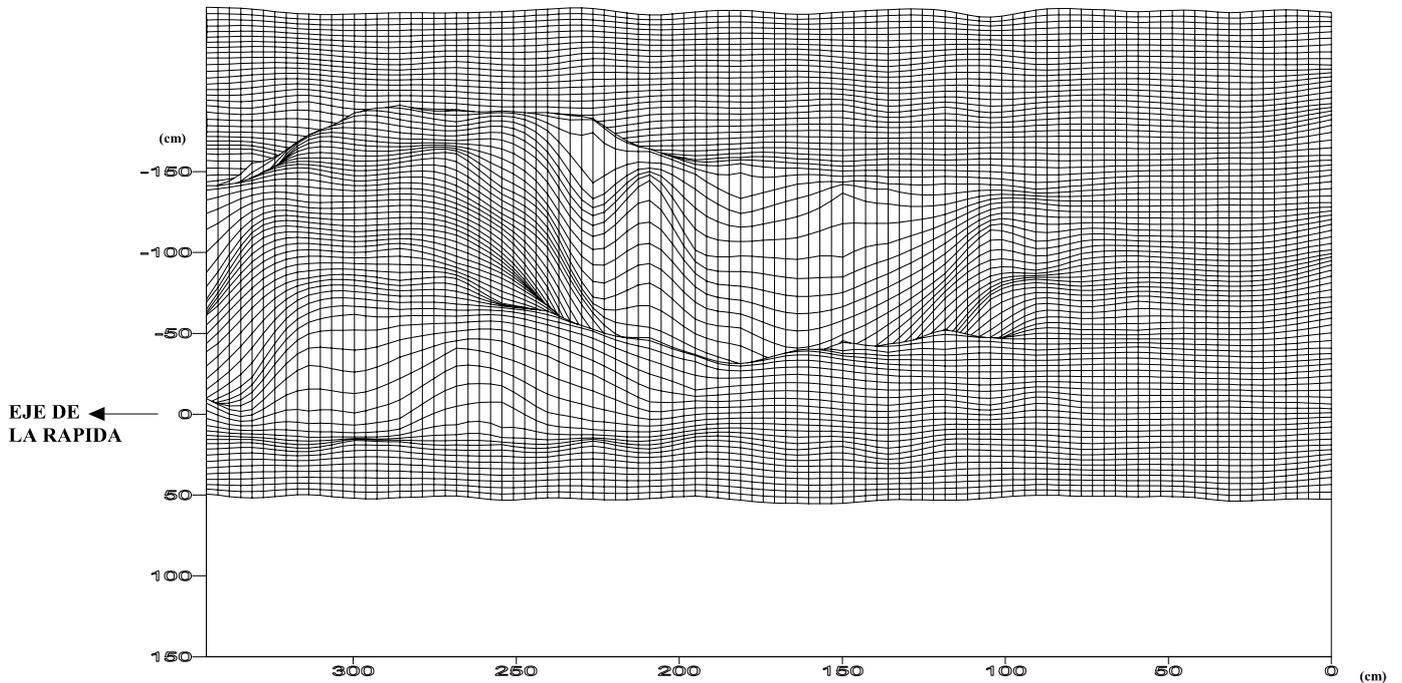
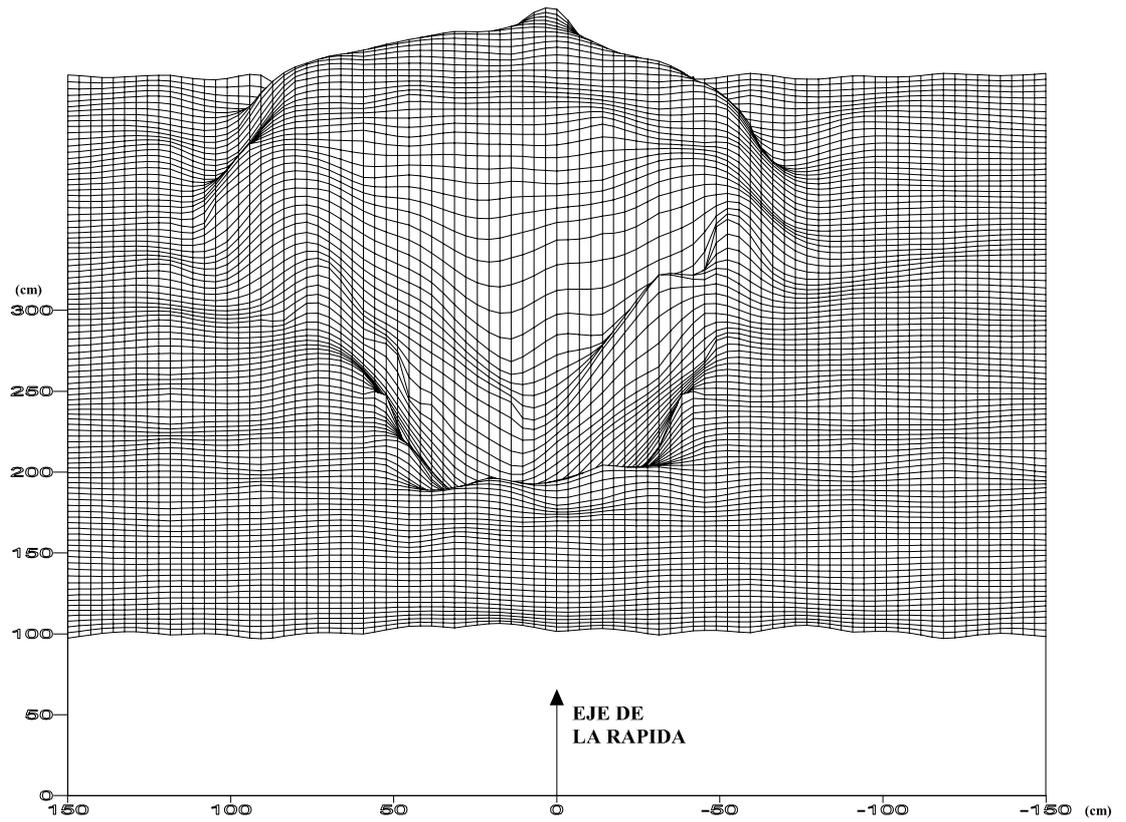
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

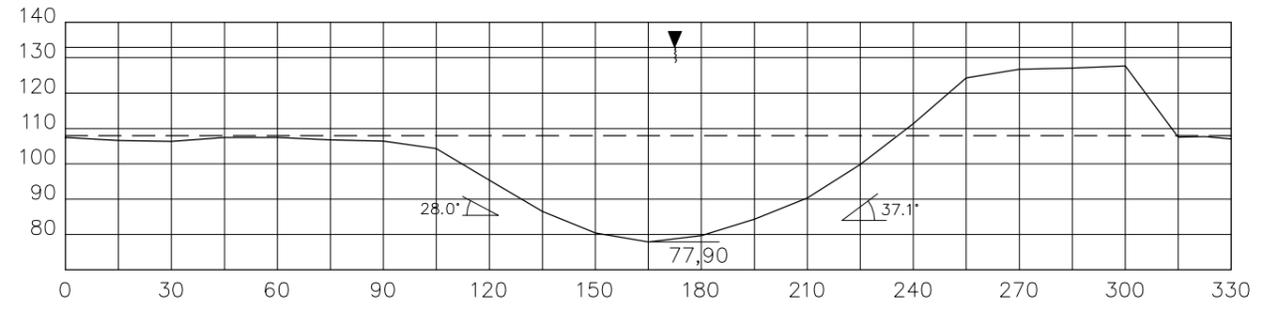
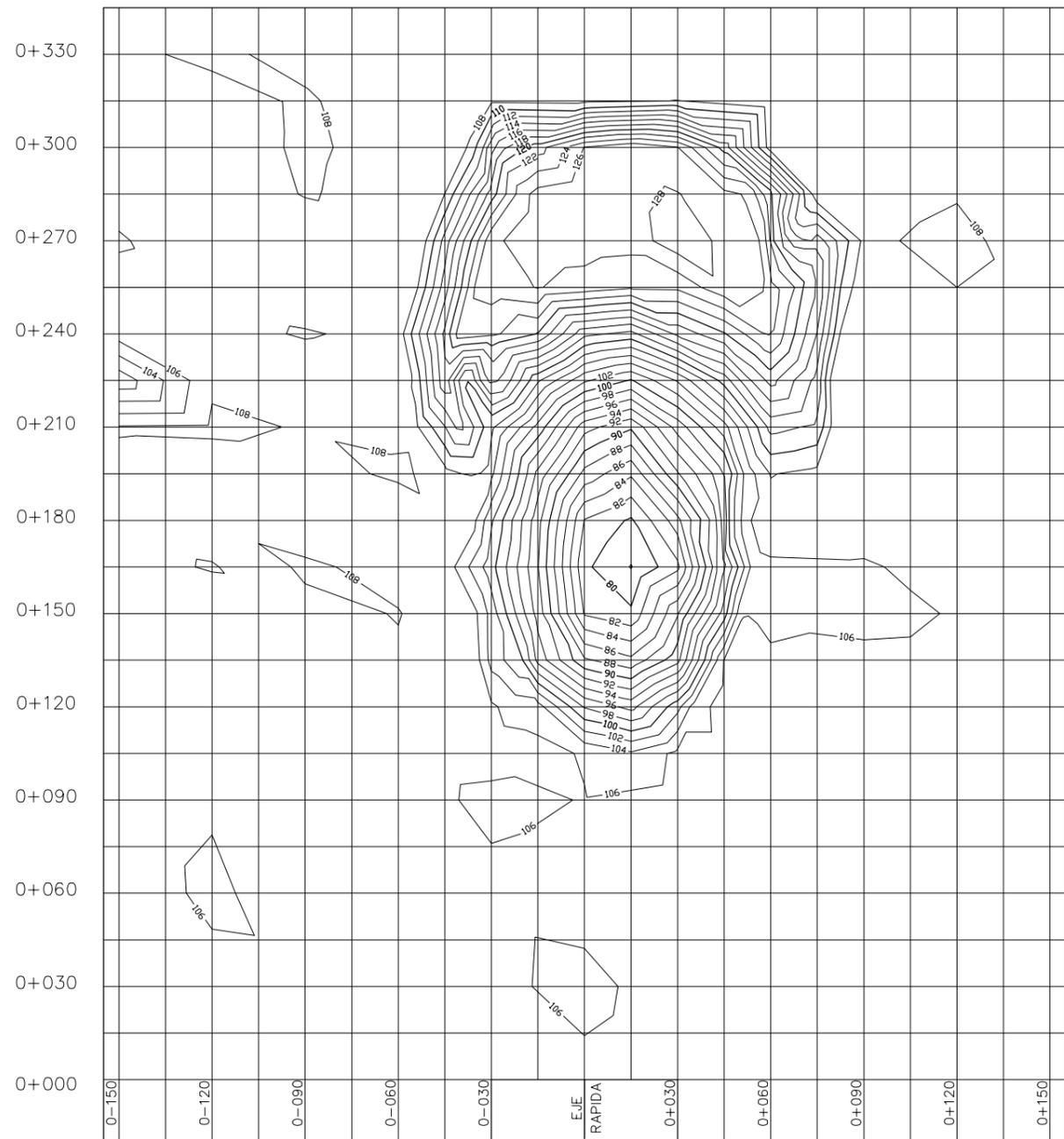
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 10
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.06 m ³ /s d ₅₀ = 17.88 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.10 m d ₈₅ = 23.43 mm
Fecha:	16-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-17-A



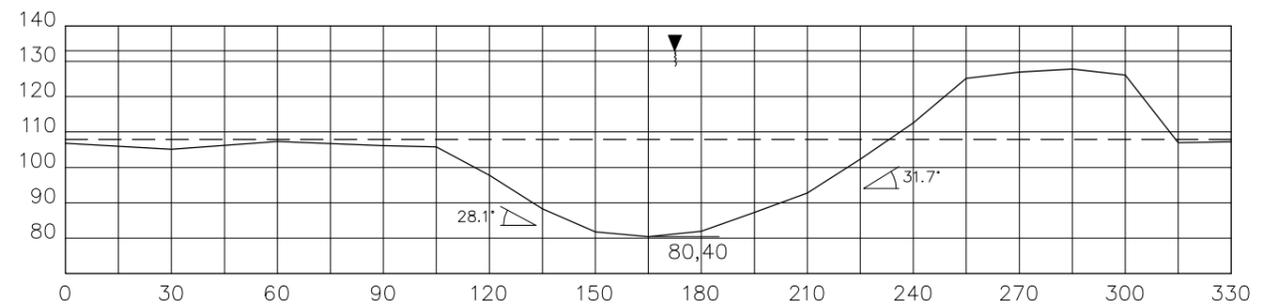
NOTA

Profundidad de erosión (h_s) = 0.352 m

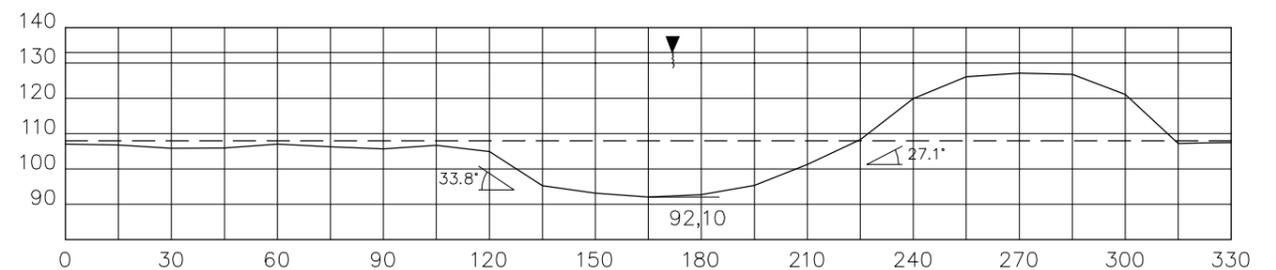
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 10
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$ $d_{85} = 23.43 \text{ mm}$
Fecha:	16-05-03	Escala: INDICADA Lámina N° G-17-B



