

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FUNDADA EN 1867



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ANEXAS DEL PROYECTO
HIDROELÉCTRICO MINAS SAN FRANCISCO MEDIANTE UN MODELO
MATEMÁTICO DE FLUJO DE TRES DIMENSIONES**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

Ing. M.Sc. Esteban Alonso Pacheco Tobar

AUTORES:

Carlos Alfredo Buñay Moncayo
Freddy Enrique Pacheco Amón

Cuenca – Ecuador
2014



RESUMEN

Con el propósito de establecer el patrón de flujo en las obras anexas del Proyecto Hidroeléctrico Minas San Francisco, y para validar los resultados que fueran obtenidos mediante el modelo físico de escala reducida que fuera ejecutado por el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) y el Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF de la Universidad de Cuenca, a través del presente estudio, se ha implementado, al prototipo del embalse y obras anexas de la obra, el software de modelación numérica tridimensional SSIIM (Simulation of Sediment movements In Water Intakes with Multiblock option) que está basado en la aproximación de un volumen de control mediante una malla tridimensional para cálculo del flujo mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo de turbulencia K-epsilon. El estudio reporta resultados de simulación numérica que son contrastados y analizados con los resultados cualitativos y cuantitativos que fueron obtenidos por el estudio en el modelo físico de escala reducida. Se reporta una buena correspondencia entre la simulación numérica y la modelización física, confirmándose los patrones de flujo, la distribución de velocidades y líneas de corriente, así como la presencia de fenómenos locales de interés para el proyecto. A través del análisis y discusión de los resultados, se concluye que la modelización numérica tridimensional con SSIIM, se constituye en un soporte complementario a la modelación física para el estudio del desempeño hidráulico y procesos de flujo en régimen subcrítico en estructuras hidráulicas de proyectos de generación hidroeléctrica. Finalmente, se emiten recomendaciones para dar paso a la ejecución de futuros estudios que permitan contrastar y analizar el desempeño de otros modelos de simulación numérica como herramienta para el diseño y análisis del funcionamiento de estructuras hidráulicas y procesos de flujo en proyectos de Ingeniería Civil.

Palabras Clave: Modelización Numérica, SSIIM, Modelo físico de escala reducida.



ABSTRACT

In order to establish the flow pattern in the works annexed to the Minas San Francisco Hydroelectric Project, and to validate the results obtained through the small-scale physical model executed by the Program for Management of Water and Soil (PROMAS) and the Hydraulics and Fluid Dynamics Laboratory at University of Cuenca, through this study, the three-dimensional numerical modeling software SSIIM (Simulation of Sediment movements In Water Intakes with Multiblock option) has been implemented to the prototype of the reservoir and to works annexed to the project. This software is based on the approximation of a control volume with a three-dimensional mesh for flow calculation by solving the Navier-Stokes equations with the K-epsilon turbulence model. The study reports results of numerical simulation that are compared and analyzed with qualitative and quantitative results obtained from the study of the small-scale physical model. A good correspondence between numerical simulation and physical modeling is reported, confirming the flow patterns, the velocity distribution and streamlines, and the presence of local phenomena of interest for the project. Through the analysis and discussion of the results, it is concluded that the three-dimensional numerical modeling with SSIIM constitutes a complementary support to physical modeling to study the hydraulic performance and flow processes in subcritical regime in hydraulic structures of hydroelectric generation projects. Finally, recommendations are made to make way for the implementation of future studies to compare and analyze the performance of other models of numerical simulation as a tool for the design and analysis of the operation of hydraulic structures and flow processes in civil engineering projects.

Keywords: Numerical modelling, SSIIM, small-scale Physical Model



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivo general.....	14
1.4 Objetivos específicos.....	15
1.5 Alcance	15
2. PROYECTO MINAS SAN FRANCISCO	16
2.1 Descripción general del proyecto.....	16
2.1.1 Obras Anexas del Proyecto.....	16
3. MODELO FÍSICO	19
3.1 Descripción general	19
3.2 Sistematización de los resultados del estudio en modelo físico	19
3.2.1 Vertedero izquierdo (operación individual).....	20
3.2.2 Vertederos con funcionamiento simultáneo	20
3.2.3 Desagües de fondo	21
3.2.4 Bocatoma	22
4. MODELIZACIÓN NUMÉRICA.....	23
4.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	23
4.2 Modelo numérico SSIIM	24
4.2.1 Generalidades.....	24
4.2.2 Capacidades y limitaciones.....	25
4.2.3 Fundamentos hidráulicos del modelo.....	25
4.2.4 Funcionamiento de SSIIM.....	27
5. MODELIZACIÓN	29
5.1 Análisis de escenarios	29
5.2 Rugosidad	29
5.3 Definición del dominio del espacio de simulación numérica	30
5.4 Simulación del Flujo.....	31
5.4.1 Tres Vertederos en funcionamiento	31
5.4.2 Vertedero Izquierdo.....	32
5.4.3 Desagüe de Fondo.....	32
5.4.4 Bocatoma	33
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
6.1 Tres Vertederos funcionando libremente.....	36
6.2 Tres Vertederos funcionando con compuertas semiabiertas.....	40



6.3	Vertedero Izquierdo	42
6.4	Desagüe de Fondo	44
6.5	Bocatoma	47
6.6	Embalse.....	49
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
8.	REFERENCIAS.....	54
9.	ANEXOS	55
	ANEXO A: Detalle de las obras anexas del proyecto Minas San Francisco.....	55
	A1. Vertederos de excesos	55
	A2. Desagües de fondo.....	56
	A3. Bocatoma.....	57
	ANEXO B: Ciclo de limpieza del embalse Minas San Francisco	58
	ANEXO C: Archivos Control de las Simulaciones y Residuales obtenidos	59
	C1. Tres Vertederos trabajando libremente ($Q=1554\text{m}^3/\text{s}$)	59
	C2. Tres Vertederos trabajando con compuertas semiabiertas ($Q=1000\text{m}^3/\text{s}$) ...	60
	C3. Vertedero Izquierdo ($Q= 576.72 \text{ m}^3/\text{s}$).....	60
	C4. Desagüe de fondo ($Q= 551.32 \text{ m}^3/\text{s}$, $n= 0.07$)	61
	C5. Desagüe de fondo ($Q= 551.32 \text{ m}^3/\text{s}$, $n= 0.036$)	62
	C6. Bocatoma ($Q= 600 \text{ m}^3/\text{s}$)	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.-	Tipo de variables para el estudio.....	19
Tabla 2.-	Condiciones de las simulaciones realizadas	29
Tabla 3.-	Coeficientes de Manning para la sección de aforo río Jubones, San Francisco	29
Tabla 4.-	Condiciones iniciales tres vertederos en funcionamiento	31
Tabla 5.-	Condiciones iniciales vertedero izquierdo	32
Tabla 6.-	Condiciones iniciales para desagüe de fondo	32
Tabla 7.-	Condiciones iniciales para bocatoma	33



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ubicación y esquema general del proyecto 16

Figura 2.- Esquema de las obras principales del proyecto Minas San Francisco 17

Figura 3.- Vista en planta de las obras 18

Figura 4.- Cuerpo de la Presa (Izq.). Vertederos de excesos y desagüe de fondo (Der.)
..... 19

Figura 5.- Patrones de flujo en aproximación a vertedero izquierdo 20

Figura 6.- Vórtices generados en la operación con tres compuertas 21

Figura 7.- Flujo de aproximación en el embalse. Obra de toma cerrada y desagües
totalmente abiertos 21

Figura 8.- Vista del flujo de aproximación hacia el embalse. Desagües de fondo
totalmente abiertos. Nótese el flujo preferencial hacia la margen derecha..... 22

Figura 9.- Vista del flujo junto al paramento de la presa con los desagües totalmente
abiertos. No se observa formación de vorticidad. 22

Figura 10.- Vista frontal del flujo de aproximación a la bocatoma, con el nivel máximo
de operación del embalse. Nótese el sentido y patrones de flujo en las fronteras de la
obra 23

Figura 11.- Comprobación de Flujo Subcrítico para las cotas 792.86 y 776.89 m.s.n.m.
..... 30

Figura 12.- Generación de pilas para los tres vertederos en funcionamiento simultáneo
..... 31

Figura 13.- Pantalla de la presa con sus respectivos bloqueos 31

Figura 14.- Bloqueo de vertederos central y derecho, salida vertedero izquierdo 32

Figura 15.- Sección transversal correspondiente a la presa. Se muestra los niveles así
como la abertura en la malla para formar el vertedero respectivo. 33

Figura 16.- Malla para la pantalla de la presa, pilas con sus respectivos bloqueos y
secciones de salida. 33

Figura 17.- Bloqueos respectivos para bocatoma, y su resultado final 34

Figura 18.- Sección transversal, zona de bocatoma 34

Figura 19.- Vista en planta y sección longitudinal de tres vertederos en funcionamiento
simultáneo 36

Figura 20.- Sección transversal, tres vertederos en funcionamiento simultáneo 37

Figura 21.- Detalle de vorticidad tres vertederos trabajando libre (ParaView) 38



Figura 22. Mapa de velocidades de tres vertederos trabajando libre (ParaView) 38

Figura 23.- Líneas de corriente en la aproximación, tres vertederos trabajando libre (ParaView) 39

Figura 24.- Vista en planta y sección longitudinal, tres vertederos con compuertas semiabiertas 40

Figura 25.- Sección transversal, tres vertederos con compuertas semiabiertas. 41

Figura 26.- Vorticidad en las pilas de los 3 vertederos (modelo físico) 42

Figura 27.- Vorticidad simulada con SSIIM 1 y vista con ParaView 42

Figura 28.- Secciones longitudinales y vista en planta de los patrones de flujo para vertedero izquierdo 42

Figura 29.- Secciones transversales vertedero izquierdo 43

Figura 30.- Patrones de flujo en la aproximación al vertedero izquierdo, (a) modelo numérico, (b) modelo físico..... 44

Figura 31.- Vórtice en la margen derecha para desagüe de fondo 44

Figura 32.- Resultados del modelo numérico SSIIM para desagües de fondo 45

Figura 33.- Patrones de flujo a la entrada de los desagües de fondo, (a), (b), (d), (c) modelo numérico, (c) y (f) modelo físico. 46

Figura 34.- Sección transversal, bocatoma..... 47

Figura 35.- Vista en planta y sección longitudinal, bocatoma 48

Figura 36.- Líneas de corriente próximas a la bocatoma 49

Figura 37.- Líneas de corriente (ParaView) 49

Figura 38.- Análisis de puntos específicos del embalse 50



LISTA DE SÍMBOLOS

B: base

H: altura

T_R: periodo de retorno

Q: caudal

Q_m: caudal para el modelo físico

n: rugosidad (Manning)

g: aceleración de la gravedad

ε: disipación de energía cinética turbulenta.

k: energía cinética turbulenta.