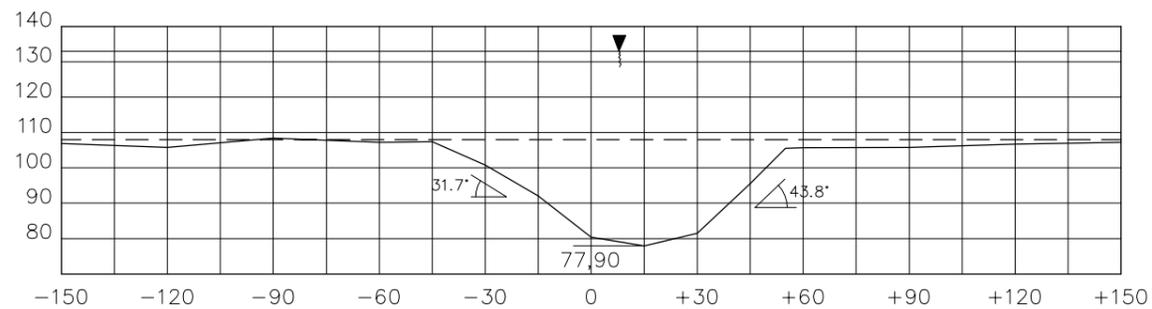
Corte paralelo al Eje
Sección 0+015



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



(MI) Corte perpendicular al Eje (MD)
Sección 0+165

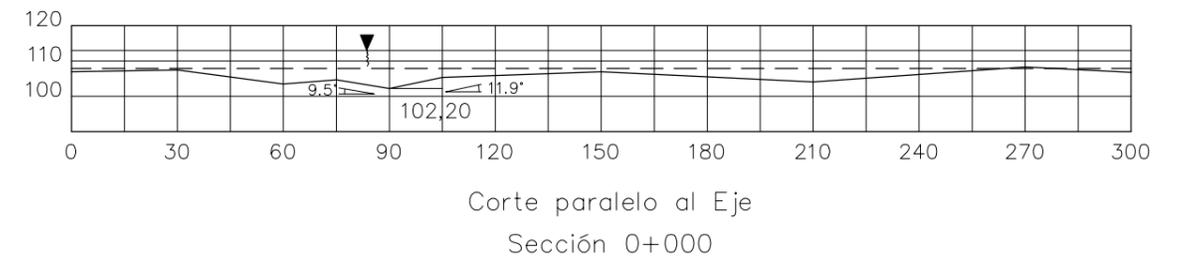
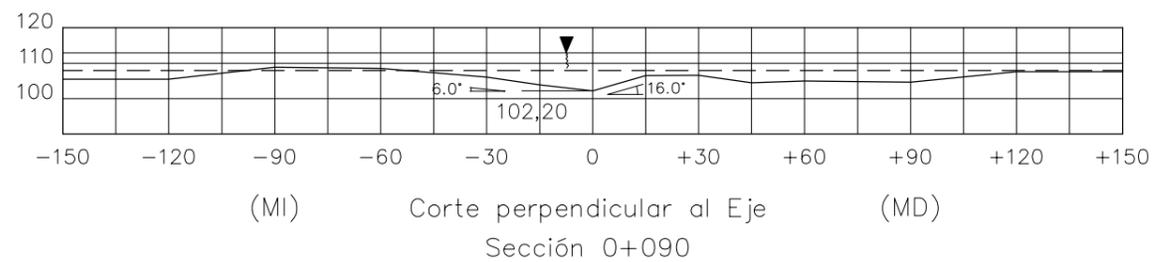
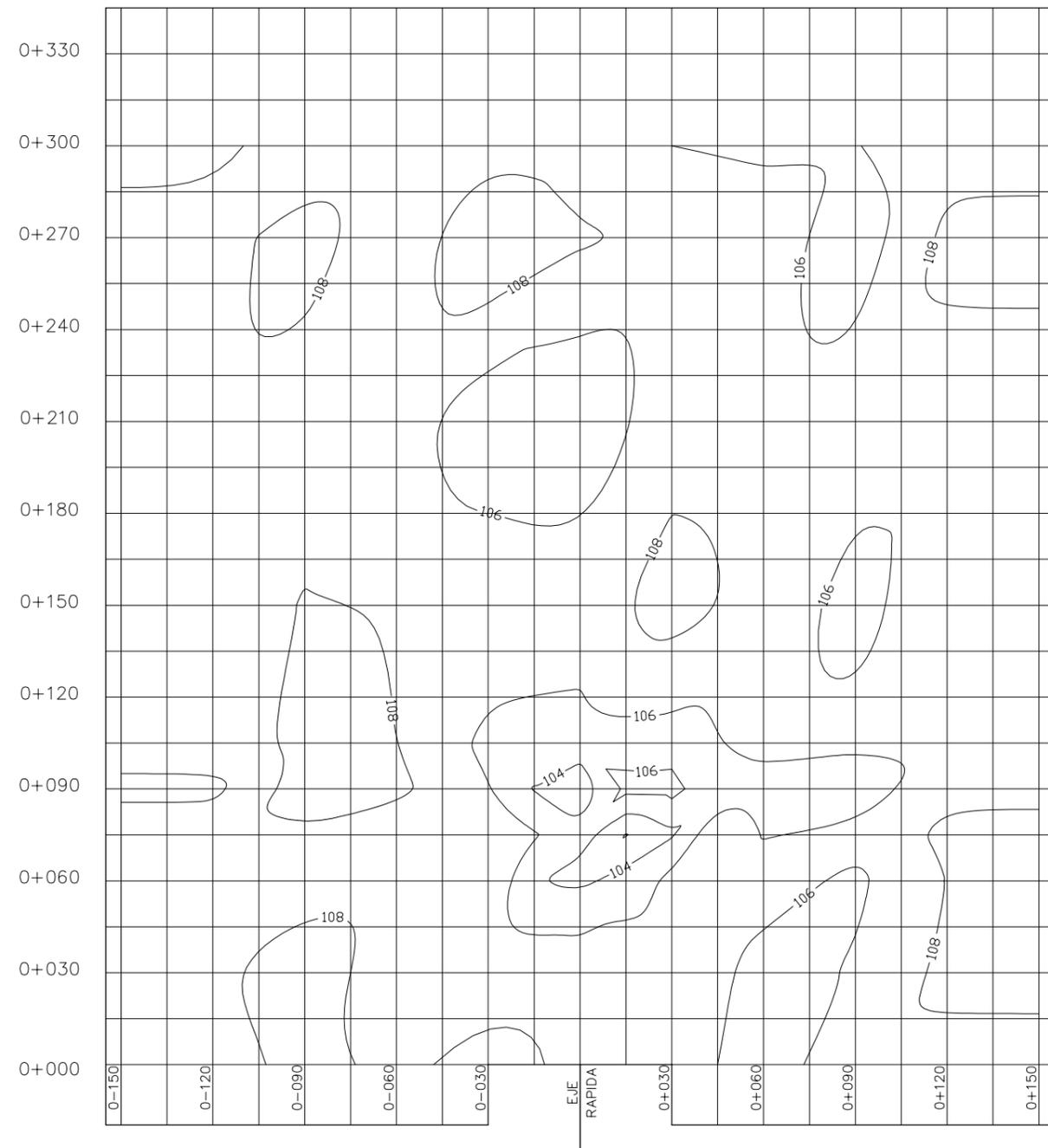
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE II : PRUEBA N° 11
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.06 m ³ /s d ₅₀ = 17.88 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{CA} = 0.25 m d ₈₅ = 23.43 mm
Fecha:	19-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-18



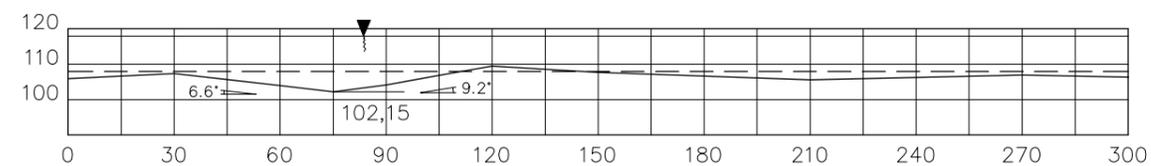
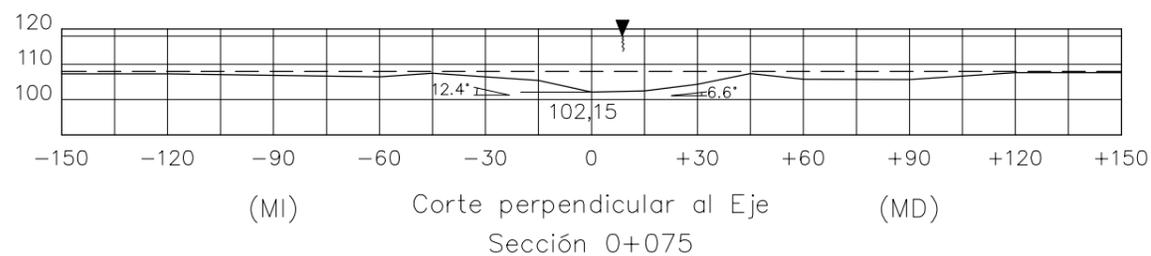
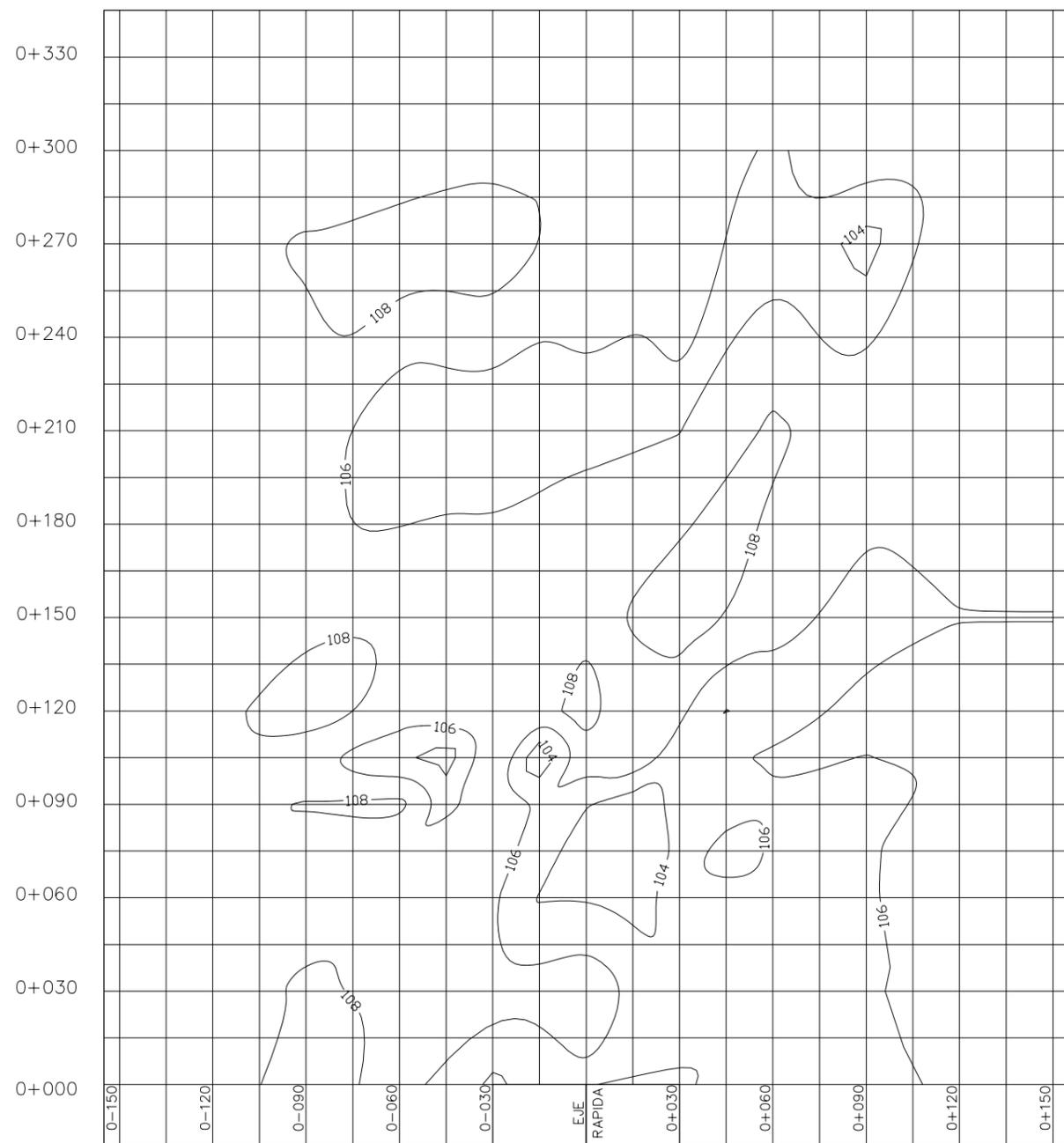
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 1
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.02 m ³ /s d ₅₀ = 49.08 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.05 m d ₈₅ = 70.53 mm
Fecha:	21-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-19



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000

Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

—	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

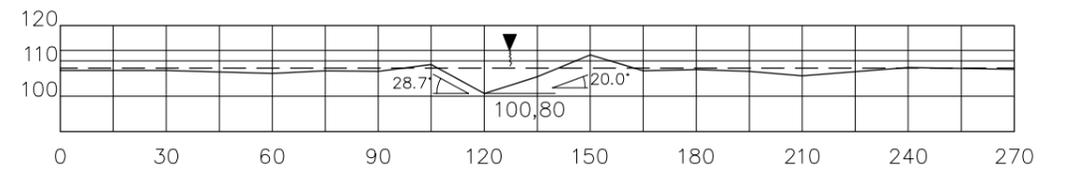
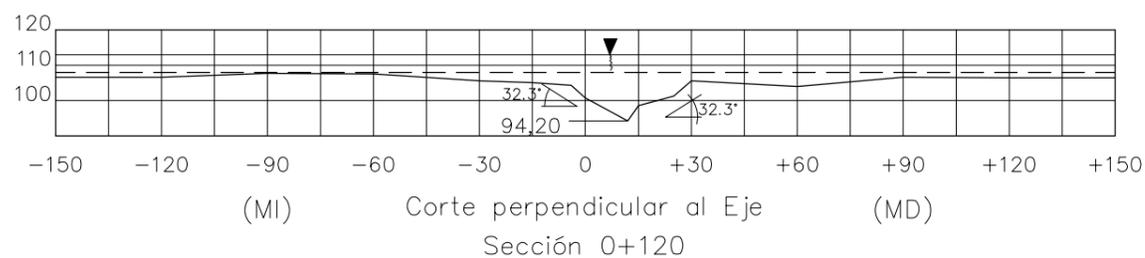
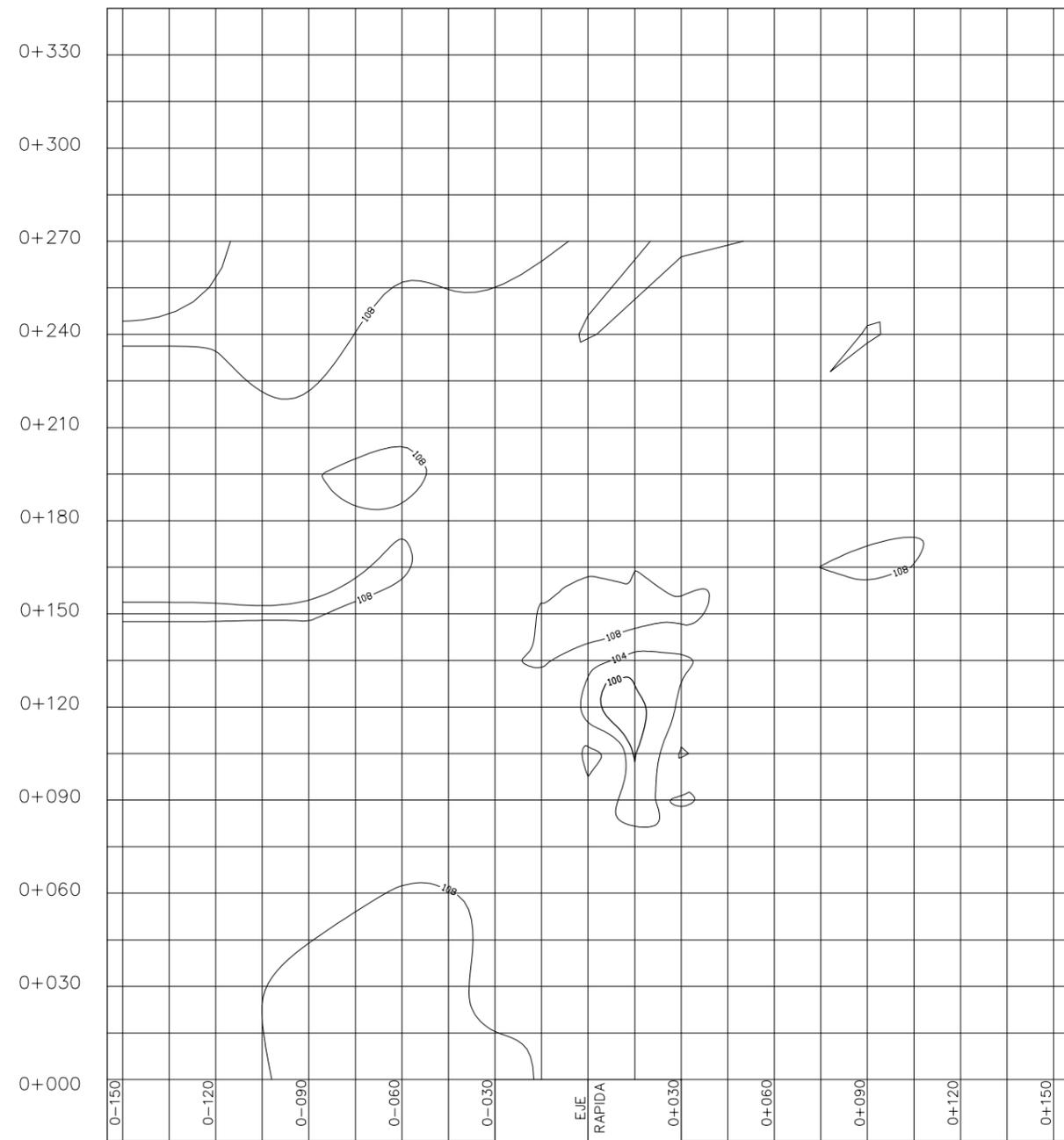


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

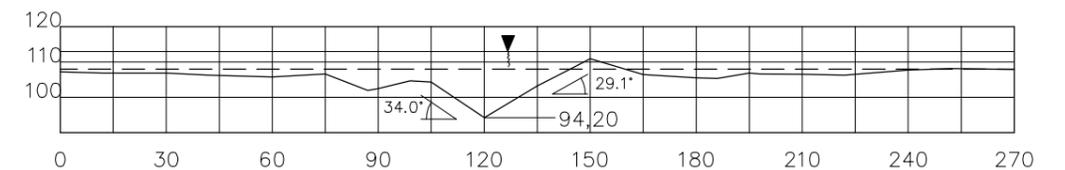
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 2	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 49.08 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$	$d_{85} = 70.53 \text{ mm}$
Fecha:	21-05-03	Escala:	1:20
			Lámina N° G-20



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0+012

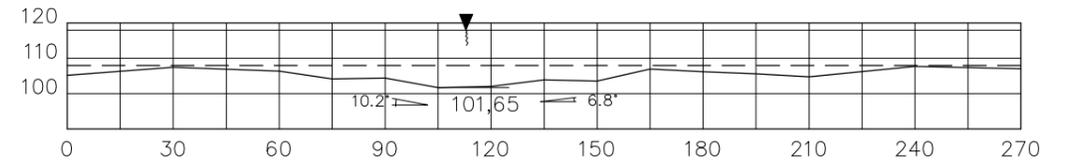
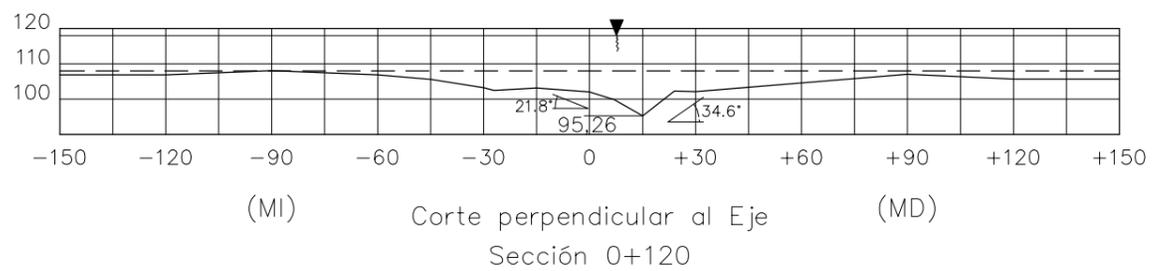
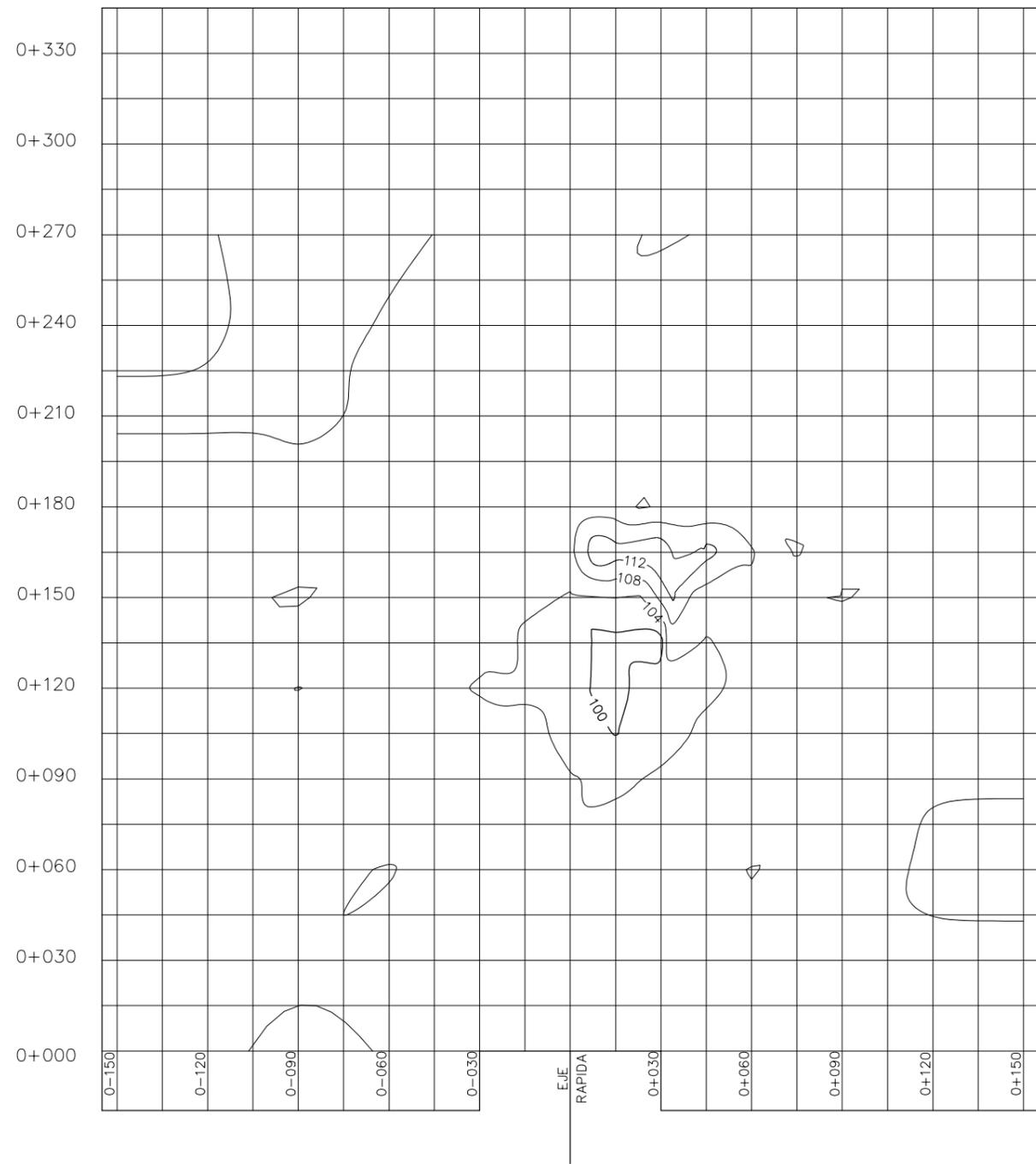
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

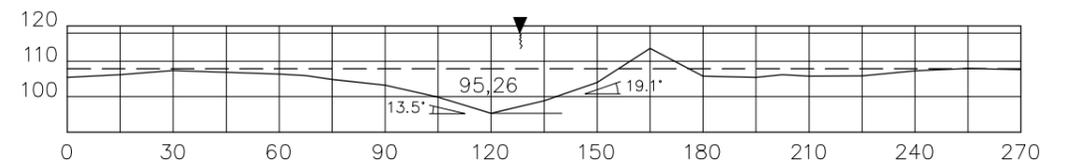
LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 6
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.05 \text{ m}$ $d_{as} = 70.53 \text{ mm}$
Fecha:	26-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-21



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0+015

Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

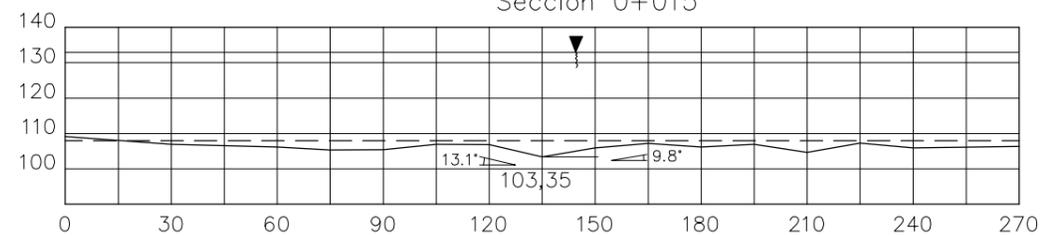
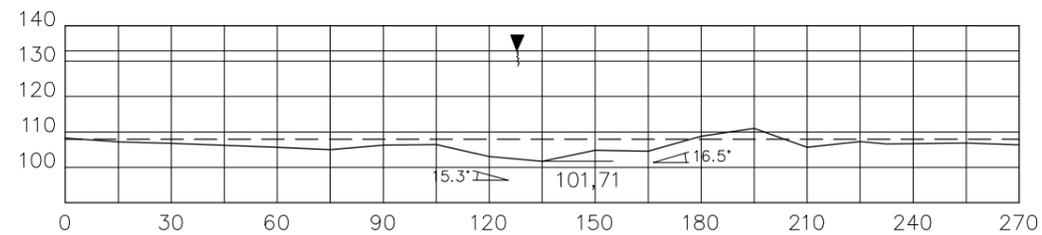
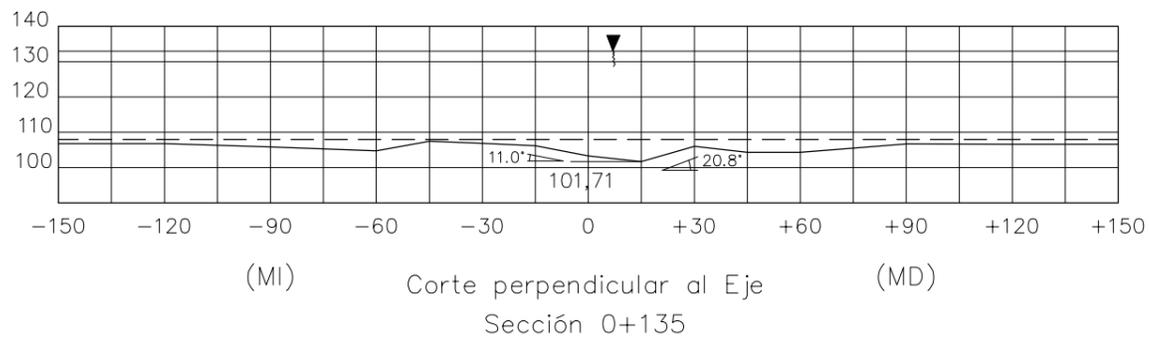
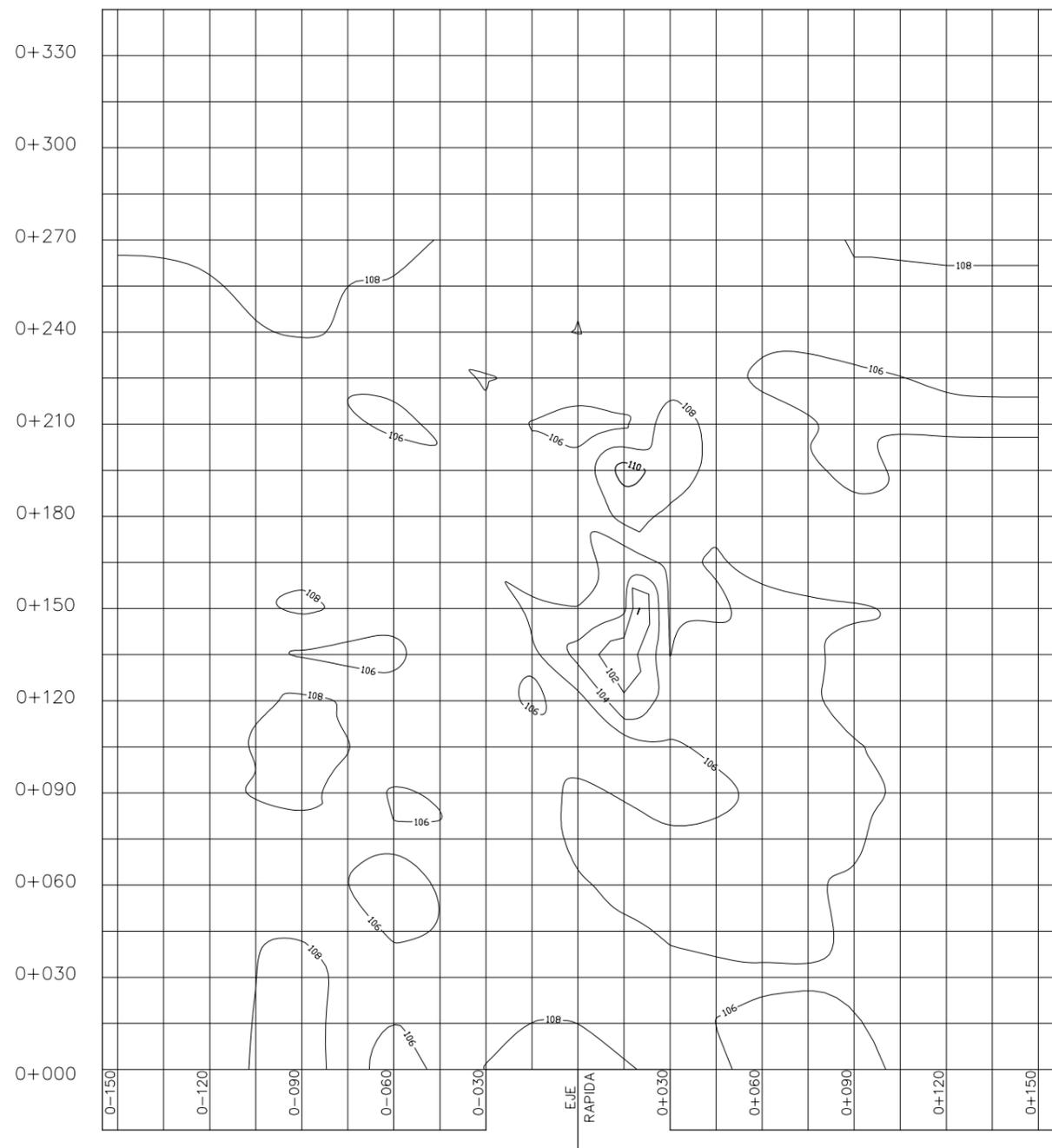
—	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION

EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO
AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA
DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI

Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 7	
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$	$d_{50} = 49.08 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$	$d_{as} = 70.53 \text{ mm}$
Fecha:	26-05-03	Escala:	1:20
		Lámina N°	G-22