P_k: producción de turbulencia.

k_s: rugosidad (n de Manning)

ρ_w: densidad del agua

ν= viscosidad del agua

g: aceleración de la gravedad

i: número de secciones transversales del nodo

j: número de secciones longitudinales del nodo

x: coordenada en las abscisas del nodo

y: coordenada en las ordenadas del nodo

z: coordenada en el eje vertical del nodo

LISTA DE ABREVIATURAS

SSIIM: Simulation of Sediment movements In Water Intakes with Multiblock option/
Simulación de movimiento de sedimentos para flujo de agua con opción de
bloques múltiples

NTNU: Norwegian University of Science and Technology/ Universidad de Noruega de
Ciencia y Tecnología

CFD: Computational Fluid Dynamics/ Dinámica de Fluidos Computacional

m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar

NAMO: Nivel de aguas máximas ordinarias

NANIMO: Nivel normal mínimo de operación

RMS: Modelo de Tensión de Reynolds



Yo, Carlos Alfredo Buñay Moncayo, autor de la tesis “ESTUDIO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ANEXAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS SAN FRANCISCO MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DE TRES DIMENSIONES”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Noviembre 2014

Carlos Buñay M.

CI: 010577350-1



Yo, Freddy Enrique Pacheco Amón, autor de la tesis “ESTUDIO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ANEXAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS SAN FRANCISCO MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DE TRES DIMENSIONES”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Noviembre 2014

Freddy Pacheco A.

CI: 010654072-7



Yo, Carlos Alfredo Buñay Moncayo, autor de la tesis “ESTUDIO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ANEXAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS SAN FRANCISCO MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DE TRES DIMENSIONES”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Noviembre 2014

Carlos Buñay M.

CI: 010577350-1



Yo, Freddy Enrique Pacheco Amón, autor de la tesis “ESTUDIO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS ANEXAS DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO MINAS SAN FRANCISCO MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DE TRES DIMENSIONES”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Noviembre 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Freddy Pacheco A.", written over a horizontal line.

Freddy Pacheco A.

CI: 010654072-7



DEDICATORIA

“A mis padres y hermanos los cuales han sido el pilar fundamental e inspiración en mi vida para alcanzar y cumplir mis metas”

Carlos Buñay M.

“A mi abuelita, y a mis padres que han sido mi apoyo e inspiración desde muy pequeño”

Freddy Pacheco A.



AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios por regalarme un poco de sabiduría y conocimiento.

A mis Padres por su dedicación, apoyo incondicional y paciencia, gracias por ayudarme a alcanzar y cumplir mis metas.

A mis hermanos que siempre han estado ahí con unas palabras de aliento, que me han motivado a seguir con mis estudios.

A mi director de tesis y profesores por haberme apoyado y guiado en el transcurso de mi carrera.

A mis amigos que siempre han estado conmigo apoyándome y brindándome buenos consejos, buscando siempre la forma de ayudarme, en especial "J.F."

Carlos Buñay M.

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por tantas bendiciones que ha dado a mi vida y por haberme levantado de momentos difíciles, luego a mis padres, hermanos, amigos y en especial a mi enamorada que me han acompañado día a día con su apoyo constante e incondicional a lo largo de mi caminar.

A mis profesores y a mi director de tesis que han sabido impartirme de sus conocimientos y aclarar mis dudas para poder alcanzar el éxito.

Freddy Pacheco A.



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Para cambiar la matriz productiva, y lograr una mayor articulación de la triple hélice, el Estado, a través de las diferentes políticas públicas y bajo las directrices establecidas con diversos criterios técnicos, ha emprendido un proceso de incremento de producción de energía eléctrica. En este sentido, se ha dado paso a la realización de varios estudios que permitan la construcción de centrales hidroeléctricas. Entre dichos proyectos, la central hidroeléctrica Minas San Francisco, ubicada en el límite sur-occidental de la Provincia del Azuay en la cuenca hidrográfica del río Jubones y proyectado para generar 275 MW, se constituye en un importante aporte a la matriz hidroenergética, y que se encuentra en fase inicial de construcción, ha sido sujeto de un estudio en modelo físico de escala reducida que fuera ejecutado en 2013 a través del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca y el PROMAS, mediante el cual se ha procedido con el análisis de procesos de flujo para identificación de alternativas de optimización de las obras.

Considerándose que, para el estudio del desempeño de estructuras hidráulicas y para el entendimiento de procesos de flujo, es necesaria la combinación de las potencialidades que ofrecen tanto la modelización física como la modelización numérica, a través del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil, se ha propuesto realizar un estudio complementario que permita validar resultados obtenidos en el modelo físico de escala reducida así como identificar otros posibles procesos de flujo de interés para el proyecto.

De esta manera, como un aporte académico para la construcción de experiencias en torno al uso de modelización matemática como una herramienta de comprobación y análisis para concepción, diseño y toma de decisiones en obras hidráulicas, mediante el presente estudio, se expone el procedimiento de implementación de un modelo numérico y los resultados referidos a un análisis comparativo.

1.2 Justificación

Debido a la complejidad de los procesos de flujo en las obras anexas de importancia del proyecto de generación Hidroeléctrica Minas San Francisco, y como un aporte para la construcción de experiencias en torno a la modelización numérica, se considera conveniente realizar un estudio complementario, que permita validar los resultados de modelización física y disponer de mayores elementos para la optimización de aspectos de diseño y operación de las obras en consideración.

Por ello, se ha planteado pertinente dar paso a una investigación explorativa que permita a través de un análisis comparativo aportar de mejor manera a la consecución de objetivos técnicos/científicos que impulsen la generación del conocimiento en el ámbito de la Hidráulica y del diseño de estructuras hidráulicas.

1.3 Objetivo general

Analizar el desempeño hidráulico de las obras anexas del proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco mediante la implementación del modelo matemático SSIIM.



1.4 Objetivos específicos

- Analizar la configuración general del proyecto y los aspectos relativos a procesos de flujo en las obras de: desagües de fondo, vertederos de excesos y bocatoma.
- Implementar el modelo matemático SSIIM (SIMULATION OF SEDIMENT MOVEMENTS IN WATER INTAKES WITH MULTIBLOCK OPTION)
- Analizar el desempeño hidráulico de las obras anexas de desagües de fondo, vertederos de excesos y bocatoma.

1.5 Alcance

En el presente trabajo se realiza un estudio exploratorio de la configuración, requerimientos y desempeño del modelo de simulación numérica SSIIM. Se genera información que permite: i) la validación de los resultados obtenidos en modelo físico de escala reducida y ii) el establecimiento de criterios y elementos adicionales para la optimización de los diseños y procesos de operación de las obras anexas del proyecto de generación hidroeléctrica Minas San Francisco.

A través del presente estudio, se da un importante aporte al entendimiento, aplicación y desarrollo de conocimiento en modelización numérica para la optimización del diseño y operación de obras hidráulicas en proyectos de Ingeniería del Agua. Adicionalmente, el estudio ha aportado al desarrollo de un documento de divulgación técnica/científica [*REPORTE DE INVESTIGACIÓN LH&DF NO. 021*] que se ha ejecutado a través del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

Los resultados y productos establecidos en el estudio se sistematizan en:

- Modelo matemático implementado para estudio de patrones de flujo en: vertedero de excesos, desagüe de fondo y bocatoma.
- Reporte técnico) [*REPORTE DE INVESTIGACIÓN LH&DF NO. 021*] con el análisis comparativo de los resultados del modelo matemático y el modelo físico de escala reducida.

2. PROYECTO MINAS SAN FRANCISCO

2.1 Descripción general del proyecto

El proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco se encuentra ubicado, en el límite sur-occidental de la provincia del Azuay entre las coordenadas 9°630.956 a 9°635.437 N-S y 668.870 a 643.594 E-W ⁽¹⁾. Su construcción inició en diciembre de 2011 y está diseñado para una potencia instalada de 270 Megavatios (MW) aprovechando el potencial hidroeléctrico en una caída de 474 m en el río Jubones, que presenta un caudal medio anual de $48,26 \text{ m}^3/\text{s}$ ⁽²⁾.

El proyecto implica una inversión de aproximadamente 556 millones de dólares y se constituye en un proyecto emblemático del Estado Ecuatoriano, ya que aportará a partir del año 2015, una energía media de 1290 Gwh/año, fortaleciendo la soberanía energética, reemplazando la generación térmica, reduciendo emisiones de CO₂ en 0,65 millones de Ton/año aproximadamente, sustituyendo la importación de energía, y creando hasta la fecha 1795 fuentes de empleo directo. Beneficia directamente a más de 100 mil habitantes, gracias a la implementación de nuevas prácticas de compensación a través de programas de desarrollo integral y sostenible mediante el manejo de desechos sólidos, mejoramiento de la infraestructura sanitaria y eléctrica, capacitación en educación ambiental y mejoramiento de los sistemas productivos existentes, apoyo en lastrado y asfaltado de vías. ⁽³⁾.

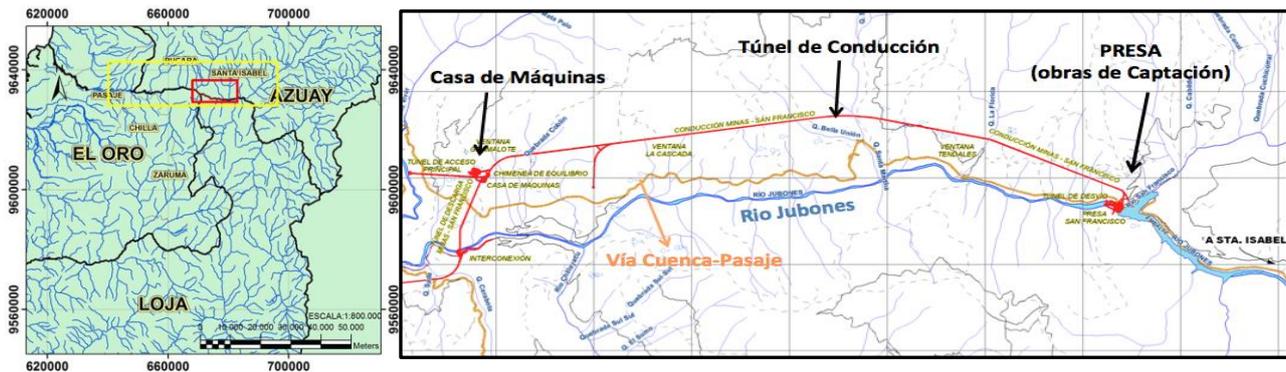


Figura 1.- Ubicación y esquema general del proyecto

Fuente.- (Enerjubones, Celec.EP 2014)

2.1.1 Obras Anexas del Proyecto

La obra principal contempla: un cierre en el río Jubones con una presa de gravedad en hormigón rodillado, un embalse de regulación y control, un túnel de conducción que se desarrolla a lo largo de la margen derecha del río con 13,9 km de longitud, y una casa de máquinas subterránea que alojará tres turbinas tipo Pelton de 90 MW cada una.