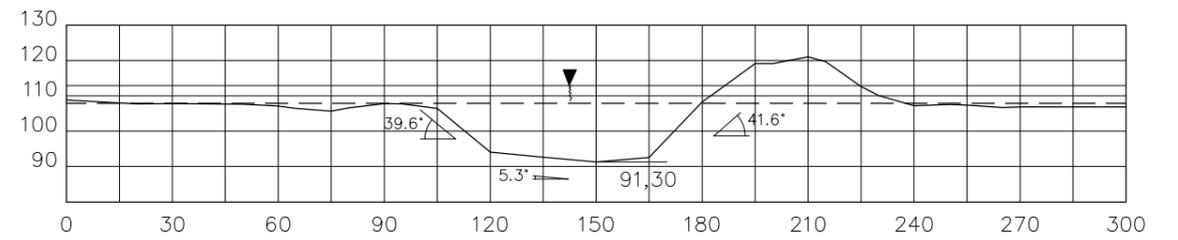
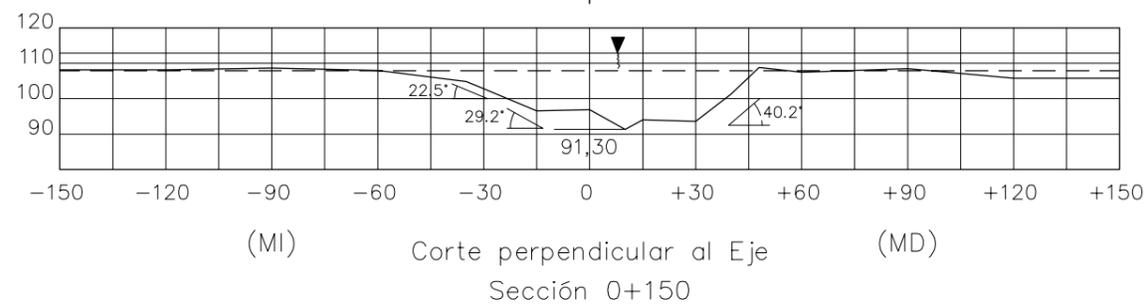
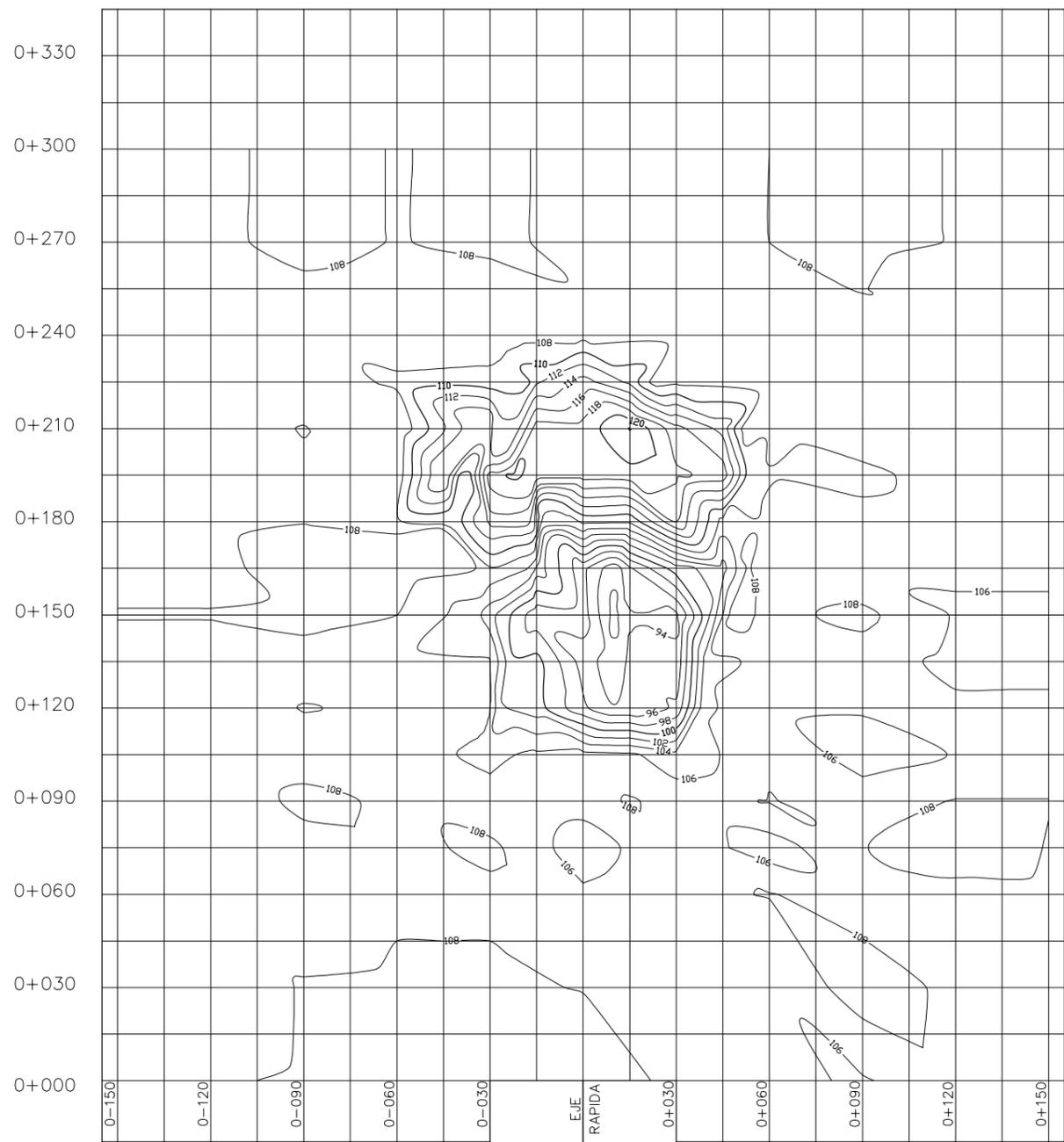
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

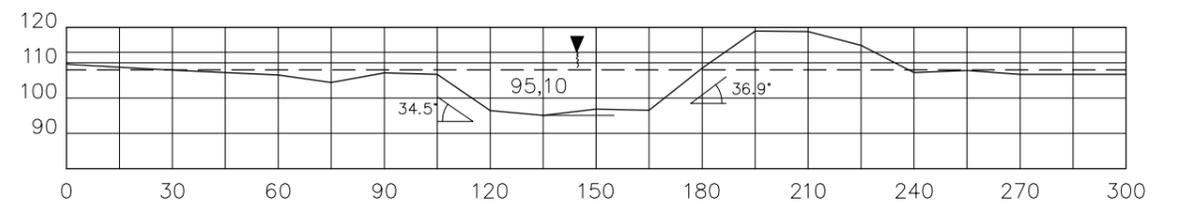
LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

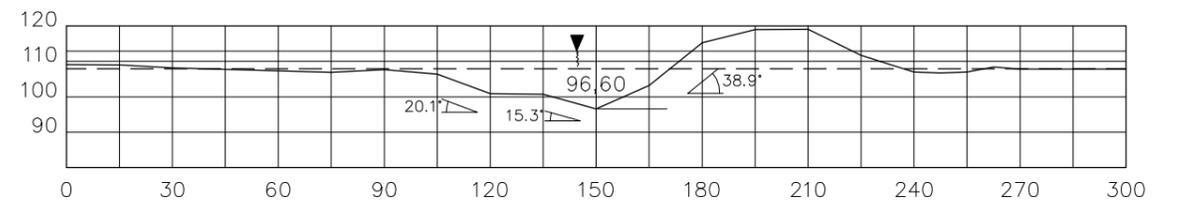
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 8 $Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$ $h_{ca} = 0.25 \text{ m}$ $d_{85} = 70.53 \text{ mm}$
Investigador:	Ing. E. Minaya	
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	
Fecha:	27-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-23



Corte paralelo al Eje
Sección 0+010



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015

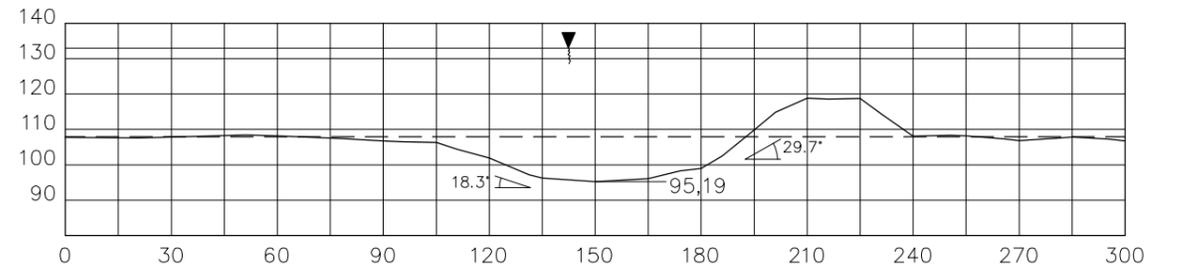
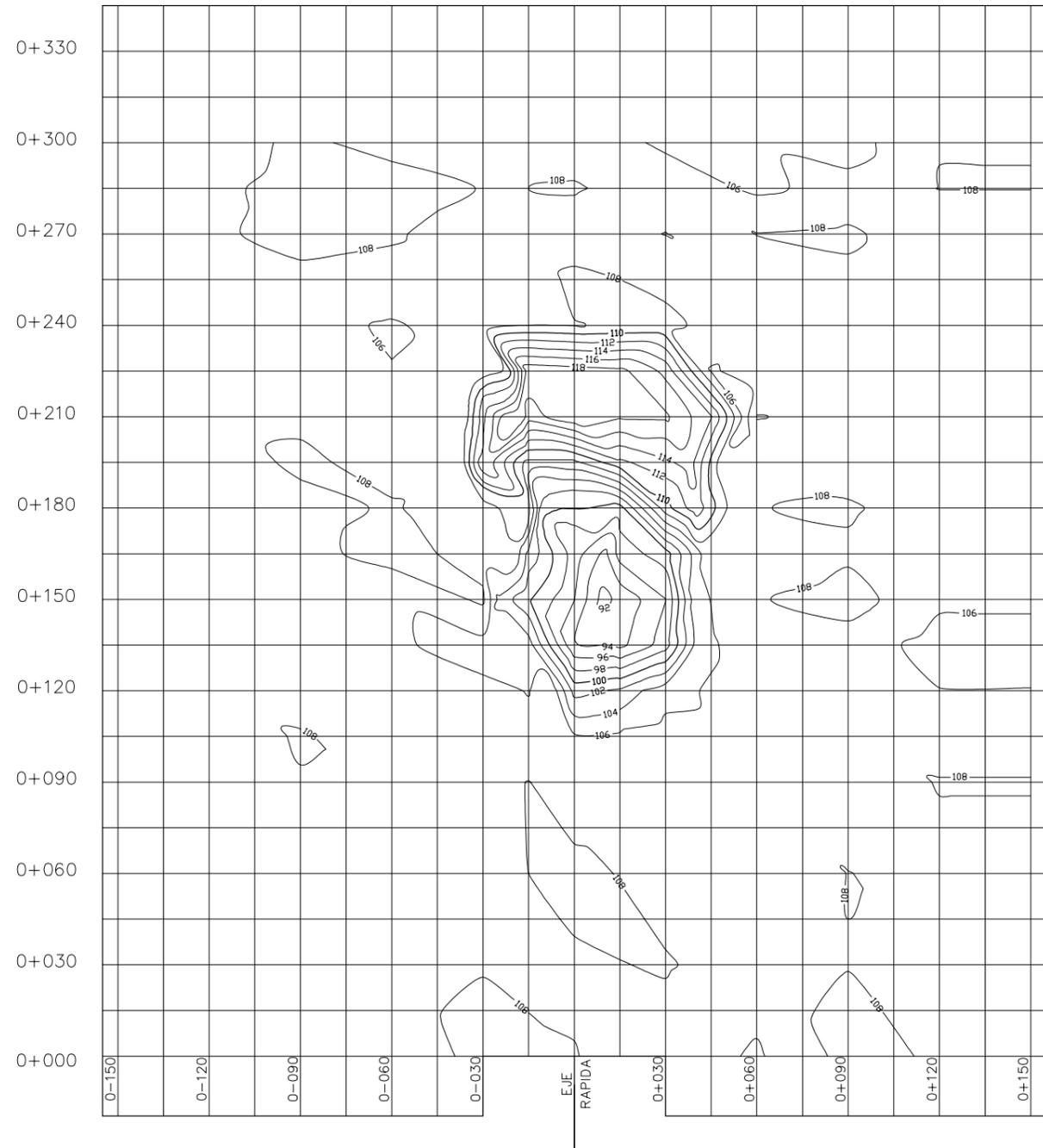
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

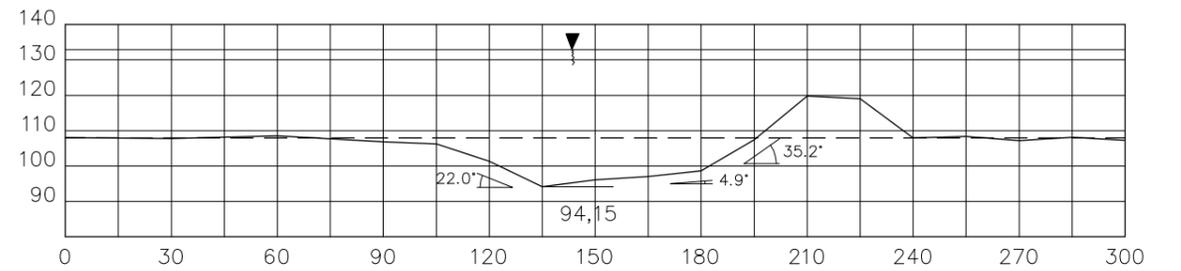
LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

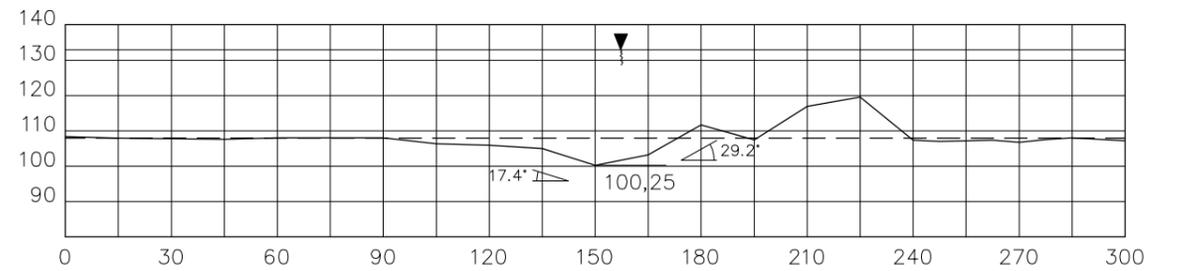
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 9
Investigador:	Ing. E. Minaya	Q = 0.06 m ³ /s d ₅₀ = 49.08 mm
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	h _{ca} = 0.05 m d ₈₅ = 70.53 mm
Fecha:	28-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-24



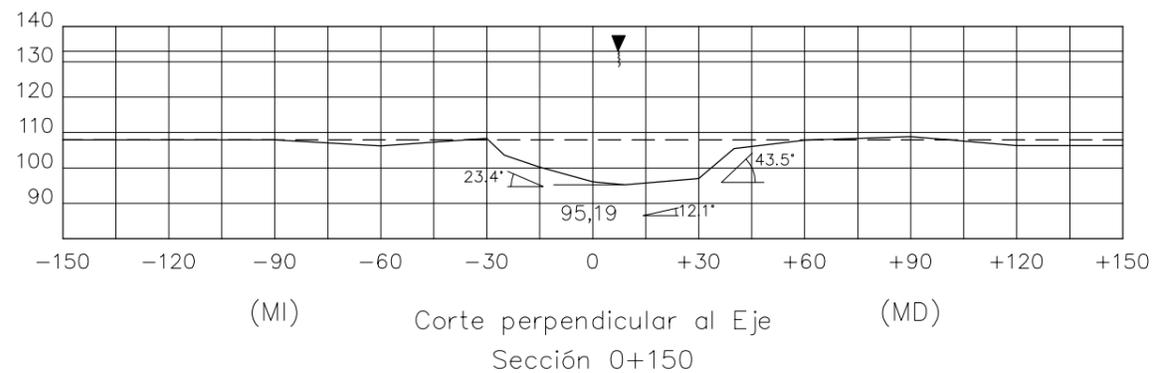
Corte paralelo al Eje
Sección 0+009



Corte paralelo al Eje
Sección 0+000



Corte paralelo al Eje
Sección 0-015



Corte perpendicular al Eje
Sección 0+150

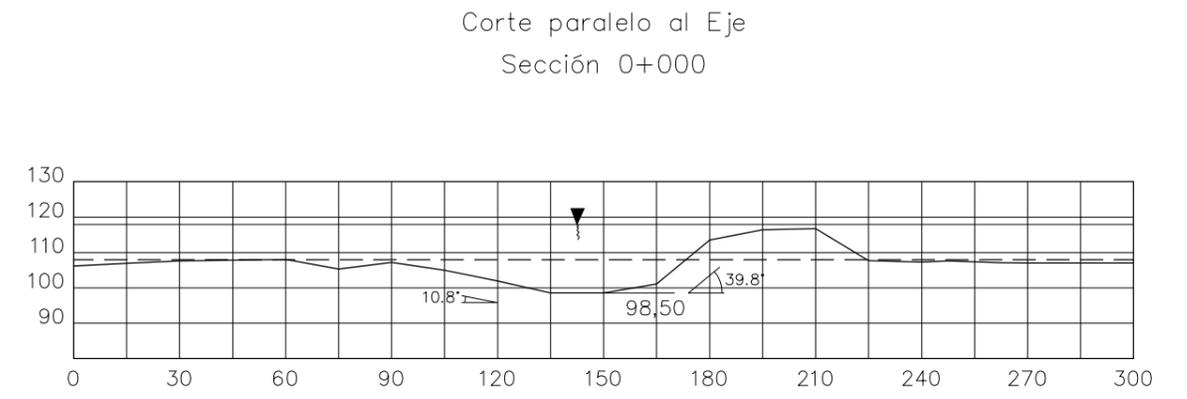
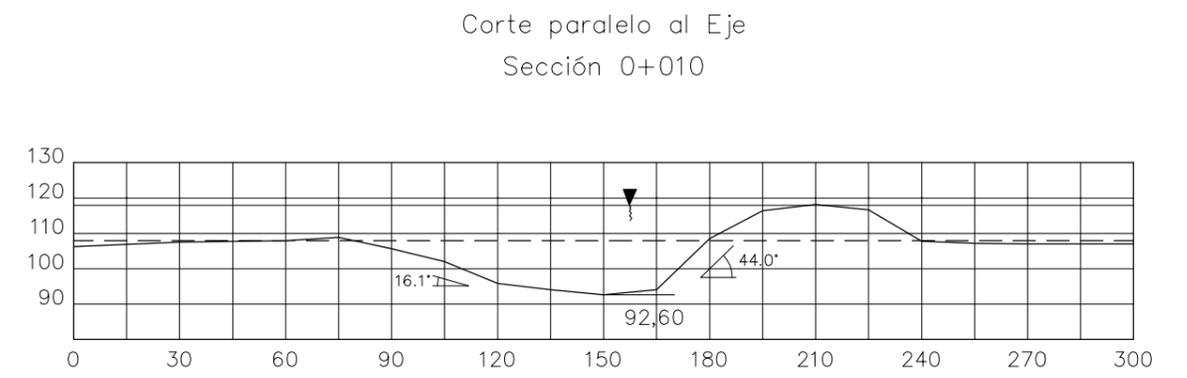
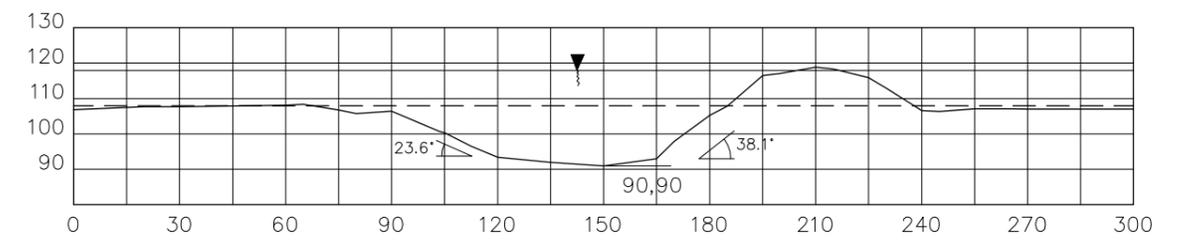
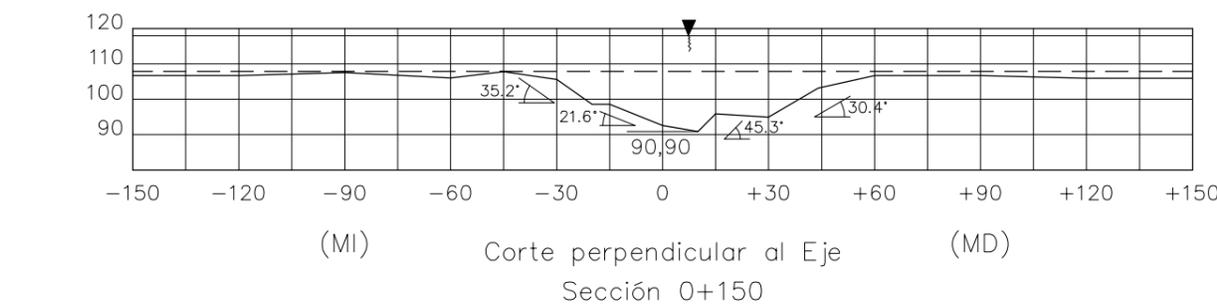
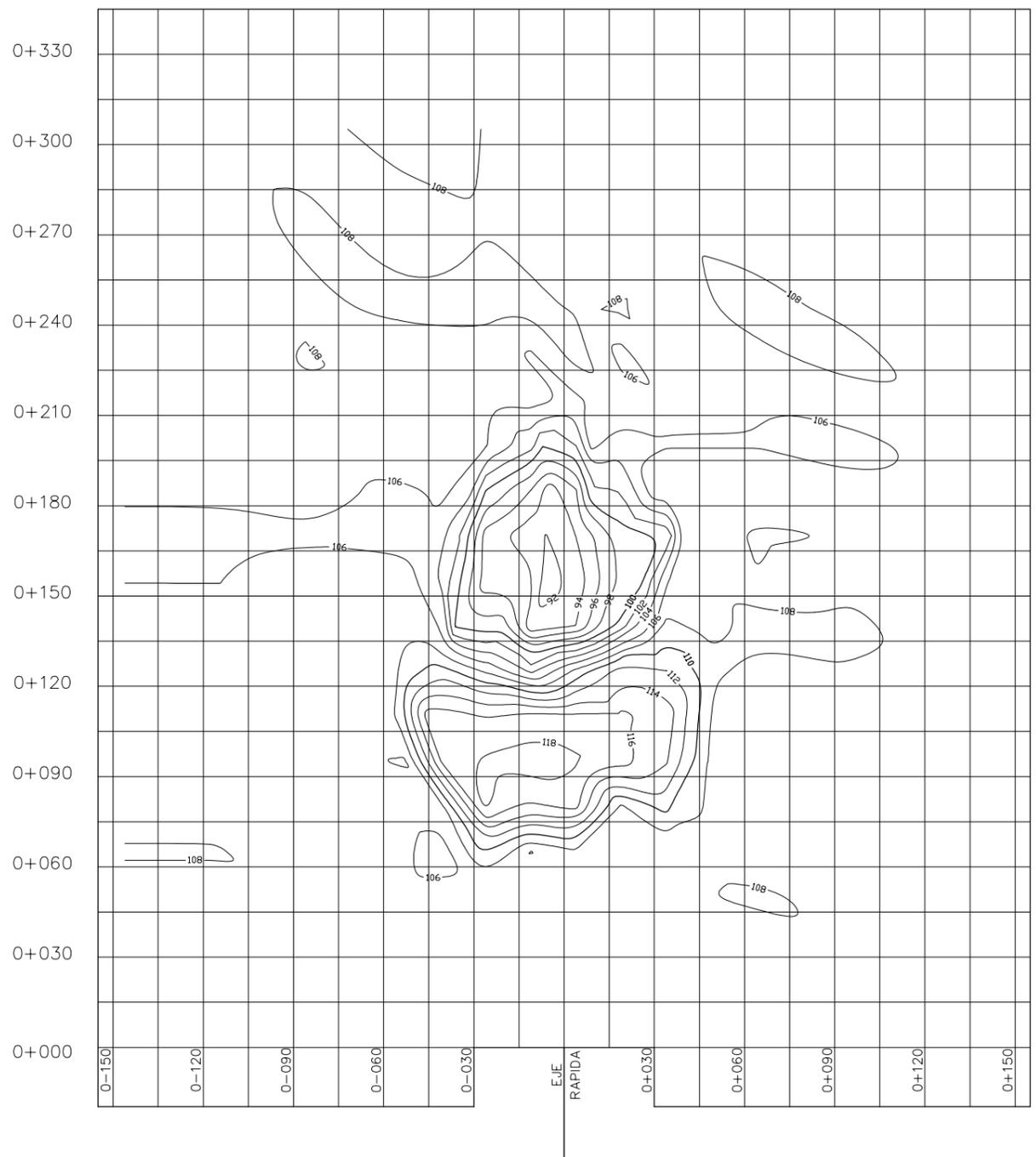
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 11
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.25 \text{ m}$ $d_{as} = 70.53 \text{ mm}$
Fecha:	30-05-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-25



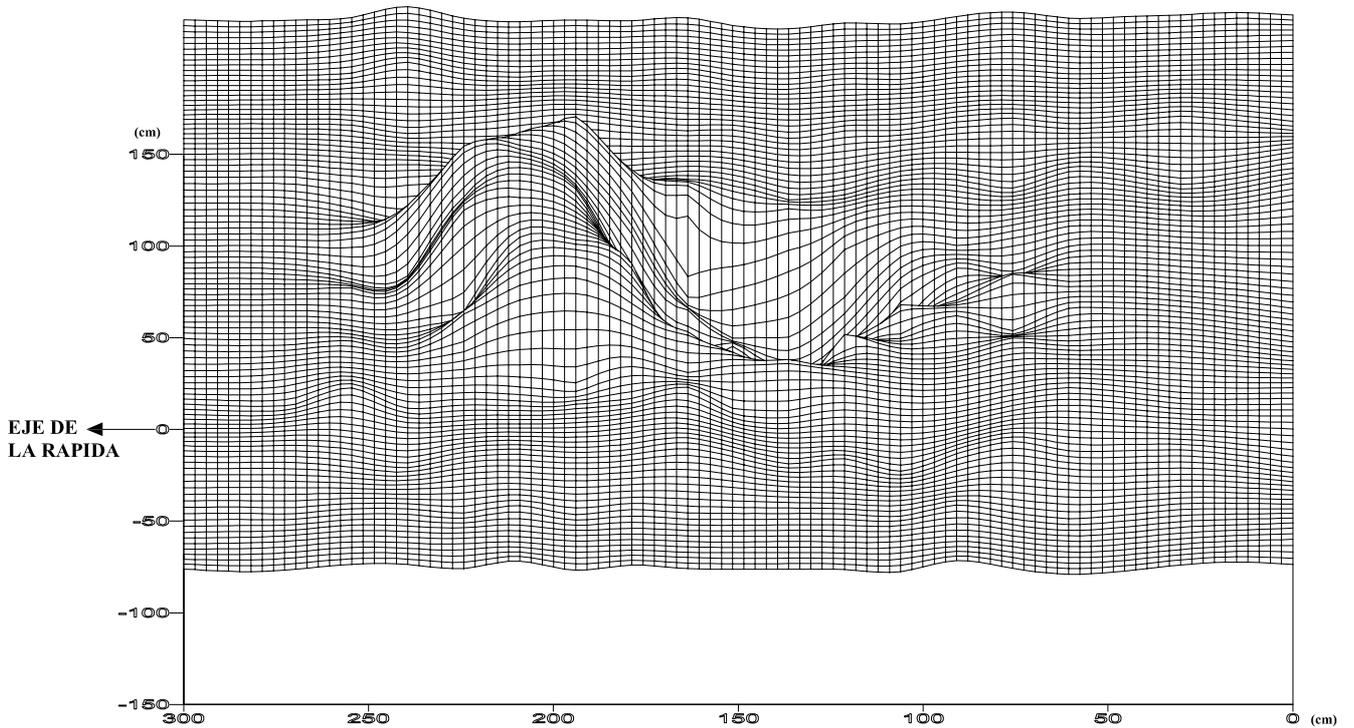
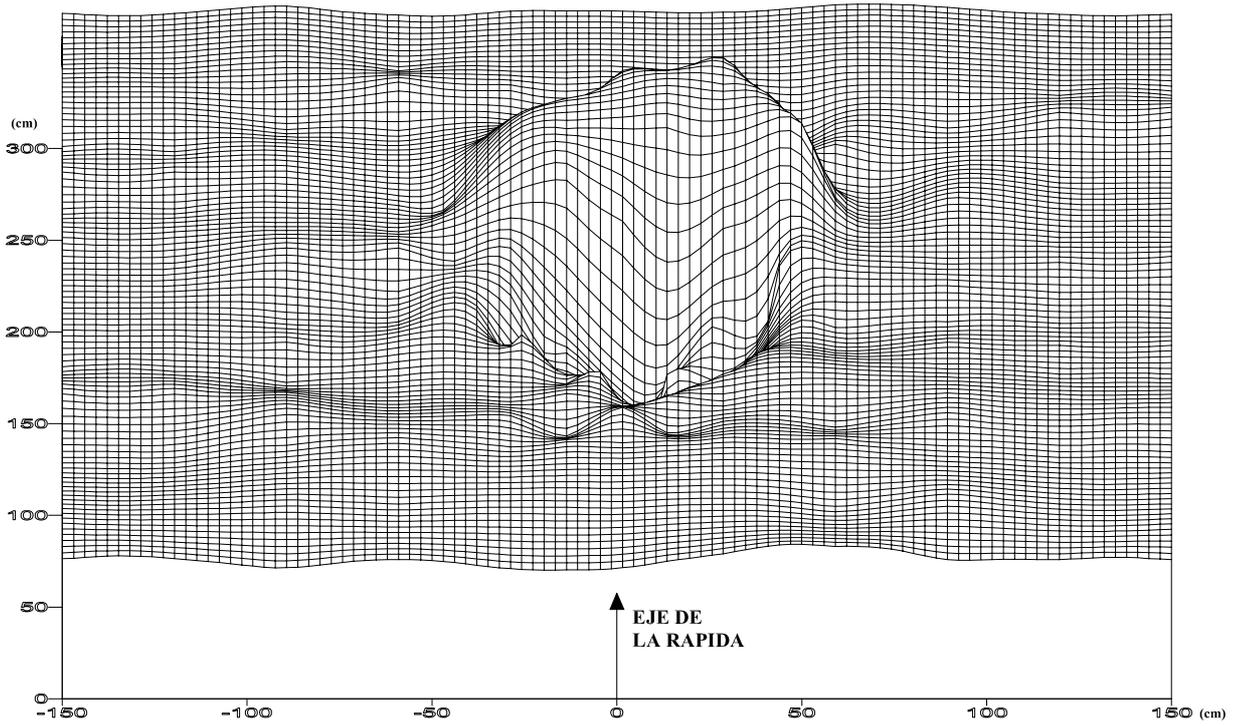
Nota:

La dimensiones y cotas están dadas en centímetros.