¹ (Enerjubones, Diseño Definitivo, Proyecto Minas San Francisco, Informe de Hidrología y Sedimentología)

² (Enerjubones, Celec.EP 2014)

³ (Enerjubones, Celec.EP 2014)

Presa de Gravedad y Embalse

Prevista en hormigón rodillado cuyo eje se ubica aguas abajo de la confluencia del río San Francisco y el río Jubones en las coordenadas 9'633.242,50 N-S; 668.644,46 E-W.

El cuerpo de la presa se desarrolla sobre la elevación 741,00 m.s.n.m., en el fondo del cauce y tiene una altura total libre de 54,00 m, con las siguientes cotas de proyecto:

- Nivel de coronamiento de la presa: 795,00 m.s.n.m.
- Nivel máximo de operación de la central (NAMO): 792,86 m.s.n.m.
- Nivel mínimo de operación de la central (NANIMO): 783,33 m.s.n.m.
- Nivel Muerto: 765,00 m.s.n.m.
- Nivel Solera de la Captación: 772,00 m.s.n.m.

Los taludes naturales del valle donde irá cimentada la presa tienen una inclinación aproximada de 45° en la margen derecha y de 30° en la margen izquierda. La presa en el nivel máximo de operación, ubicado en la elevación 792,86 m.s.n.m., permitirá la creación de un embalse de 14 400 000,00 m³, con un volumen útil de 6100000,00 m³, que permitirá la regulación de caudales. (4)

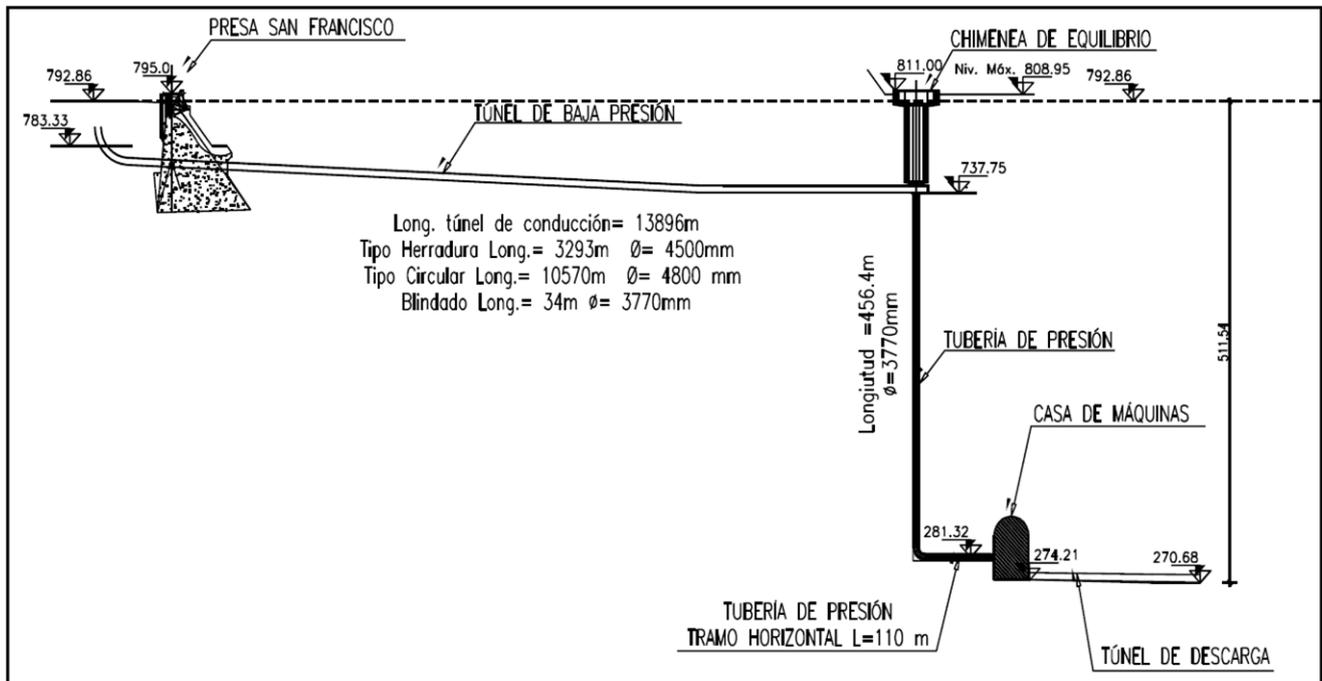


Figura 2.- Esquema de las obras principales del proyecto Minas San Francisco

Fuente.- (Enerjubones, Diseño Definitivo, Proyecto Minas San Francisco, Informe de Hidráulica)

Vertederos

La estructura principal de la presa tiene tres vertederos de perfil hidrodinámico con desarrollo parabólico con compuertas de 8,90 m de ancho y 9,10 m de altura proyectados para evacuar un caudal de crecida de 1554 m³/s correspondiente a un período de retorno TR=5,000 años. El diseño final de los vertederos ha sido validado

⁴ (Enerjubones, Diseño Definitivo, Proyecto Minas San Francisco, Informe de Hidráulica)

para desalojar un caudal hasta de 1624,00 m³/s, de un TR=10,000 años. El nivel de la cresta es 783.90 m.s.n.m.

Desagüe de fondo

La estructura de cierre tiene como elemento importante de control y de regulación del embalse y del material sólido depositado en el embalse, dos desagües de fondo de 4,00 m de ancho y 4,90 m de altura. Los cimacios se ubican en la elevación 765,30 m.s.n.m. La estructura de desagüe tiene la capacidad de vaciar el embalse en 11,90 horas, para un caudal en el cauce de 80,45 m³/s, que corresponde al caudal medio mensual del mes de marzo (periodo previsto para operaciones de lavado).

Obra de toma

La obra de captación del agua se encuentra ubicada en la margen derecha del embalse en las proximidades de la presa. Consiste en una toma a baja presión, protegida por una reja con un área neta de 65,0 m² (11,48 X 7,20 m) dispuesta de forma inclinada y que se conecta directamente a la entrada de la cámara de compuerta y al túnel de carga de 4,50 m de diámetro. La obra captará 65 m³/s a una velocidad de 1,0 m/s, Nivel del labio inferior 772 m.s.n.m. (5)

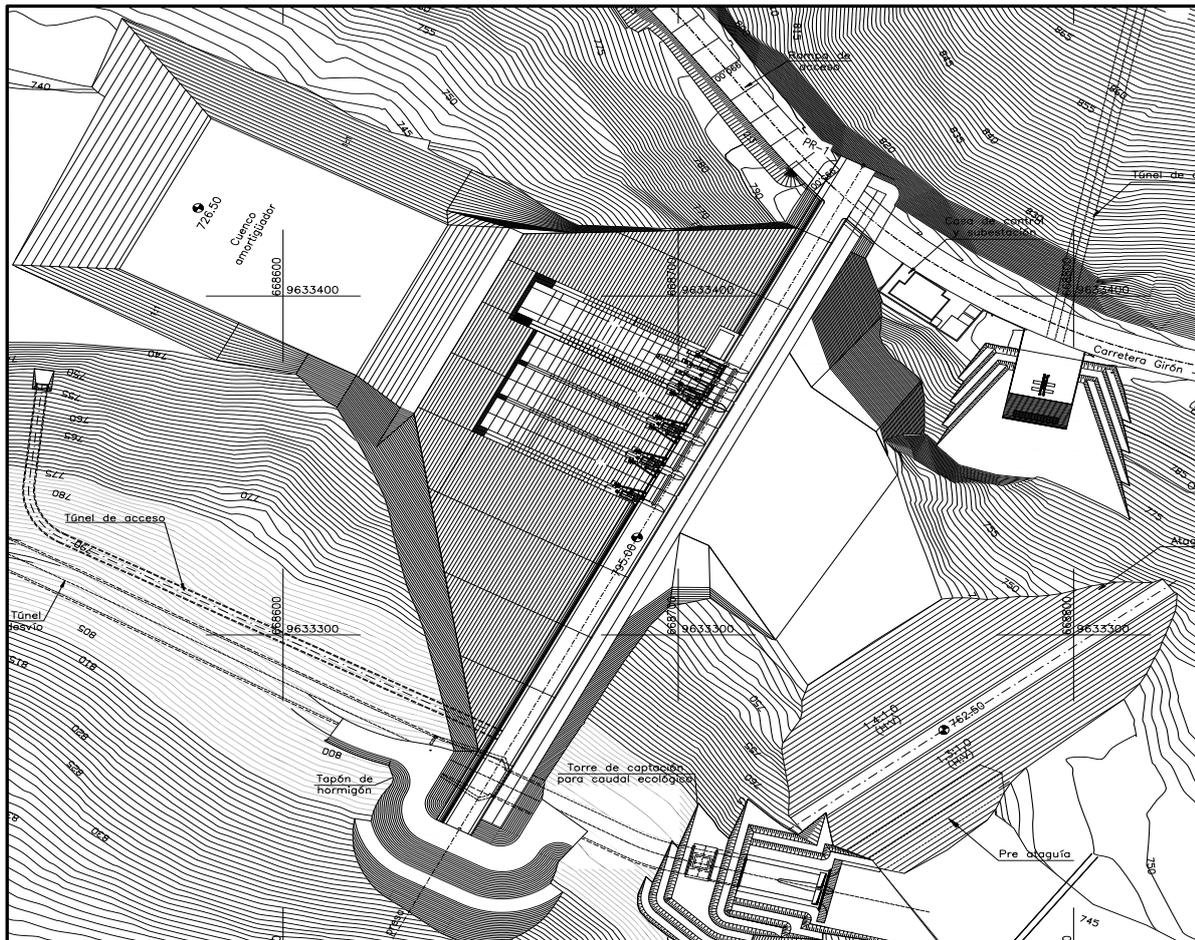


Figura 3.- Vista en planta de las obras

Fuente.- (Enerjubones, Diseño Definitivo, Proyecto Minas San Francisco, Informe de Hidráulica)

⁵ (Enerjubones, Diseño Definitivo, Proyecto Minas San Francisco, Informe de Hidráulica)

3. MODELO FÍSICO

3.1 Descripción general

El Programa para el Manejo del Agua y el suelo PROMAS conjuntamente con el Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, procedieron a la construcción del modelo físico a escala 1/60 de lecho móvil, el cual contempló una construcción de 874 m² para analizar la Obra de Captación, Vertederos de Excesos, Desagüe de Fondo y Cuenco de disipación de energía. El modelo físico representó una longitud de aproximadamente 1000 m aguas abajo y 1200 m aguas arriba del sitio de represamiento con un caudal máximo de simulación de 58,2 L/s ⁽⁶⁾

Las principales variables tratadas en el estudio se agrupan en:

De Frontera	De flujo
Transversales de la sección	Presión
Longitudinales	Velocidad
Rugosidad	Aceleración de la gravedad

Tabla 1.- Tipo de variables para el estudio
Fuente.- (PROMAS 2013)



Figura 4.- Cuerpo de la Presa (Izq.). Vertederos de excesos y desagüe de fondo (Der.)