LEYENDA:

---	Condición Inicial (altura del estrato = 107.94 cm)
—	Condición Final
MD	Margen Derecha
MI	Margen Izquierda

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 12
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$ $d_{as} = 70.53 \text{ mm}$
Fecha:	02-06-03	Escala: 1:20 Lámina N° G-26-A



NOTA

Profundidad de erosión (h_s) = 0.171 m

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
SECCION DE POSTGRADO-TESIS DE INVESTIGACION		
EROSION EN LECHO NO COHESIVO DEBIDO AL IMPACTO DE UN CHORRO A LA SALIDA DE UN VERTEDERO CON SALTO DE SKI		
Asesor:	Dr. J. Kuroiwa	FASE III : PRUEBA N° 12
Investigador:	Ing. E. Minaya	$Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$
DibujoCAD:	B.C.-J.V.	$h_{ca} = 0.10 \text{ m}$ $d_{85} = 70.53 \text{ mm}$
Fecha:	02-06-03	Escala: INDICADA Lámina N° G-26-B

ANEXO H

Prueba de Validación de la ecuación (6.1) de la presente investigación con la ecuación de Hallmark, Lencastre y Thomas.

Cálculo de los valores de profundidad de erosión (h_s), con los datos de la investigación y las ecuaciones de Martins, Veronese, Veronese – Yildiz, Mason, Okyay y Kuroiwa.

Cuadro H.1. Cálculo de hs con datos de Hallmark A. (1955) y ecuación (6.1)

$$\frac{h_s}{y_i} = 3.188 \left(\frac{z}{H} \right)^{0.625} \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^{0.118} \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^{0.387} \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.377} \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen } \theta_i} \right)} \right)^{0.069}$$

Investigador	Q (m ³ s)	hs (m)	Vi (m/s)	yi (m)	z (m)	H (m)	cos θ _i	d ₈₅ (m)	d ₅₀ (m)	h _{CA} (m)	G	sen θ _i	$\frac{h_s}{y_i}$	$\frac{z}{H}$	$\frac{d_{85}}{d_{50}}$	$\frac{q}{\left[z \left[(G-1)gd_{50} \right]^{1/2} \right]}$	$\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}}$	$\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen } \theta_i} \right)}$	hs Calculado (m)	hs Medido (m)
Hallmark A	0.00266	0.190	3.622	0.027	0.640	0.669	0.979	0.013	0.006	0.61	2.65	0.98	9.429	0.957	2.167	0.013	7.039	1.074	0.255	0.190
Hallmark A	0.00266	0.334	4.932	0.023	1.210	1.240	0.988	0.013	0.006	0.04	2.65	0.99	16.052	0.976	2.167	0.007	10.385	30.628	0.369	0.334
Hallmark A	0.00276	0.073	3.527	0.009	1.100	0.634	0.990	0.013	0.006	0.61	2.65	0.99	23.073	1.735	2.167	0.008	11.872	1.029	0.208	0.073
Hallmark A	0.0003	0.067	4.625	0.008	0.620	1.091	0.995	0.013	0.006	0.15	2.65	1.00	10.932	0.568	2.167	0.002	16.513	7.237	0.087	0.067
Hallmark A	0.00029	0.079	4.289	0.008	1.080	0.938	0.994	0.013	0.006	0.30	2.65	0.99	11.477	1.151	2.167	0.001	15.313	3.108	0.092	0.079
Hallmark A	0.00025	0.080	4.783	0.007	0.930	1.166	0.995	0.013	0.006	0.08	2.65	1.00	13.022	0.798	2.167	0.001	18.256	14.502	0.091	0.080
Hallmark A	0.00025	0.225	4.701	0.024	1.150	1.127	0.987	0.013	0.006	0.15	2.65	0.99	5.582	1.020	2.167	0.001	9.690	7.416	0.134	0.225
Hallmark A	0.00276	0.278	4.701	0.024	1.100	1.127	0.987	0.013	0.006	0.15	2.65	0.99	13.942	0.976	2.167	0.008	9.690	7.416	0.335	0.278
Hallmark A	0.00276	0.238	4.702	0.024	1.100	1.127	0.987	0.013	0.006	0.15	2.65	0.99	13.946	0.976	2.167	0.008	9.692	7.416	0.335	0.238

Cuadro H.2 Cálculo de hs con datos de Lencastre (1961) y ecuación (6.1)

$$\frac{h_s}{y_i} = 3.188 \left(\frac{z}{H} \right)^{0.625} \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^{0.118} \left(\frac{q}{z[(G-1)gd_{50}]^{1/2}} \right)^{0.387} \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.377} \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\sin \theta_i} \right)} \right)^{0.069}$$

Investigador	q (m ² /s)	hs (m)	Vi (m/s)	yi (m)	z (m)	H (m)	cos θ _i	d ₈₅ (m)	d ₅₀ (m)	h _{CA} (m)	G	sen θ _i	$\frac{h_s}{y_i}$	$\frac{z}{H}$	$\frac{d_{85}}{d_{50}}$	$\frac{q}{z[(G-1)gd_{50}]^{1/2}}$	$\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}}$	$\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\sin \theta_i}\right)}$	hs Calculado (m)	hs Medido (m)
Lencastre a	0.139	0.200	4.128	0.071	1.03	0.869	0.976	0.048	0.044	0.60	2.70	0.98	16.224	1.185	1.091	0.158	4.947	1.414	1.152	0.200
Lencastre a	0.139	0.170	4.462	0.040	0.83	1.015	0.988	0.048	0.044	0.41	2.70	0.99	24.004	0.818	1.091	0.196	7.124	2.446	0.960	0.170
Lencastre a	0.070	0.150	4.988	0.065	0.99	1.269	0.983	0.048	0.044	0.20	2.70	0.98	14.852	0.780	1.091	0.083	6.248	6.237	0.965	0.150
Lencastre a	0.139	0.180	4.023	0.042	1.23	0.825	0.985	0.048	0.044	0.60	2.70	0.99	24.154	1.491	1.091	0.132	6.269	1.354	1.014	0.180
Lencastre a	0.070	0.150	3.622	0.076	0.80	0.669	0.969	0.048	0.044	0.80	2.70	0.97	10.579	1.196	1.091	0.102	4.196	0.810	0.804	0.150
Lencastre a	0.139	0.150	4.902	0.038	0.62	1.225	0.990	0.048	0.044	0.20	2.70	0.99	24.992	0.506	1.091	0.262	8.030	6.064	0.950	0.150
Lencastre a	0.070	0.120	3.501	0.045	1.20	0.625	0.981	0.048	0.044	0.80	2.70	0.98	16.580	1.920	1.091	0.068	5.270	0.766	0.746	0.120
Lencastre a	0.070	0.110	4.821	0.015	0.60	1.185	0.996	0.048	0.044	0.20	2.70	1.00	35.916	0.506	1.091	0.136	12.570	5.901	0.539	0.110
Lencastre a	0.022	0.060	4.395	0.016	1.18	0.985	0.995	0.048	0.044	0.40	2.70	1.00	23.970	1.198	1.091	0.022	11.096	2.450	0.384	0.060
Lencastre a	0.022	0.035	3.898	0.017	0.97	0.775	0.994	0.048	0.044	0.61	2.70	0.99	20.645	1.252	1.091	0.026	9.547	1.263	0.351	0.035
Lencastre a	0.022	0.000	4.588	0.069	0.77	1.073	0.978	0.062	0.062	0.40	2.70	0.98	7.405	0.718	1.000	0.028	5.578	2.623	0.511	0.000
Lencastre a	0.146	0.209	3.634	0.078	1.03	0.673	0.966	0.062	0.062	0.80	2.70	0.97	13.602	1.530	1.000	0.139	4.155	0.813	1.061	0.209
Lencastre a	0.146	0.210	4.484	0.040	0.62	1.025	0.988	0.062	0.062	0.40	2.70	0.99	21.202	0.605	1.000	0.232	7.160	2.532	0.848	0.210
Lencastre a	0.070	0.142	4.997	0.066	1.00	1.273	0.982	0.062	0.062	0.20	2.70	0.98	13.652	0.786	1.000	0.069	6.211	6.250	0.901	0.142
Lencastre a	0.146	0.180	4.901	0.038	1.23	1.225	0.990	0.062	0.062	0.20	2.70	0.99	27.758	1.004	1.000	0.117	8.029	6.064	1.055	0.180
Lencastre a	0.070	0.126	4.901	0.038	1.20	1.225	0.99	0.062	0.062	0.2	2.7	0.99	20.755	0.980	1.000	0.057	8.029	6.064	0.789	0.126

Cuadro H.3 Cálculo de hs con datos de Thomas I (1953) y ecuación (6.1)

$$\frac{h_s}{y_i} = 3.188 \left(\frac{z}{H} \right)^{0.625} \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^{0.118} \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^{0.387} \left(\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}} \right)^{1.377} \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen } \theta_i} \right)} \right)^{0.069}$$

Investigado	q (m ² /s)	hs (m)	Vi (m/s)	y _i (m)	z (m)	H (m)	cos θ _i	d ₈₅ (m)	d ₅₀ (m)	h _{CA} (m)	G	sen θ _i	$\frac{h_s}{y_i}$	$\frac{z}{H}$	$\frac{d_{85}}{d_{50}}$	$\frac{q}{[z((G-1)gd_{50})^{1/2}]}$	$\frac{V_i}{\sqrt{gy_i}}$	$\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen } \theta_i} \right)$	hs Calculado (m)	hs Medido (m)
Thomas I	0.000288	0.083	2.436	0.011	0.29	0.303	0.981	0.007	0.006	0.04	2.65	0.98	6.180	0.957	1.167	0.003	7.417	7.431	0.068	0.083
Thomas I	0.0003	0.073	2.282	0.011	0.25	0.265	0.978	0.007	0.006	0.08	2.65	0.98	5.689	0.943	1.167	0.004	6.948	3.240	0.063	0.073
Thomas I	0.000264	0.062	1.919	0.012	0.18	0.188	0.970	0.007	0.006	0.15	2.65	0.97	4.304	0.957	1.167	0.005	5.594	1.216	0.052	0.062
Thomas I	0.000288	0.052	1.483	0.014	0.10	0.112	0.951	0.007	0.006	0.23	2.65	0.95	3.157	0.893	1.167	0.009	4.002	0.463	0.044	0.052
Thomas I	0.000874	0.171	2.367	0.019	0.27	0.286	0.968	0.007	0.006	0.08	2.65	0.97	6.061	0.944	1.167	0.010	5.484	3.461	0.115	0.171
Thomas I	0.000912	0.120	2.029	0.021	0.19	0.210	0.957	0.007	0.006	0.15	2.65	0.96	4.862	0.905	1.167	0.015	4.471	1.340	0.102	0.120
Thomas I	0.000874	0.094	1.616	0.023	0.11	0.133	0.936	0.007	0.006	0.23	2.65	0.94	3.604	0.827	1.167	0.026	3.403	0.541	0.083	0.094
Thomas I	0.00276	0.345	2.501	0.033	0.29	0.319	0.956	0.007	0.006	0.08	2.65	0.96	6.676	0.909	1.167	0.031	4.397	3.812	0.220	0.345
Thomas I	0.00276	0.280	2.196	0.036	0.22	0.246	0.944	0.007	0.006	0.15	2.65	0.94	5.442	0.894	1.167	0.040	3.696	1.548	0.196	0.280
Thomas I	0.00276	0.183	1.808	0.039	0.14	0.167	0.920	0.007	0.006	0.23	2.65	0.92	4.255	0.838	1.167	0.063	2.924	0.668	0.166	0.183
Thomas I	0.000264	0.079	3.450	0.009	0.60	0.607	0.990	0.007	0.006	0.04	2.65	0.99	8.955	0.988	1.167	0.001	11.613	15.023	0.081	0.079
Thomas I	0.000264	0.071	3.340	0.009	0.56	0.569	0.990	0.007	0.006	0.08	2.65	0.99	8.326	0.984	1.167	0.002	11.243	7.041	0.075	0.071
Thomas I	0.000288	0.076	3.102	0.010	0.48	0.491	0.988	0.007	0.006	0.15	2.65	0.99	7.248	0.978	1.167	0.002	9.906	3.234	0.072	0.076
Thomas I	0.000338	0.090	2.599	0.012	0.33	0.344	0.981	0.007	0.006	0.30	2.65	0.98	5.664	0.959	1.167	0.003	7.577	1.125	0.068	0.090
Thomas I	0.000264	0.038	1.920	0.012	0.18	0.188	0.970	0.007	0.006	0.46	2.65	0.97	3.987	0.957	1.167	0.005	5.597	0.396	0.048	0.038
Thomas I	0.000936	0.226	3.484	0.016	0.60	0.619	0.985	0.007	0.006	0.05	2.65	0.99	9.710	0.969	1.167	0.005	8.796	12.194	0.155	0.226
Thomas I	0.000874	0.205	3.402	0.016	0.57	0.590	0.984	0.007	0.006	0.08	2.65	0.98	8.988	0.966	1.167	0.005	8.589	7.257	0.144	0.205
Thomas I	0.000874	0.151	3.188	0.017	0.50	0.518	0.982	0.007	0.006	0.15	2.65	0.98	7.866	0.965	1.167	0.006	7.808	3.391	0.134	0.151
Thomas I	0.000912	0.131	2.666	0.018	0.34	0.362	0.975	0.007	0.006	0.30	2.65	0.98	6.378	0.939	1.167	0.009	6.346	1.177	0.115	0.131
Thomas I	0.000874	0.099	2.041	0.021	0.19	0.212	0.958	0.007	0.006	0.46	2.65	0.96	4.441	0.896	1.167	0.015	4.498	0.442	0.093	0.099
Thomas I	0.002867	0.298	3.279	0.029	0.52	0.548	0.973	0.007	0.006	0.15	2.65	0.97	8.768	0.949	1.167	0.018	6.149	3.555	0.254	0.298
Thomas I	0.00276	0.231	2.784	0.032	0.37	0.395	0.964	0.007	0.006	0.30	2.65	0.96	6.794	0.937	1.167	0.024	4.970	1.269	0.217	0.231
Thomas I	0.00276	0.180	2.183	0.036	0.21	0.243	0.943	0.007	0.006	0.46	2.65	0.94	4.976	0.864	1.167	0.042	3.674	0.498	0.179	0.180
Thomas I	0.00276	0.141	1.670	0.041	0.11	0.142	0.908	0.007	0.006	0.56	2.65	0.91	3.579	0.775	1.167	0.081	2.634	0.230	0.147	0.141
Thomas I	0.000288	0.089	4.886	0.008	1.21	1.217	0.995	0.007	0.006	0.04	2.65	1.00	13.020	0.994	1.167	0.001	17.445	30.273	0.104	0.089
Thomas I	0.000253	0.073	4.806	0.007	1.17	1.178	0.995	0.007	0.006	0.08	2.65	1.00	12.781	0.993	1.167	0.001	18.344	14.651	0.089	0.073
Thomas I	0.000253	0.063	4.660	0.007	1.10	1.107	0.995	0.007	0.006	0.15	2.65	1.00	11.967	0.994	1.167	0.001	17.787	7.343	0.084	0.063
Thomas I	0.000253	0.098	4.314	0.008	0.94	0.949	0.994	0.007	0.006	0.30	2.65	0.99	9.820	0.991	1.167	0.001	15.402	3.144	0.079	0.098
Thomas I	0.00022	0.083	3.949	0.008	0.78	0.795	0.993	0.007	0.006	0.46	2.65	0.99	8.442	0.981	1.167	0.001	14.099	1.716	0.068	0.083
Thomas I	0.000253	0.086	4.314	0.008	0.94	0.949	0.994	0.007	0.006	0.30	2.65	0.99	9.820	0.991	1.167	0.001	15.402	3.144	0.079	0.086
Thomas I	0.000253	0.091	3.597	0.008	0.65	0.660	0.991	0.007	0.006	0.59	2.65	0.99	8.180	0.985	1.167	0.001	12.842	1.109	0.065	0.091
Thomas I	0.000874	0.223	4.850	0.013	1.18	1.199	0.992	0.007	0.006	0.08	2.65	0.99	13.551	0.984	1.167	0.002	13.584	14.868	0.176	0.223
Thomas I	0.000874	0.155	4.694	0.014	1.10	1.123	0.992	0.007	0.006	0.15	2.65	0.99	12.024	0.980	1.167	0.003	12.669	7.427	0.168	0.155
Thomas I	0.000874	0.152	4.694	0.014	1.10	1.123	0.992	0.007	0.006	0.15	2.65	0.99	12.024	0.980	1.167	0.003	12.669	7.427	0.168	0.152
Thomas I	0.000936	0.171	4.369	0.015	0.95	0.973	0.990	0.007	0.006	0.30	2.65	0.99	10.635	0.976	1.167	0.003	11.392	3.211	0.160	0.171
Thomas I	0.000792	0.157	4.360	0.014	0.95	0.969	0.991	0.007	0.006	0.30	2.65	0.99	10.448	0.980	1.167	0.003	11.767	3.201	0.146	0.157
Thomas I	0.000874	0.165	4.008	0.015	0.80	0.819	0.989	0.007	0.006	0.46	2.65	0.99	9.434	0.977	1.167	0.004	10.450	1.761	0.142	0.165
Thomas I	0.000874	0.166	3.615	0.016	0.65	0.666	0.986	0.007	0.006	0.61	2.65	0.99	8.197	0.976	1.167	0.004	9.126	1.077	0.131	0.166
Thomas I	0.00276	0.272	4.438	0.025	0.97	1.004	0.985	0.007	0.006	0.30	2.65	0.99	11.473	0.966	1.167	0.009	8.963	3.296	0.287	0.272
Thomas I	0.00276	0.281	3.706	0.028	0.67	0.700	0.979	0.007	0.006	0.61	2.65	0.98	8.821	0.957	1.167	0.013	7.073	1.123	0.247	0.281