Fuente.- (PROMAS 2013)

3.2 Sistematización de los resultados del estudio en modelo físico

A continuación se presenta los resultados de los ensayos realizados en el modelo físico para las obras anexas del proyecto Minas San Francisco, relativas a los patrones de flujo y fenómenos locales.

⁶ (PROMAS 2013)

3.2.1 Vertedero izquierdo (operación individual)

Patrones de flujo en aproximación a vertederos

- (i) Vista superior del flujo de aproximación con trazador naranja y azul colocado en el embalse (2 metros aguas arriba de la presa en escala de modelo).
- (ii) Vista posterior desde aguas arriba de la contracción generada en pila y estribo.
- (iii) Vista superior de las líneas de corriente en el flujo de aproximación, trazadas con colorante azul y naranja. (7)

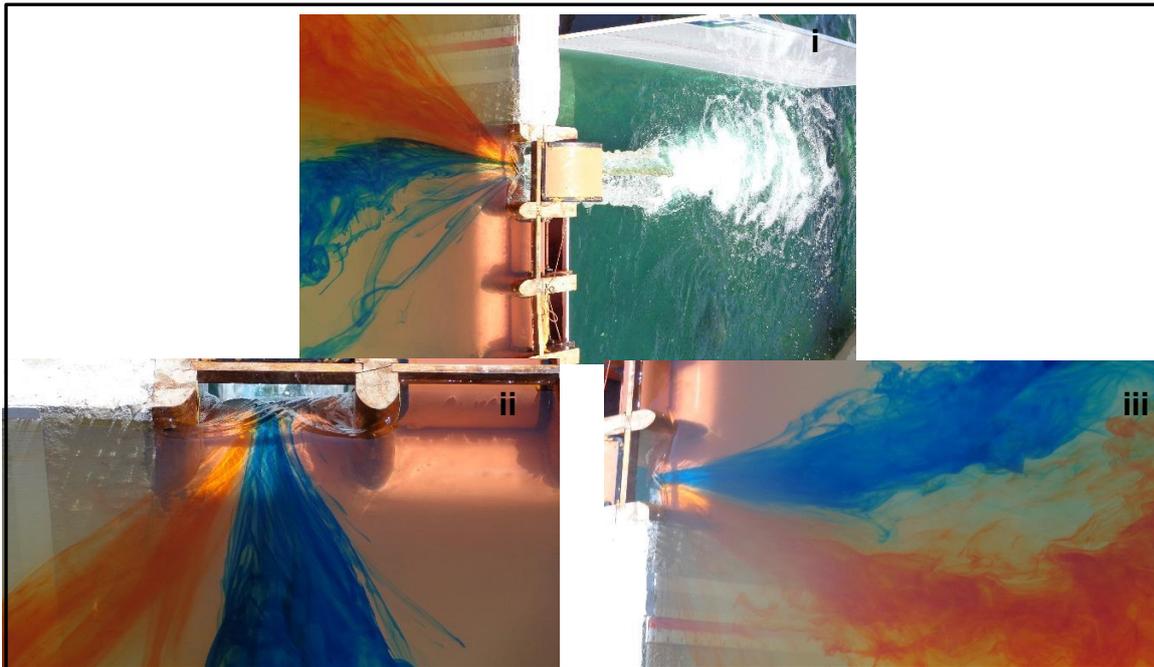


Figura 5.- Patrones de flujo en aproximación a vertedero izquierdo

Vertedero izquierdo con descarga individual para caudal prototipo= 576.72 m³/s.
Abertura completa y Nivel Embalse prototipo= 792.86 m.s.n.m.

3.2.2 Vertederos con funcionamiento simultáneo

Vórtices

Se determinó que para los diseños preestablecidos se presentan vórtices cerca de las pilas durante la descarga a través de compuerta, el origen de estos vórtices obedece a condiciones geométricas y velocidades de flujo. Algunos de ellos son permanentes otros en cambio se presentan de manera intermitente. Se observó que los vórtices alrededor de las pilas se generan con operación cualquiera de compuerta, estos van desde un simple remolino superficial hasta algunos con gran fuerza en forma de embudo, los cuales se prolongan hasta el fondo del perfil del vertedero, permitiendo el ingreso de gran cantidad de aire (ver Figura 6). Al operar las tres compuertas simultáneamente, se determinó que los lugares críticos respecto a la formación de

⁷ (PROMAS 2013)

vórtices son las pilas externas, aquí los vórtices llegan a ser de tipo 5 y 6, permitiendo el ingreso de aire a la lámina de agua, estos presentan un diámetro de remolino en el rango de 3 a 4 cm (escala de modelo) equivalente a 1.8 a 2.4 m en escala de prototipo. En las pilas intermedias se observó vórtices intermitentes de menor tamaño tipo 2 (Figura 6). (8)



Figura 6.- Vórtices generados en la operación con tres compuertas

Caudal = $1000\text{m}^3/\text{s}$ con abertura de 50% y nivel embalse = 792.86 m.s.n.m. en prototipo.

3.2.3 Desagües de fondo

Patrones de flujo



Figura 7.-Flujo de aproximación en el embalse. Obra de toma cerrada y desagües totalmente abiertos

Caudal en prototipo= $551.32\text{ m}^3/\text{s}$ con abertura completa.

Nivel de Embalse = 776.89 m.s.n.m. (en prototipo) con descarga sumergida.

⁸ (PROMAS 2013)



Figura 8.- Vista del flujo de aproximación hacia el embalse. Desagües de fondo totalmente abiertos. Nótese el flujo preferencial hacia la margen derecha

Caudal en prototipo= 551.32 m³/s con abertura completa.

Nivel de Embalse = 776.89 m.s.n.m. (en prototipo) con descarga sumergida.



Figura 9.- Vista del flujo junto al paramento de la presa con los desagües totalmente abiertos. No se observa formación de vorticidad.

Caudal en prototipo= 551.32 m³/s con abertura completa.

Nivel de Embalse = 776.89 m.s.n.m. (en prototipo) con descarga sumergida.

3.2.4 Bocatoma

Patrones de flujo

Se reporta buen desempeño hidráulico de la geometría proyectada para la bocatoma. No se reporta presencia de vórtices asociados a la entrada de aire en la estructura, tanto para el nivel máximo como para el nivel mínimo de operación.

- El caudal derivado con el nivel máximo en el embalse se reporta en 103 m³/s
- El caudal derivado con nivel mínimo de operación se reporta en 70 m³/s



Figura 10.- Vista frontal del flujo de aproximación a la bocatoma, con el nivel máximo de operación del embalse. Nótese el sentido y patrones de flujo en las fronteras de la obra

Caudal en prototipo= $600\text{m}^3/\text{s}$ con abertura completa del desagüe de fondo.
Nivel Embalse = 792.86 m.s.n.m. (prototipo).

4. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

4.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (computational fluid dynamics (CFD)) es una rama de la mecánica de fluidos que proporciona un medio de simulación que utiliza métodos numéricos y algoritmos para simular de forma detallada cualquier sistema en el que intervenga flujos de fluidos, fenómenos de transferencia de calor y materia permitiendo desarrollar soluciones para planteamientos de diseño de obras hidráulicas.

Los CFD Se fundamentan en la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales de la conservación de la materia, ecuación del transporte, energía y cantidad de movimiento en un dominio discretizado, es decir convertido en una malla (volúmenes o elementos finitos).⁽⁹⁾

Existen modelos unidimensionales, bidimensionales y los tridimensionales. Los modelos tridimensionales 3D representan en la actualidad el estado más avanzado para la modelización, pues mediante estos, es posible calcular las tres componentes espaciales de la velocidad de flujo de agua y resolver fenómenos complejos, mismos que en estudios convencionales están sujetos a grandes simplificaciones.⁽¹⁰⁾

En los últimos años el desarrollo de herramientas y capacidades de las tecnologías de la computación, hacen más asequible el empleo de modelos numéricos, que ha permitido analizar situaciones cada vez más complejas como los flujos turbulentos, debido al incremento en las capacidades y velocidad de cálculo de los computadores, se facilita la introducción de paquetes computacionales para modelización numérica tridimensional como una herramienta de simulación que complementa la modelización física. El uso de la modelización física y numérica, permite el estudio de diversos

⁹ (Ordinola 2009)

¹⁰ (Vásquez 2003)



escenarios, así como la implementación de soluciones optimizadas en el diseño o en un prototipo. ⁽¹¹⁾

Uno de los factores más importantes al realizar una simulación mediante un CFD es la elaboración de la malla la cual consiste en dividir el cuerpo del fluido en elementos o celdas y luego resolver las ecuaciones en cada uno de estos elementos ⁽¹²⁾. La generación de la malla es la que requiere mayor demanda de tiempo y cuidado debido a que la calidad de la misma juega un papel importante en la convergencia de la simulación. Según su configuración las mallas se dividen en: Estructuradas y no estructuradas.

4.2 Modelo numérico SSIIM

4.2.1 Generalidades

SSIIM (Simulation of Sediment movements In Water Intakes with Multiblock option) fue desarrollado en 1991 por la Universidad de Trondheim en Noruega (NTU) para usarse en Ingeniería Hidráulica, Ingeniería de Ríos, procesos de Sedimentación y procesos Ambientales en régimen subcrítico. Este software calcula el flujo en tres dimensiones, resolviendo la ecuación de Navier-Stokes junto con el modelo de turbulencia k-epsilon. Las ecuaciones de convección-difusión se resuelven para calcular el transporte de sedimentos. Los cálculos son dependientes del tiempo y un mallado vertical móvil toma en cuenta los cambios en el nivel del agua y del lecho. El programa se basa en el método de volúmenes finitos por lo que se debe generar un mallado tridimensional lo más ortogonal posible. ⁽¹³⁾

SSIIM es un software de uso libre, su instalador y manual pueden descargarse gratuitamente de <http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/>.

Existen dos versiones del programa, SSIIM1 y SSIIM2, siendo la principal diferencia entre estos, que en la primera se usa una malla estructurada de un solo bloque; y en la segunda se emplea una malla no estructurada que le permite generar multibloques. Una importante ventaja de la versión 2 sobre la versión 1, es la capacidad de generar algoritmos que modelan geometrías complejas y simulan procedimientos de humedecido y secado de las mismas, mientras que SSIIM1 modeliza cuerpos de agua menores y más definidos. ⁽¹⁴⁾

Para el presente estudio, se hace uso de la versión SSIIM1 por lo que, para menciones posteriores, cuando se hable de SSIIM se hará referencia a dicha versión.

¹¹ (Novak, Moffat y Nalluri 2001)

¹² (Ordinola 2009)

¹³ (N. Olsen, CFD Algorithms for Hydraulic Engineering 2000)

¹⁴ (N. Olsen 2012)



4.2.2 Capacidades y limitaciones

La implementación de SSIIM puede ser hecha para múltiples aplicaciones a régimen subcrítico, siendo de gran interés el cálculo de flujo de agua y transporte de sedimentos, tema que engloba las siguientes posibles simulaciones: ⁽¹⁵⁾

- Cálculo de flujo permanente de agua con superficie y fondo de agua fijos.
- Cálculo de flujo no permanente de sedimentos con superficie y fondo de agua fijos.
- Cálculo de flujo no permanente de agua con superficie y fondo de agua fijos.
- Cálculo de flujo no permanente de agua con movimiento de la superficie de agua y fondo fijo.
- Cálculo de flujo no permanente de agua y sedimentos con superficie de agua fija y fondo móvil.
- Cálculo de flujo no permanente de agua y sedimentos con superficie y fondo de agua móviles.

Así mismo, SSIIM presenta algunas limitaciones:

- No considera los términos de difusión no ortogonales.
- En el mallado, las líneas en dirección vertical deben ser exactamente verticales.
- La viscosidad cinemática del fluido es equivalente a la del agua a 20°C. Ésta característica es parte de la codificación de SSIIM, por lo que, no se puede modificar.
- Debido a que el programa no ha sido desarrollado para ambientes marinos, los efectos de gradientes de densidad a causa de las diferencias de salinidad, no son consideradas.
- Trabaja con un máximo de 2 millones de celdas aproximadamente.
- Trabaja en régimen de Flujo Subcrítico.

4.2.3 Fundamentos hidráulicos del modelo

Las ecuaciones de Navier Stokes son un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen cómo la velocidad, presión, temperatura, y la densidad de un fluido en movimiento están relacionadas. Estas ecuaciones son muy difíciles de solucionar analíticamente por lo que actualmente se hace uso de los ordenadores para resolver las aproximaciones a la ecuaciones usando una variedad de técnicas como las diferencias finitas, volumen finito, elementos finitos, y métodos espectrales.

Las ecuaciones de Navier-Stokes (Conservación del Momentum) para flujo turbulento se resuelven para obtener la velocidad del agua, mientras que el modelo k-ε se utiliza para calcular el esfuerzo cortante turbulento. Estas ecuaciones para un flujo de densidad no compresible y constante se expresan de la siguiente manera. ⁽¹⁶⁾

¹⁵ (N. Olsen, User's Manual SSIIM 2013)

¹⁶ (N. Olsen 2012)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (4-1)$$

El primer término de la izquierda es un término transitorio, mientras que el segundo es un término convectivo. Al lado derecho de la ecuación, el primer término hace referencia a la presión mientras que el segundo refiere al esfuerzo de Reynolds.

Modelo de turbulencia k-ε

El concepto de viscosidad con el modelo de turbulencia k-ε se utiliza para modelar el término de esfuerzo de Reynolds.

$$\overline{u_i u_j} = \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4-2)$$

Los dos primeros términos del lado derecho de la ecuación forman la parte difusiva en la ecuación de Navier-Stokes, mientras que el tercer término se refiere a la presión

La viscosidad en el modelo k-ε se expresa como:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (4-3)$$

Definiéndose la energía cinética turbulenta k como:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j} \quad (4-4)$$

k se modela como:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (4-5)$$

Donde P_k es dado por:

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (4-6)$$

La disipación de k es ε, y se modela como:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4-7)$$

En todas las ecuaciones anteriores “C” son diferentes constantes en el modelo k-ε. El modelo k-ε es la turbulencia por defecto en el software SSIM.

Leyes de Pared

Se usa la ley de pared de los límites aproximados, según lo dado por Schlichting.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (4-8)$$



La rugosidad k_s es equivalente a un diámetro de partículas en la cama. (17)

Método simple (presiones)

El término de Presión P en las ecuaciones Navier-Stokes y P_k en la ecuación (4-6) son resueltas juntas mediante el método SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked). (18)

Este método supone un campo de presión y calcula las velocidades, luego estima el defecto de continuidad y usa esto para calcular una corrección del campo de presión. Los valores calculados inicialmente no satisfacen la continuidad y son denotados con el índice *. La corrección de las variables se denota con un índice '. Las variables después de la corrección no tienen índice.

$$P = P^* + P' \quad (4-9)$$

$$U = U^* + U' \quad (4-10)$$

Donde:

P= Presión

U= Velocidad

4.2.4 Funcionamiento de SSIIM

SSIIM utiliza el método del volumen de control, es decir que, el cuerpo de agua a modelar debe discretizarse en volúmenes tridimensionales (hexaedros) definidos por celdas en tres direcciones de preferencia ortogonales, cuyo tamaño y alineamiento tiene mayor influencia en la convergencia, precisión y tiempo computacional de la simulación. (19)

Como todo programa CFD, SSIIM consta de tres pasos:

- 1) Pre-procesamiento.- Generación de la malla e ingreso de datos de entrada. Para el mallado debe considerarse la perpendicularidad de las líneas de cada celda; no deben existir ángulos menores a 45° , de no ser así, la convergencia de la solución es más lenta o no se da.
- 2) Cálculos.- Cálculos de la velocidad del agua, cambios en los niveles de agua, etc. El cálculo finaliza el momento que el programa converge, lo cual sucede cuando en la ventana principal se puede observar que los valores de los residuales de, velocidad (X, Y, Z), continuidad, modelo de turbulencia k-épsilon, son menores a $1E^{-4}$ y se escribe el archivo de resultados (Result).
- 3) Post-procesamiento.- Visualización de resultados, ya sea con las vistas en planta, transversal o longitudinal generadas en SSIIM propiamente o a través de programas como, *Tecplot* y *ParaView*. Se generan vistas en 2D y 3D de la red y

¹⁷ (N. Olsen 2012)

¹⁸ (Ordinola 2009)

¹⁹ (Luzuriga y Amaya 2014)



se visualizan los resultados de las variables que intervienen en la modelización del cuerpo de agua. ⁽²⁰⁾

Se debe ejecutar la aplicación *ssiim1w64_45.exe*, una vez iniciado el programa aparece una ventana en la cual se debe ingresar los datos iniciales de la malla:

- Longitud
- Ancho
- Profundidad del agua
- Número de secciones transversales
- Número de secciones longitudinales

Una vez ingresados estos datos, se crean automáticamente los archivos control, boogie y koordina en el mismo directorio donde se encuentra el ejecutable de SSIIM, estos son los principales archivos para el manejo del programa.

En el archivo *koordina* se ingresa la respectiva geometría del embalse, en caso de que se requiera dar forma al fondo se debe usar un archivo geodata correspondiente a todos los puntos de la topografía y batimetría.

En el archivo *Control* se almacenan los algoritmos necesarios para la simulación, es decir, aquí se ingresan las condiciones hidráulicas y numéricas que van a gobernar el modelo. El ingreso de dichas condiciones se ha realizado mediante los data set, los cuales cumplen con el siguiente formato:

“Letra mayúscula” “Número” “Datos”

Los diferentes tipos de data set pueden ser leídos en detalle en (N. Olsen, User’s Manual SSIIM 2013).

En el archivo boogie será el que muestre los respectivos errores.

²⁰ (N. Olsen, User’s Manual SSIIM 2013)



5. MODELIZACIÓN

5.1 Análisis de escenarios

Para el estudio se ha considerado los caudales que corresponden a los ensayos realizados en el modelo físico y de acuerdo a la siguiente configuración:

Título	Caudales (m3/s)		Nivel del Embalse (m.s.n.m.)	Rugosidad n de Manning	Número de Simulaciones	Restricción	Objetivo de las simulaciones
	Entrada	Salida por obra anexa					
Vertederos	1000	1000	792.86	0.07	1	Bocatoma cerrada, desagües de fondo cerrados y tres vertederos semiabiertos	Comportamiento hidráulico de todos los vertederos
	1554	1554	792.86	0.07	1	Bocatoma cerrada, desagües de fondo cerrados y tres vertederos funcionando	Comportamiento hidráulico de todos los vertederos, observar si existe vorticidad
	576.72	576.72	792.86	0.07	1	Bocatoma cerrada, desagües de fondo cerrados y vertedero izquierdo funcionando	Comportamiento hidráulico de vertedero izquierdo
Desagüe	551.32	551.32	776.89	0.07	1	Bocatoma cerrada, desagües de fondo abiertos y vertederos cerrados	Comportamiento hidráulico del desagüe
	551.32	551.32	776.89	0.036	1	Bocatoma cerrada, desagües de fondo abiertos y vertederos cerrados	Comportamiento hidráulico del desagüe
Bocatoma	600	103	792.86	0.07	1	Bocatoma funcionando, desagües de fondo abiertos y vertederos cerrados	Comportamiento hidráulico de la bocatoma

Tabla 2.- Condiciones de las simulaciones realizadas

5.2 Rugosidad

En la Tabla 3 se muestran los coeficientes de Manning que fueron determinados para la sección de aforo de la estación río Jubones, San-Francisco.