Cuadro H.4. Valores de profundidad de erosión calculados con las ecuaciones de MARTINS (1975), VERONESE (1937) y VERONESE - YILDIZ (1994)

$$hs = 1.5H^{0.1} q^{0.6} ; \quad hs = 1.9H^{0.225} q^{0.54} ; \quad hs = 1.9H^{0.225} q^{0.54} \sin i$$

FASE I

Prueba Nº	Q (m ³ /s)	q (m ³ /s/m)	H (m)	θ _i (°)	hs			
					Ec. Martins (m)	Ec. Veronese (m)	Ec. Veronese Yildiz (m)	Medido (m)
4	0.020	0.033	0.851	50	0.192	0.292	0.080	0.183
1	0.020	0.033	0.801	49	0.191	0.288	0.077	0.189
2	0.020	0.033	0.651	45	0.187	0.275	0.068	0.115
3	0.020	0.033	0.401	20	0.178	0.246	0.027	0.000
5	0.040	0.067	0.937	50	0.294	0.434	0.119	0.309
6	0.040	0.067	0.887	49	0.292	0.428	0.115	0.301
7	0.040	0.067	0.737	45	0.287	0.411	0.102	0.245
8	0.040	0.067	0.487	21	0.275	0.374	0.044	0.000
9	0.060	0.100	0.974	50	0.376	0.545	0.149	0.389
10	0.060	0.100	0.924	49	0.374	0.538	0.145	0.410
11	0.060	0.100	0.774	45	0.367	0.517	0.128	0.349
12	0.060	0.100	0.524	20	0.353	0.474	0.053	0.076

Cuadro H.5. Valores de profundidad de erosión calculados con las ecuaciones de MARTINS (1975), VERONESE (1937) y VERONESE - YILDIZ (1994)

FASE II

Prueba Nº	Q (m ³ /s)	q (m ³ /s/m)	H (m)	θ _i (°)	hs			
					Ec. Martins (m)	Ec. Veronese (m)	Ec. Veronese Yildiz (m)	Medido (m)
1	0.020	0.033	0.851	50	0.192	0.292	0.080	0.155
2	0.020	0.033	0.801	49	0.191	0.288	0.077	0.150
3	0.020	0.033	0.651	45	0.187	0.275	0.068	0.000
4	0.020	0.033	0.401	20	0.178	0.246	0.027	0.000
5	0.040	0.067	0.937	50	0.294	0.434	0.119	0.273
6	0.040	0.067	0.887	49	0.292	0.428	0.115	0.251
8	0.040	0.067	0.737	45	0.287	0.411	0.102	0.162
7	0.040	0.067	0.487	21	0.275	0.374	0.044	0.000
9	0.060	0.100	0.974	50	0.376	0.545	0.149	0.347
10	0.060	0.100	0.924	49	0.374	0.538	0.145	0.352
11	0.060	0.100	0.774	45	0.367	0.517	0.128	0.300
12	0.060	0.100	0.524	20	0.353	0.474	0.053	0.000

Cuadro H.6. Valores de profundidad de erosión calculados con las ecuaciones de MARTINS (1975), VERONESE (1937) y VERONESE - YILDIZ (1994)

FASE III

Prueba Nº	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	H (m)	θ _i (°)	hs			
					Ec. Martins (m)	Ec. Veronese (m)	Ec. Veronese Yildiz (m)	Medido (m)
1	0.020	0.033	0.851	50	0.192	0.292	0.080	0.060
2	0.020	0.033	0.801	49	0.191	0.288	0.077	0.058
3	0.020	0.033	0.651	45	0.187	0.275	0.068	0.000
4	0.020	0.033	0.401	20	0.178	0.246	0.027	0.000
6	0.040	0.067	0.937	50	0.294	0.434	0.119	0.137
7	0.040	0.067	0.887	49	0.292	0.428	0.115	0.127
8	0.040	0.067	0.737	44	0.287	0.411	0.099	0.062
5	0.040	0.067	0.487	21	0.275	0.374	0.044	0.000
9	0.060	0.100	0.974	50	0.376	0.545	0.149	0.166
12	0.060	0.100	0.924	49	0.374	0.538	0.145	0.171
11	0.060	0.100	0.774	45	0.367	0.517	0.128	0.128
10	0.060	0.100	0.524	21	0.353	0.474	0.055	0.000

Cuadro H.7. Valores de profundidad de erosión calculados con la ecuación de MASON (1985)

$$hs = 3.27 \frac{q^{0.6} H^{0.05} h_{CA}^{0.15}}{g^{0.30} d_{50}^{0.10}}$$

Fase	Prueba Nº	Q (m³/s)	q (m²/s)	h _{CA} (m)	H (m)	d ₅₀ (m)	hs (calculado) (m)	hs (medido) (m)
I	4	0.020	0.033	0.05	0.851	0.0016	0.258	0.183
	1	0.020	0.033	0.10	0.801	0.0016	0.285	0.189
	2	0.020	0.033	0.25	0.651	0.0016	0.324	0.115
	3	0.020	0.033	0.50	0.401	0.0016	0.351	0.000
	5	0.040	0.067	0.05	0.937	0.0016	0.393	0.309
	6	0.040	0.067	0.10	0.887	0.0016	0.435	0.301
	7	0.040	0.067	0.25	0.737	0.0016	0.494	0.245
	8	0.040	0.067	0.50	0.487	0.0016	0.537	0.000
	9	0.060	0.100	0.05	0.974	0.0016	0.502	0.389
	10	0.060	0.100	0.10	0.924	0.0016	0.556	0.410
	11	0.060	0.100	0.25	0.774	0.0016	0.632	0.349
	12	0.060	0.100	0.50	0.524	0.0016	0.688	0.076
II	1	0.020	0.033	0.05	0.851	0.018	0.203	0.155
	2	0.020	0.033	0.10	0.801	0.018	0.224	0.150
	3	0.020	0.033	0.25	0.651	0.018	0.255	0.000
	4	0.020	0.033	0.50	0.401	0.018	0.276	0.000
	5	0.040	0.067	0.05	0.937	0.018	0.309	0.273
	6	0.040	0.067	0.10	0.887	0.018	0.342	0.251
	8	0.040	0.067	0.25	0.737	0.018	0.388	0.162
	7	0.040	0.067	0.50	0.487	0.018	0.422	0.000
	9	0.060	0.100	0.05	0.974	0.018	0.395	0.347
	10	0.060	0.100	0.10	0.924	0.018	0.437	0.352
	11	0.060	0.100	0.25	0.774	0.018	0.497	0.300
	12	0.060	0.100	0.50	0.524	0.018	0.540	0.000
III	1	0.020	0.033	0.05	0.851	0.049	0.183	0.060
	2	0.020	0.033	0.10	0.801	0.049	0.203	0.058
	3	0.020	0.033	0.25	0.651	0.049	0.230	0.000
	4	0.020	0.033	0.50	0.401	0.049	0.249	0.000
	6	0.040	0.067	0.05	0.937	0.049	0.279	0.137
	7	0.040	0.067	0.10	0.887	0.049	0.309	0.127
	8	0.040	0.067	0.25	0.737	0.049	0.351	0.062
	5	0.040	0.067	0.50	0.487	0.049	0.382	0.000
	9	0.060	0.100	0.05	0.974	0.049	0.357	0.166
	12	0.060	0.100	0.10	0.924	0.049	0.395	0.171
	11	0.060	0.100	0.25	0.774	0.049	0.449	0.128
	10	0.060	0.100	0.50	0.524	0.049	0.488	0.000

Cuadro H.8. Valores de profundidad de erosión calculados con la ecuación de OKYAY (1973)

$$\frac{h_s}{Y_o} = \frac{30.67 \left(\frac{V_o}{w} \right)^{2.01} \left(\frac{d_{50}}{Y_o} \right)^{1.128}}{\left(\frac{V_o}{\sqrt{gY_o}} \right)^{1.119} \left(\frac{h_{CA}}{Y_o} \right)^{0.431}}$$

Fase	Prueba Nº	Q (m³/s)	q (m²/s)	h _{CA} (m)	V _o (m/s)	y _o (m)	w (m/s)	d ₅₀ (m)	hs (calculado) (m)	hs (medido) (m)
I	4	0.020	0.033	0.05	1.23	0.027	0.457	0.0016	0.0726	0.183
	1	0.020	0.033	0.10	1.23	0.027	0.498	0.0016	0.0453	0.189
	2	0.020	0.033	0.25	1.23	0.027	0.498	0.0016	0.0305	0.115
	3	0.020	0.033	0.50	1.23	0.027	0.498	0.0016	0.0226	0.000
	5	0.040	0.067	0.05	1.85	0.036	0.498	0.0016	0.1123	0.309
	6	0.040	0.067	0.10	1.85	0.036	0.498	0.0016	0.0833	0.301
	7	0.040	0.067	0.25	1.85	0.036	0.498	0.0016	0.0561	0.245
	8	0.040	0.067	0.50	1.85	0.036	0.498	0.0016	0.0416	0.000
	9	0.060	0.100	0.05	2.32	0.043	0.498	0.0016	0.1603	0.389
	10	0.060	0.100	0.10	2.32	0.043	0.498	0.0016	0.1189	0.410
	11	0.060	0.100	0.25	2.32	0.043	0.498	0.0016	0.0801	0.349
	12	0.060	0.100	0.50	2.32	0.043	0.498	0.0016	0.0594	0.076
II	1	0.020	0.033	0.05	1.23	0.027	0.964	0.0179	0.2463	0.155
	2	0.020	0.033	0.10	1.23	0.027	0.964	0.0179	0.1827	0.150
	3	0.020	0.033	0.25	1.23	0.027	0.964	0.0179	0.1231	0.000
	4	0.020	0.033	0.50	1.23	0.027	0.964	0.0179	0.0913	0.000
	5	0.040	0.067	0.05	1.85	0.036	0.964	0.0179	0.4531	0.273
	6	0.040	0.067	0.10	1.85	0.036	0.964	0.0179	0.3361	0.251
	8	0.040	0.067	0.25	1.85	0.036	0.964	0.0179	0.2265	0.162
	7	0.040	0.067	0.50	1.85	0.036	0.964	0.0179	0.1680	0.000
	9	0.060	0.100	0.05	2.32	0.043	0.964	0.0179	0.6470	0.347
	10	0.060	0.100	0.10	2.32	0.043	0.964	0.0179	0.4799	0.352
	11	0.060	0.100	0.25	2.32	0.043	0.964	0.0179	0.3233	0.300
	12	0.060	0.100	0.50	2.32	0.043	0.964	0.0179	0.2398	0.000
III	1	0.020	0.033	0.05	1.23	0.027	1.743	0.049	0.2336	0.060
	2	0.020	0.033	0.10	1.23	0.027	1.743	0.049	0.1732	0.058
	3	0.020	0.033	0.25	1.23	0.027	1.743	0.049	0.1167	0.000
	4	0.020	0.033	0.50	1.23	0.027	1.743	0.049	0.0866	0.000
	6	0.040	0.067	0.05	1.85	0.036	1.743	0.049	0.4296	0.137
	7	0.040	0.067	0.10	1.85	0.036	1.743	0.049	0.3187	0.127
	8	0.040	0.067	0.25	1.85	0.036	1.743	0.049	0.2147	0.062
	5	0.040	0.067	0.50	1.85	0.036	1.743	0.049	0.1593	0.000
	9	0.060	0.100	0.05	2.32	0.043	1.743	0.049	0.6134	0.166
	12	0.060	0.100	0.10	2.32	0.043	1.743	0.049	0.4550	0.171
	11	0.060	0.100	0.25	2.32	0.043	1.743	0.049	0.3065	0.128
	10	0.060	0.100	0.50	2.32	0.043	1.743	0.049	0.2274	0.000

Cuadro H.9. Valores de profundidad de erosión h_s calculados con la ecuación (6.7) de J. Kuroiwa (1998)

$$\frac{h_s}{y_c} = 0.965 \frac{\left(\frac{V_i}{\sqrt{g y_i}} \right)^{0.72}}{\left(\frac{h_{CA} / \cos \theta_i}{y_i} \right)^{0.12} \left(\frac{W}{\sqrt{g y_i}} \right)^{1.26}}$$