SITIO	COEFICIENTE DE MANNING
Canal principal	0,070
Riveras de inundación	0,080

Tabla 3.- Coeficientes de Manning para la sección de aforo río Jubones, San Francisco

Fuente: (Enerjubones, Diseño Definitivo, Proyecto Minas San Francisco, Informe de Hidrología y Sedimentología 2011)

También se ha creído conveniente hacer simulaciones con un coeficiente de Manning más bajo por lo que se ha escogido el coeficiente de rugosidad de 0.036 el cual está dentro del rango de los coeficientes de Manning comúnmente usado para estudios de ríos de montaña.

5.3 Definición del dominio del espacio de simulación numérica

Es importante para la creación de la malla de modelización, definir el dominio de espacio más apropiado. Para simular el flujo en el embalse del proyecto, y debido a que SSIIM trabaja en Flujo Subcrítico, se procedió a establecer el tramo de estudio mediante la implementación de un modelo unidimensional con herramienta HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*), que ha permitido establecer el punto en el cual el nivel de agua tiende a estabilizarse en una cota cercana al NAMO y que genera así un espejo de agua superficial casi horizontal. ⁽²¹⁾

Para la construcción del modelo unidimensional se ha ingresado las secciones de la zona de modelación especificándose los valores y la distribución de la rugosidad y los parámetros de contracción y expansión respectivos (Tabla 3). Las secciones transversales de modelación han sido definidas con espaciamiento de 10 m a fin de minimizar errores comunes de continuidad y cambios de régimen.

La Figura 11 indica los niveles de agua del remanso para diversos caudales. Se puede observar que para todos los ensayos el flujo es subcrítico. En el eje X se aprecia la distancia desde la zona de compuertas. Para la malla tridimensional se determinó contar una longitud de 507.63m, la cual asegura que la sección de entrada del mallado se encuentra dentro del embalse y su condición es subcrítica.

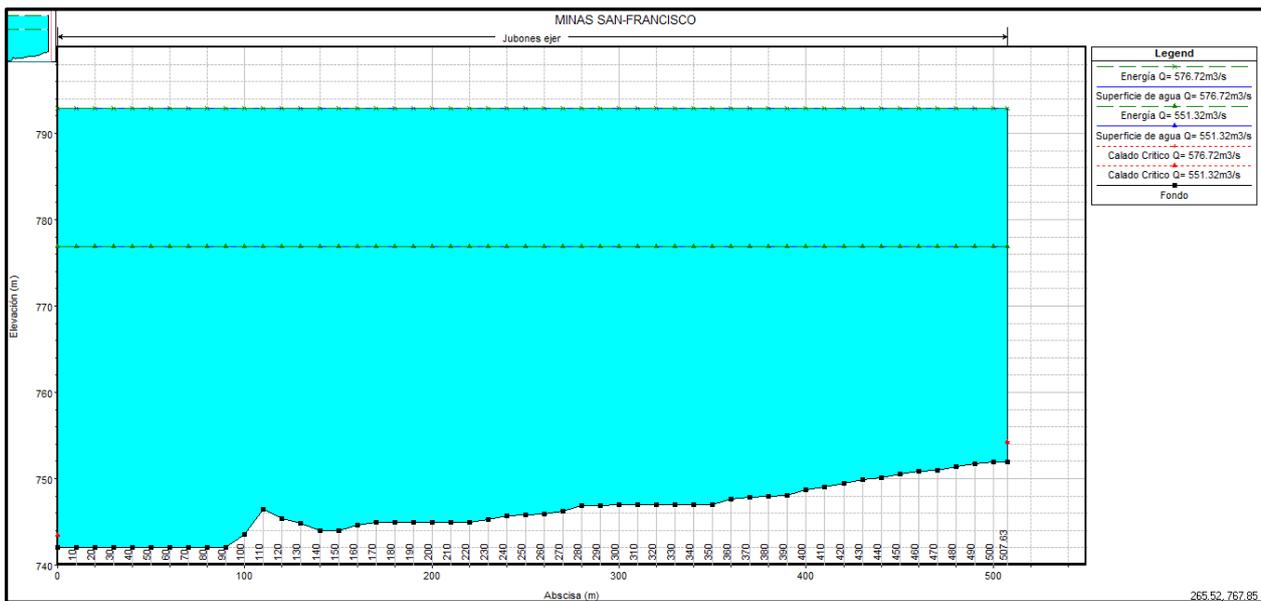


Figura 11.- Comprobación de Flujo Subcrítico para las cotas 792.86 y 776.89 m.s.n.m.

²¹ (Vásquez 2003)

5.4 Simulación del Flujo

5.4.1 Tres Vertederos en funcionamiento

Para este escenario se realizó dos simulaciones, como se describe en la Tabla 4.

Simulación del flujo de agua con tres vertederos en funcionamiento		
Condiciones Iniciales		
	Simulación 1 Compuertas totalmente abiertas	Simulación 2 Compuertas semiabiertas
Caudal	1554 m ³ /s	1000 m ³ /s
Rugosidad Manning	0.07	0.07
Nivel de agua	792.86 m.s.n.m.	792.86 m.s.n.m.
Temperatura del Agua	20 °C	20 °C

Tabla 4.- Condiciones iniciales tres vertederos en funcionamiento

Debido a que el nivel del embalse es el mismo, se ha trabajado con una sola malla para las dos simulaciones, por lo que tan solo se ha cambiado el caudal en el archivo control del modelo, y se ha hecho el respectivo bloqueo para las compuertas semiabiertas.

La forma en planta del cuerpo de agua que se ha modelado corresponderá a la descrita por la cota batimétrica límites de 787 m.s.n.m.

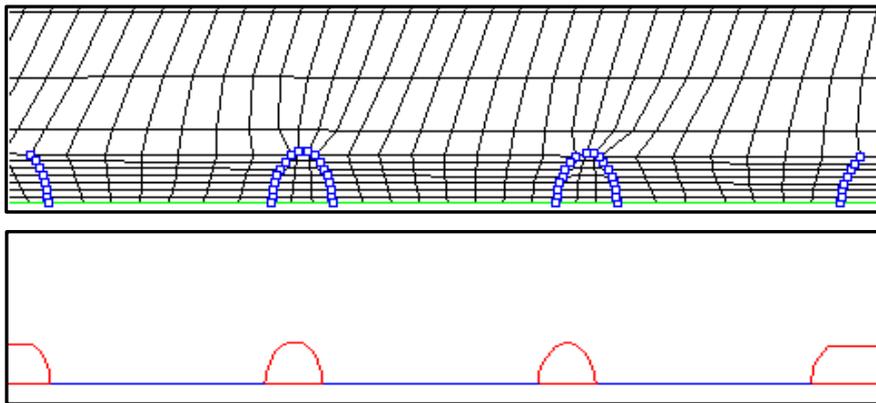


Figura 12.- Generación de pilas para los tres vertederos en funcionamiento simultáneo

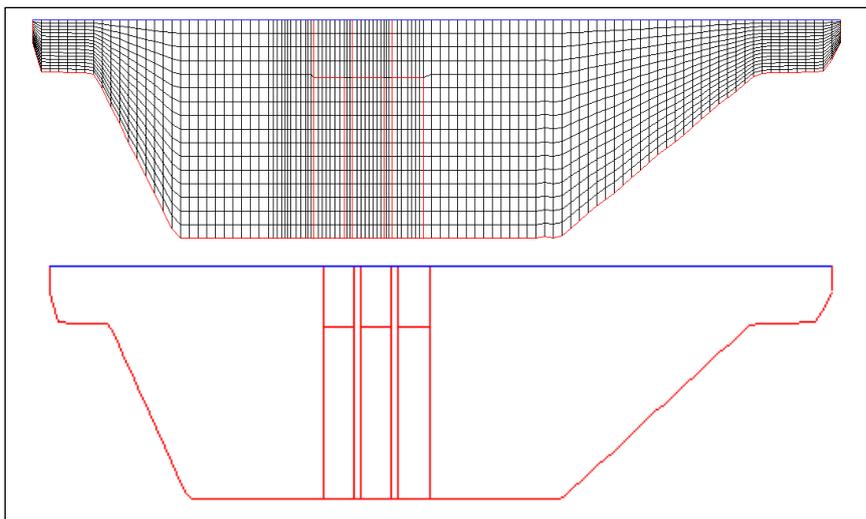


Figura 13.- Pantalla de la presa con sus respectivos bloqueos

5.4.2 Vertedero Izquierdo

Simulación del flujo de agua con vertedero izquierdo	
Condiciones Iniciales	
Caudal	576.72 m ³ /s
Rugosidad Manning	0.07
Nivel de agua	792.86 m.s.n.m.
Temperatura del agua	20 °C

Tabla 5.- Condiciones iniciales vertedero izquierdo

Para este ensayo se utilizó la malla generada en el paso previo y tan solo se ha procedido con la simulación numérica para el caudal correspondiente, se bloqueó los vertederos central y derecho (Figura 14).

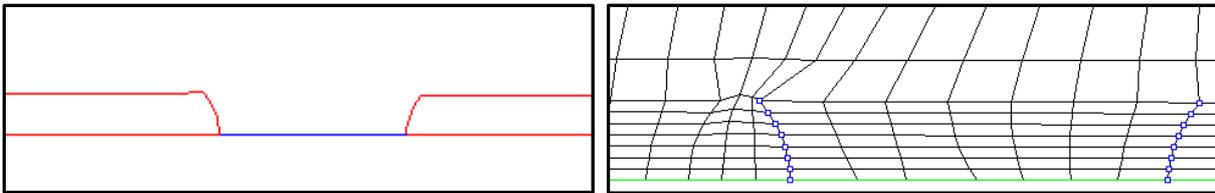


Figura 14.- Bloqueo de vertederos central y derecho, salida vertedero izquierdo

5.4.3 Desagüe de Fondo

Simulación del flujo de agua con tres vertederos en funcionamiento		
Condiciones Iniciales		
	Simulación 1	Simulación 2
Caudal	551.32 m ³ /s	551.32 m ³ /s
Rugosidad Manning	0.07	0.036
Nivel de agua	776.89 m.s.n.m.	776.89 m.s.n.m.
Temperatura del agua	20 °C	20 °C

Tabla 6.- Condiciones iniciales para desagüe de fondo

Para el desagüe de fondo se ha realizado dos simulaciones una con un coeficiente de rugosidad de Manning de $n=0.07$ y la segunda con un $n=0.036$.