Fase	N° Prueba	q (m ³ /s/m)	h _{CA} (m)	θ _i (°)	V _i (m/s)	y _i (m)	G	d ₈₅ (mm)	W (m/s)	cosθ _i	hs/yc	yc (m)	hs	hs
													Calculado (m)	Medido (m)
I	4	0.033	0.05	50	4.086	0.009	2.73	4.810	0.457	0.766	2.910	0.048	0.141	0.183
	1	0.033	0.10	49	3.964	0.009	2.73	4.810	0.457	0.755	2.646	0.048	0.128	0.189
	2	0.033	0.25	45	3.573	0.010	2.73	4.810	0.457	0.707	2.273	0.048	0.110	0.115
	3	0.033	0.50	20	2.804	0.013	2.73	4.810	0.457	0.342	1.770	0.048	0.086	0.000
	5	0.067	0.05	50	4.287	0.017	2.73	4.810	0.457	0.766	3.874	0.077	0.298	0.309
	6	0.067	0.10	49	4.171	0.017	2.73	4.810	0.457	0.755	3.526	0.077	0.271	0.301
	7	0.067	0.25	45	3.802	0.019	2.73	4.810	0.457	0.707	3.040	0.077	0.233	0.245
	8	0.067	0.50	21	3.090	0.024	2.73	4.810	0.457	0.358	2.408	0.077	0.185	0.000
	9	0.100	0.05	50	4.370	0.025	2.73	4.810	0.457	0.766	4.566	0.101	0.460	0.389
	10	0.100	0.10	49	4.257	0.026	2.73	4.810	0.457	0.755	4.158	0.101	0.418	0.410
	11	0.100	0.25	45	3.896	0.028	2.73	4.810	0.457	0.707	3.590	0.101	0.361	0.349
	12	0.100	0.50	20	3.205	0.034	2.73	4.810	0.457	0.342	2.839	0.101	0.286	0.076
II	1	0.033	0.05	50	4.086	0.009	2.76	23.425	0.964	0.766	1.135	0.048	0.055	0.155
	2	0.033	0.10	49	3.964	0.009	2.76	23.425	0.964	0.755	1.033	0.048	0.050	0.150
	3	0.033	0.25	45	3.573	0.010	2.76	23.425	0.964	0.707	0.887	0.048	0.043	0.000
	4	0.033	0.50	20	2.804	0.013	2.76	23.425	0.964	0.342	0.691	0.048	0.033	0.000
	5	0.067	0.05	50	4.287	0.017	2.76	23.425	0.964	0.766	1.512	0.077	0.116	0.273
	6	0.067	0.10	49	4.171	0.017	2.76	23.425	0.964	0.755	1.376	0.077	0.106	0.251
	7	0.067	0.25	45	3.802	0.019	2.76	23.425	0.964	0.707	1.186	0.077	0.091	0.162
	8	0.067	0.50	21	3.091	0.024	2.76	23.425	0.964	0.358	0.940	0.077	0.072	0.000
	9	0.100	0.05	50	4.370	0.025	2.76	23.425	0.964	0.766	1.782	0.101	0.179	0.347
	10	0.100	0.10	49	4.257	0.026	2.76	23.425	0.964	0.755	1.623	0.101	0.163	0.352
	11	0.100	0.25	45	3.896	0.028	2.76	23.425	0.964	0.707	1.401	0.101	0.141	0.300
	12	0.100	0.50	20	3.205	0.034	2.76	23.425	0.964	0.342	1.108	0.101	0.111	0.000
III	1	0.033	0.05	50	4.086	0.009	2.66	70.533	1.743	0.766	0.538	0.048	0.026	0.060
	2	0.033	0.10	49	3.964	0.009	2.66	70.533	1.743	0.755	0.489	0.048	0.024	0.058
	3	0.033	0.25	45	3.573	0.010	2.66	70.533	1.743	0.707	0.420	0.048	0.020	0.000
	4	0.033	0.50	20	2.804	0.013	2.66	70.533	1.743	0.342	0.327	0.048	0.016	0.000
	6	0.067	0.05	50	4.287	0.017	2.66	70.533	1.743	0.766	0.716	0.077	0.055	0.137
	7	0.067	0.10	49	4.171	0.017	2.66	70.533	1.743	0.755	0.652	0.077	0.050	0.127
	8	0.067	0.25	44	3.802	0.019	2.66	70.533	1.743	0.695	0.561	0.077	0.043	0.062
	5	0.067	0.50	21	3.091	0.024	2.66	70.533	1.743	0.358	0.445	0.077	0.034	0.000
	9	0.100	0.05	50	4.370	0.025	2.66	70.533	1.743	0.766	0.845	0.101	0.085	0.166
	12	0.100	0.10	49	4.257	0.026	2.66	70.533	1.743	0.755	0.769	0.101	0.077	0.171
	11	0.100	0.25	45	3.896	0.028	2.66	70.533	1.743	0.707	0.664	0.101	0.067	0.128
	10	0.100	0.50	21	3.205	0.034	2.66	70.533	1.743	0.358	0.528	0.101	0.053	0.000

ANEXO I

Fotos



Foto N° 01: Proceso constructivo - Vista del replanteo del área del vertedero (rápida) y cuenco.



Foto N° 02: Proceso constructivo - Vista panorámica del proceso constructivo del modelo físico.



Foto N° 03: Proceso constructivo - Vista del encofrado de la rápida y colocación de los tubos en el eje, esto nos permitirá medir presiones a través del uso de los translucer.



Foto N° 04: Vista de la rápida y salto de ski terminada. Así también la colocación de la compuerta metálica, plana.



Foto N° 05: Vista panorámica del modelo. Se puede observar el tanque del vertedero, poza de ingreso, la rápida con el ski, el cuenco y el canal de retorno.



Foto N° 06: Vista de las reglas limnimétricas pintadas en la pared del cuenco para medir los niveles en el cuenco.



Foto N° 07: Vista del puente corredizo. A este se le acoplará el correntómetro, el cual nos permitirá medir las velocidades en distintas coordenadas del cuenco.



Foto N° 08: Fase I - Vista del material ha ser utilizado en la Fase I de pruebas.



Foto N° 09: Fase I - Se observa la colocación de las bolas de color en tres ejes paralelos a la rápida. De modo preliminar estas bolas nos indicarán la profundidad de erosión



Foto N° 10: Fase I – Ejecución de la prueba del cono de arena para determinar la densidad seca del material.



Foto N° 11: Fase I - Prueba N°1 ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.189 m



Foto N° 12: Fase I - Prueba 2. ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$).
Vista del pozo de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de esta fue de 0.115 m



Foto N° 13: Fase I - Prueba 3. ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Foto N° 14: Fase I - Prueba 4. ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} 0.05 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Se observa la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad fue de 0.183 m



Foto N° 15: Fase I - Prueba 5. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} 0.05 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Se observa la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.309 m . De modo similar fue para la Prueba 6, siendo la profundidad de erosión de 0.301 m



Foto N° 16: Fase I - Prueba 7. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
La profundidad de erosión en esta prueba, después de dos horas de prueba, fue de 0.245 m.



Foto N° 17: Fase I – Prueba 7. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$).
Se observa la toma de datos de velocidad en el ski, con el Tubo de Pitot.



Foto N° 18: Fase I - Prueba 7. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista del impacto del chorro con el colchón de agua. Se produce una turbulencia total, en la cual este pierde energía.



Foto N° 19: Fase I - Prueba 8. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista de la distribución del flujo en el cuenco. El chorro de agua se encuentra en la condición cuasi ahogado.



Foto N° 20: Fase I - Prueba 8. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
La superficie del suelo no ha sido erosionada, solo se observa una leve mancha en la cual aparecen levemente os materiales gruesos, al parecer los finos fueron lavados.



Foto N° 21: Fase I - Prueba 9. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Se observa la bolita rosada, la cual indica que la erosión ha llegado a 20 cm de profundidad, aproximadamente.



Foto N° 22: Fase I - Prueba 9. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$).
Vista del pozo de erosión después de 2 horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.389 m.



Foto N° 23: Fase I - Prueba 10. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista de la distribución del flujo en el cuenco. Para ello se utilizó un trazador de color púrpura denominado permanganato de potasio.



Foto N° 24: Fase I - Prueba 10. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60 \text{ mm}$)
Vista del levantamiento topográfico del pozo de erosión. La profundidad de este fue de 0.410 m.



Foto N° 25: Fase I - Prueba 11. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista de la toma de velocidad en la zona de impacto (sección 0+120 y en -0.60 cm del eje).



Foto N° 26: Fase I - Prueba 11. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista del pozo de erosión después de 2 horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.349 m.

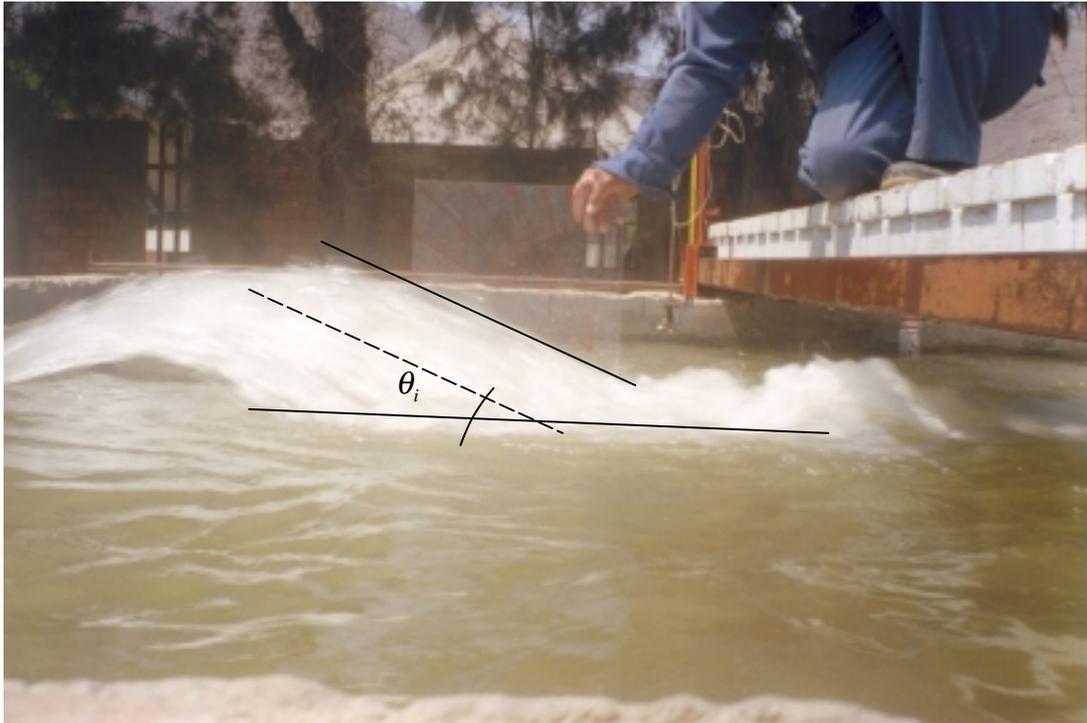


Foto N° 27: Fase I - Prueba 12. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Con el transportador de acrílico y nivelado se obtiene el ángulo con el que incide el chorro al colchón de agua.



Foto N° 28: Fase I – Prueba 12. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.5 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista de la erosión superficial que ha originado el chorro después de 2 horas de prueba. Esta fue de 0.076 m.

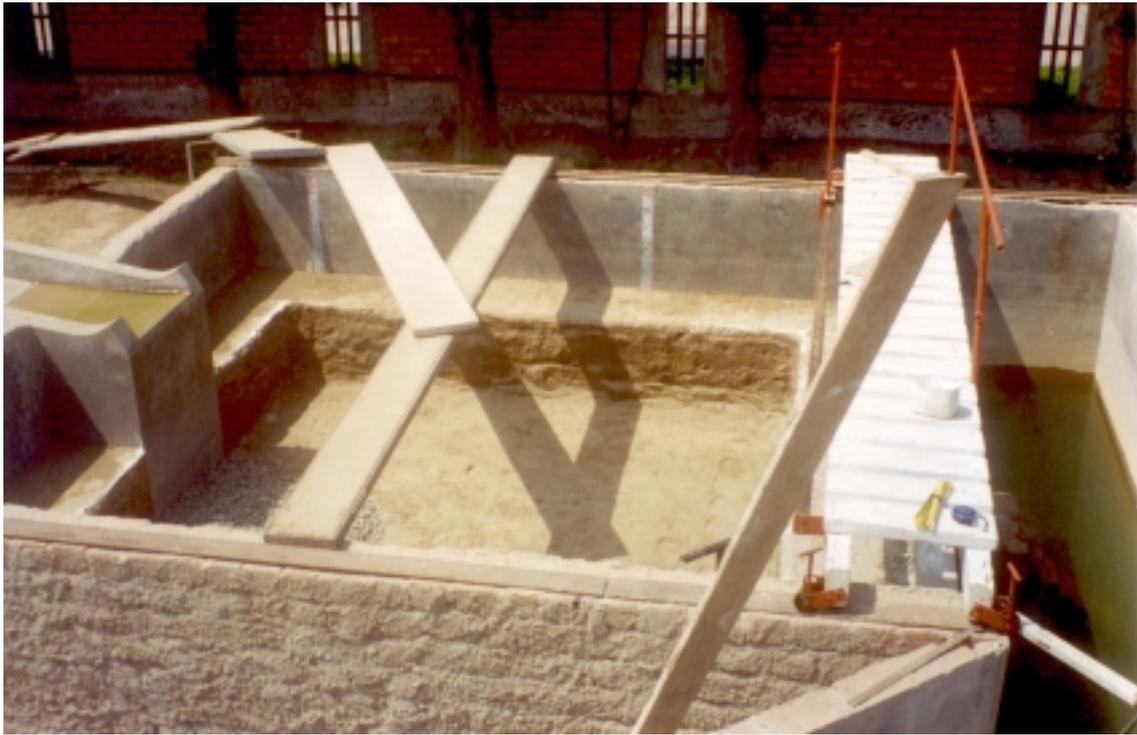


Foto N° 29: Vista del proceso de llenado del cuenco con el material (grava media – $d_{50} = 17.88$ mm) para iniciar la Fase II.



Foto N° 30: Fase II - Prueba 1: ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad fue de 0.155 m.



Foto N° 31: Fase II - Prueba 2: ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.150 m.



Foto N° 34: Fase II - Prueba 6: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.251 m.



Foto N° 35: Fase II - Prueba 7: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$)
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Foto N° 36: Fase II - Prueba 8: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.162 m .



Foto N° 37: Fase II - Prueba 9: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.347 m .



Foto N° 38: Fase II - Prueba 10: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.352 m



Foto N° 39: Fase II - Prueba 11: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.30 m.



Foto N° 40: Fase II - Prueba 12: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista del cuenco. Después de dos horas de prueba, no se produjo erosión.



Foto N° 41: Fase III - Prueba 1: ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.06 m .



Foto N° 42: Fase III - Prueba 2: ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.058 m .



Foto N° 43: Fase III - Prueba 3 : ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Foto N° 44: Fase III - Prueba 4 : ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. De modo similar a la prueba anterior no se produjo erosión.



Foto N° 45: Fase III - Prueba 5: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
 Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Foto N° 46: Fase III - Prueba 6: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
 Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.137 m .



Foto N° 47: Fase III - Prueba 7: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.217 m .



Foto N° 48: Fase III - Prueba 8: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.062 m .



Foto N° 49: Fase III - Prueba 9: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.166 m .



Foto N° 50: Fase III - Prueba 10: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Foto N° 51: Fase III - Prueba 11: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.128 m .



Foto N° 52: Fase III - Prueba 12: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.171 m .