La forma en planta del cuerpo de agua modelado corresponde a la descrita por la cota batimétrica límite, para el caudal 576.72 m³/s con el nivel de agua en 776.89 m.s.n.m. y la cota batimétrica límite de 773 m.s.n.m.

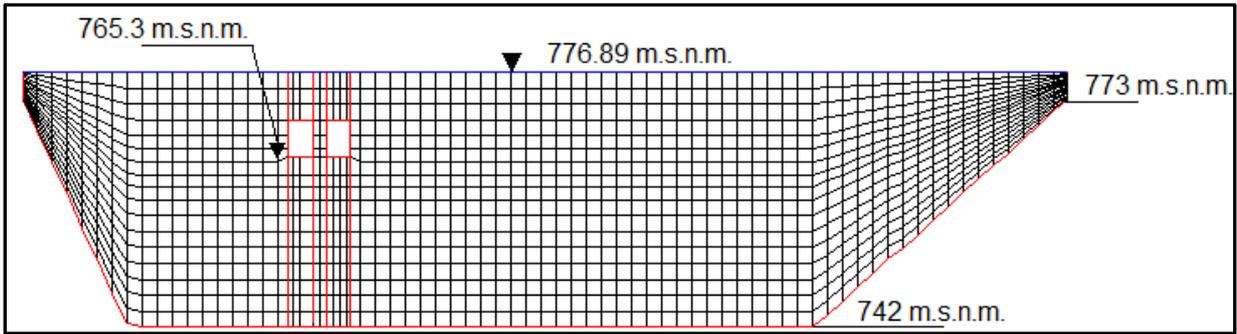


Figura 15.- Sección transversal correspondiente a la presa. Se muestra los niveles así como la abertura en la malla para formar el vertedero respectivo.

Para las pilas de los desagües de fondo, se ha efectuado un procedimiento de bloqueo, obteniéndose como resultado:

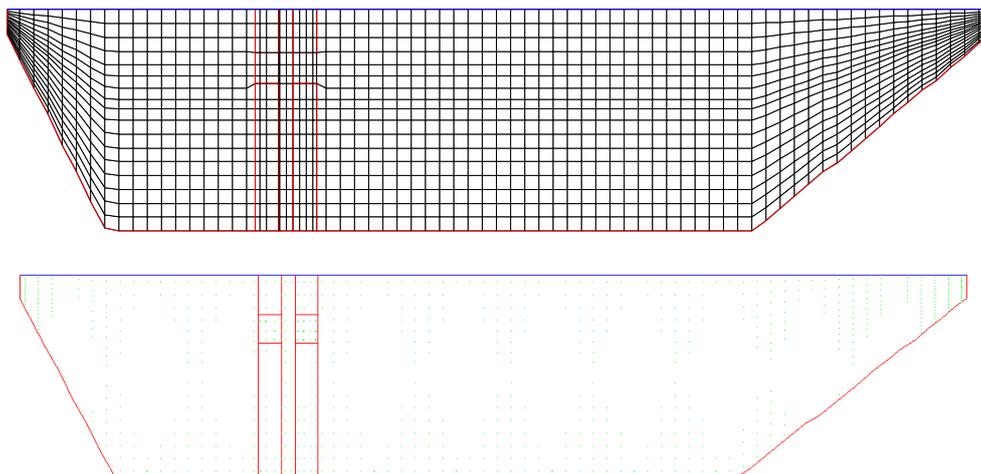


Figura 16.- Malla para la pantalla de la presa, pilas con sus respectivos bloqueos y secciones de salida. El tiempo de simulación para la malla con $n = 0.076$ fue de 90 minutos y para $n = 0.036$ fue de 78 minutos.

5.4.4 Bocatoma

Simulación del flujo de agua para bocatoma	
Condiciones Iniciales	
Caudal	600 m ³ /s
Rugosidad Manning	0.07
Nivel de agua	792.86 m.s.n.m.
Temperatura del agua	20 °C

Tabla 7.- Condiciones iniciales para bocatoma

La forma en planta del cuerpo de agua modelado corresponderá a la descrita por las cotas batimétricas límites, para el caudal $600 \text{ m}^3/\text{s}$ el nivel de agua es 792.86 m.s.n.m. y la cota batimétrica límite es de 787 m.s.n.m.

Para la simulación de la bocatoma se ha utilizado la misma malla empleada para la simulación de los tres vertederos manteniendo la longitud de 510 m , un ancho de 190 m , y un nivel de agua de 56 m . El número de secciones transversales empleado fue de 201 , el número de secciones longitudinales de 105 con un mallado de 2 m aproximadamente en la zona del embalse y un afinado específico para la parte de vertederos y pilas.

Se ha generado los respectivos bloqueos de las pilas de la bocatoma y pantalla de la presa declarando condiciones de pared en las zonas diferentes a la salida de agua,

Figura 17.

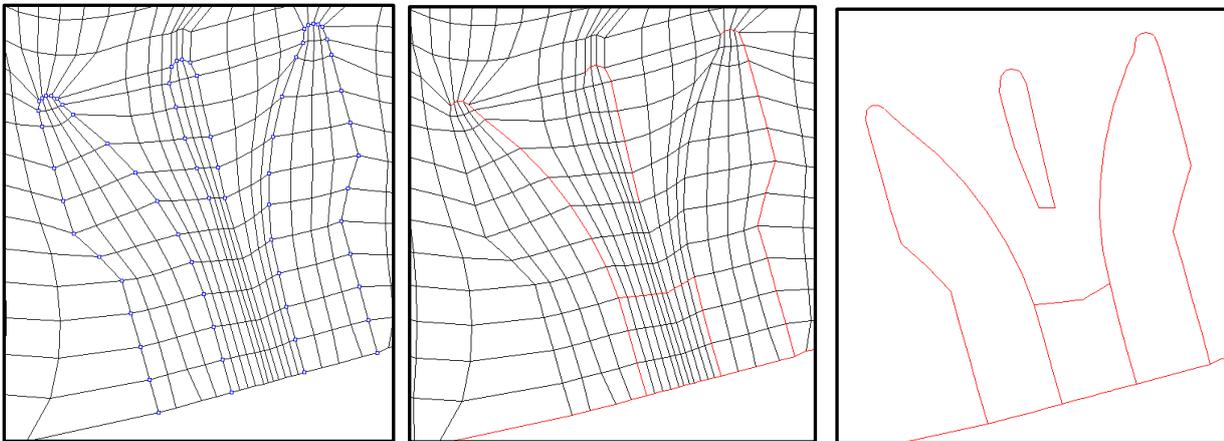


Figura 17.- Bloqueos respectivos para bocatoma, y su resultado final

La batimetría se ha realizado de la misma manera que en las simulaciones anteriores.

En la Figura 18 se muestra los niveles de la bocatoma con su respectiva abertura (color azul), el nivel de agua y así como la forma correcta del fondo del embalse.

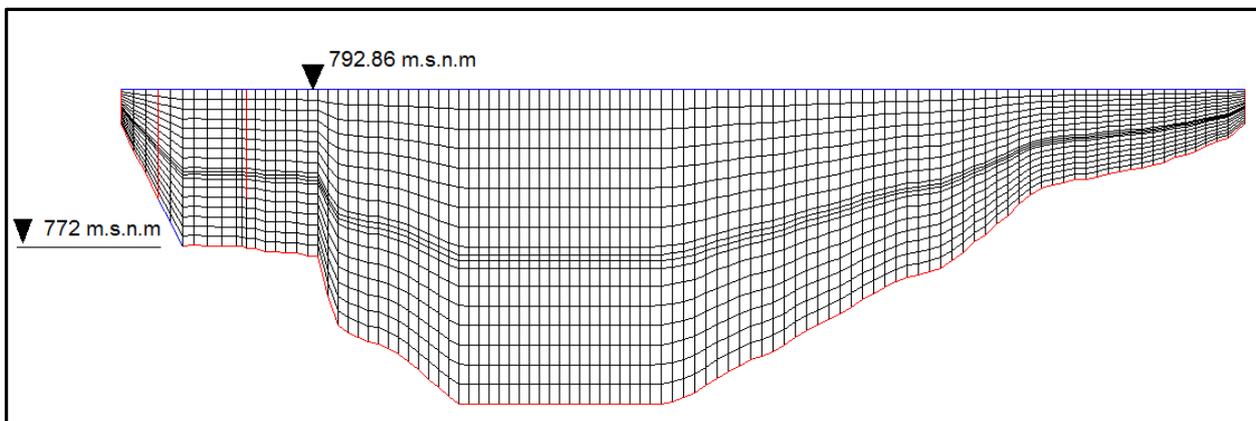


Figura 18.-Sección transversal, zona de bocatoma





6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Tres Vertederos funcionando libremente

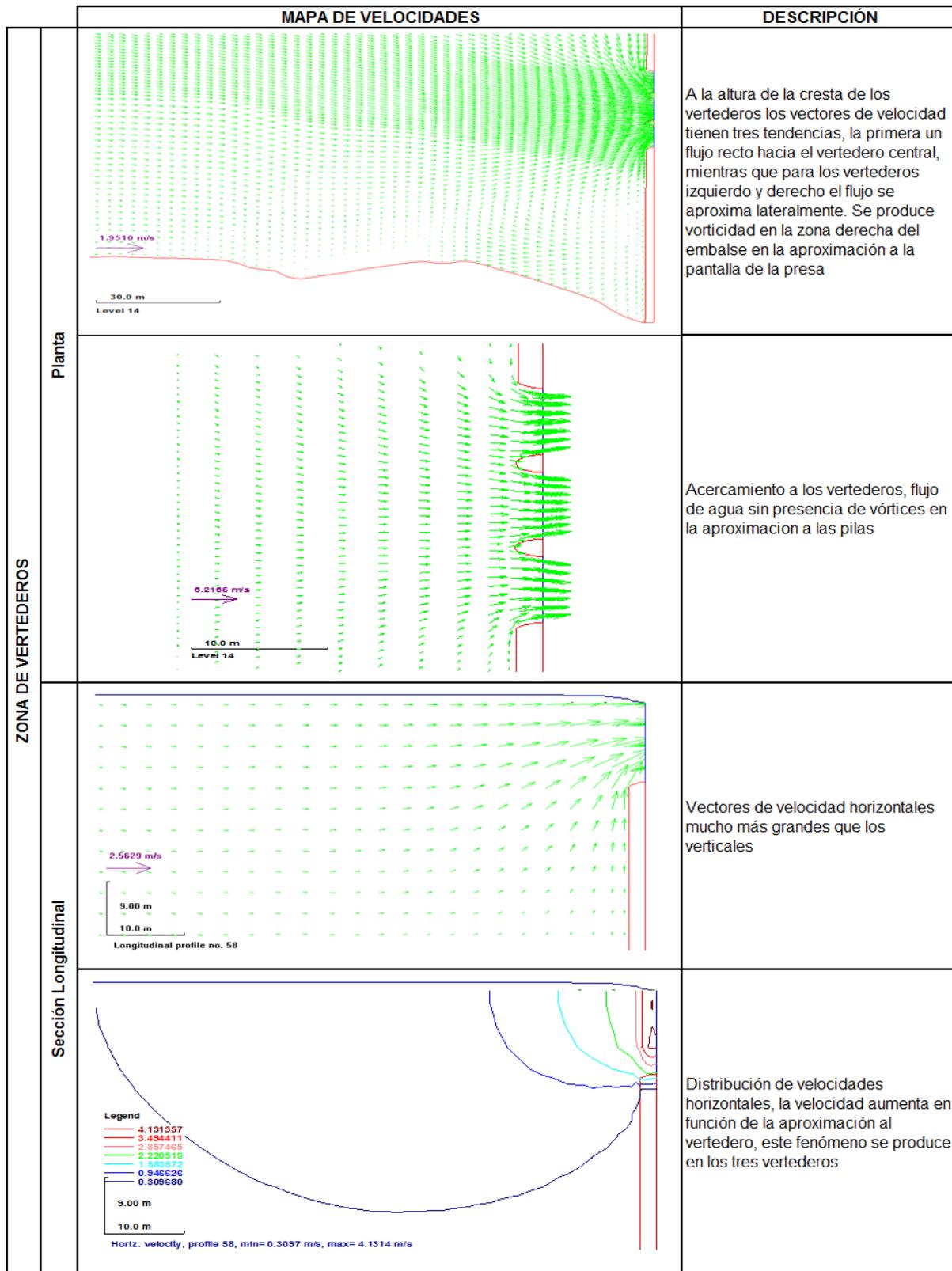


Figura 19.- Vista en planta y sección longitudinal de tres vertederos en funcionamiento simultaneo

Autoría: Carlos Buñay M.
 Freddy Pacheco A.

Todas las simulaciones se han realizado sin velocidades iniciales, por lo que la simulación se ejecuta con velocidades condicionadas únicamente por el caudal y el área de la sección transversal.

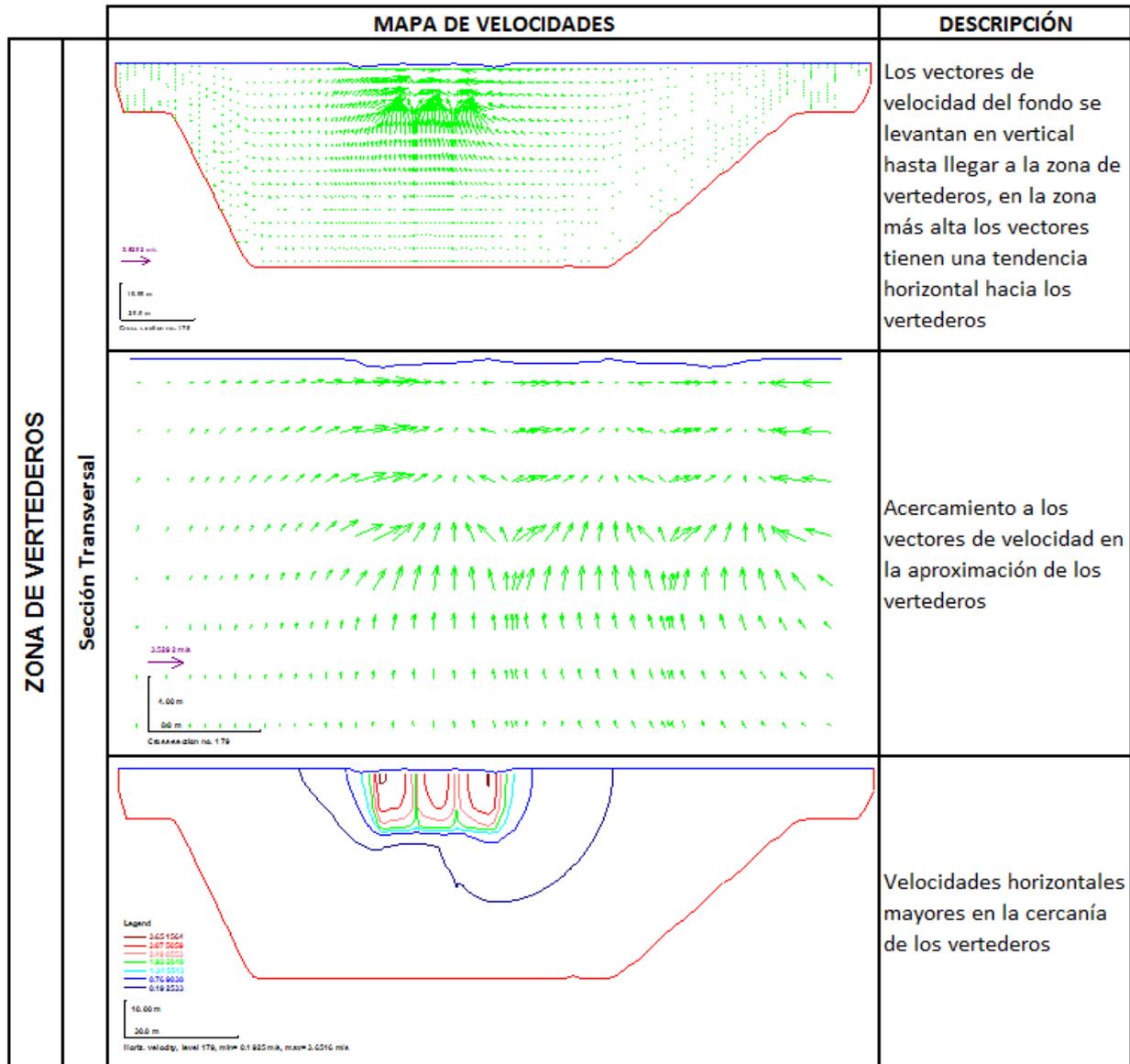


Figura 20.- Sección transversal, tres vertederos en funcionamiento simultaneo

Para los tres vertederos trabajando libres no existe un ensayo realizado en el modelo hidráulico, lo que se pretende con esta simulación fue analizar los resultados obtenidos sin compuertas, permitiendo así al vertedero trabajar libremente. La simulación con SSIIM se realizó con el caudal de crecida de $1554 \text{ m}^3/\text{s}$, distribuyendo $518 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada uno de los vertederos y con un nivel de agua de 792.86 m.s.n.m. , las dimensiones de la malla se encuentran descritas en el acápite 5.4.1.

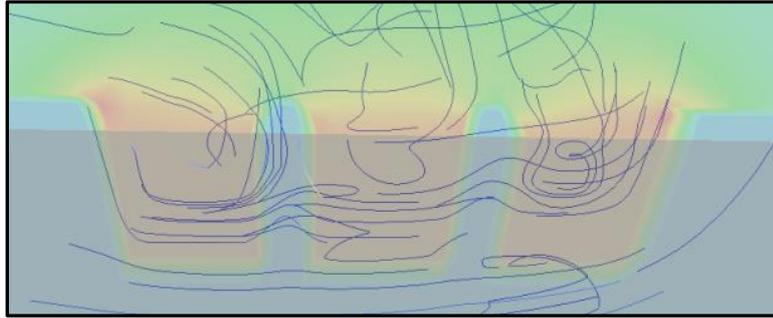


Figura 21.- Detalle de vorticidad tres vertederos trabajando libre (ParaView)

En los resultados donde se analizan los vórtices generalmente en la zona de pilas y margen derecha, se tiene presente que la vorticidad es una medida de la rotación de una partícula de fluido. Por consiguiente, si el flujo se origina en una región irrotacional, continúa siendo irrotacional hasta que algún proceso no uniforme lo altera. Este proceso puede ser el área frontal de la pila en la trayectoria del fluido haciendo rotar las partículas de fluido generando los vórtices laterales alrededor de la pila. ⁽²²⁾

Se observa muy baja vorticidad en la aproximación de los vertederos (Figura 21), al analizar la parte de la carga para los vertederos existe una pequeña vorticidad, que en comparación con el ensayo de tres vertederos con compuertas semiabiertas la vorticidad es mucho menor, esto se realizó con ayuda del programa ParaView, para conseguir una mejor resolución grafica de los resultados.

En una segunda observación se aprecia los vectores de velocidad y la tendencia de flujo, como se muestra en la Figura 22 y Figura 23.

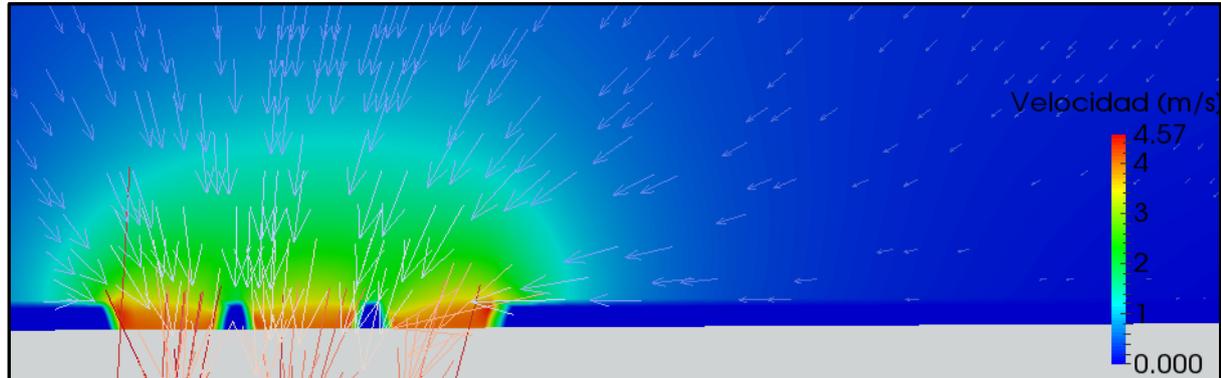


Figura 22. Mapa de velocidades de tres vertederos trabajando libre (ParaView)

²² (MENDOZA y ROSADO 2008)

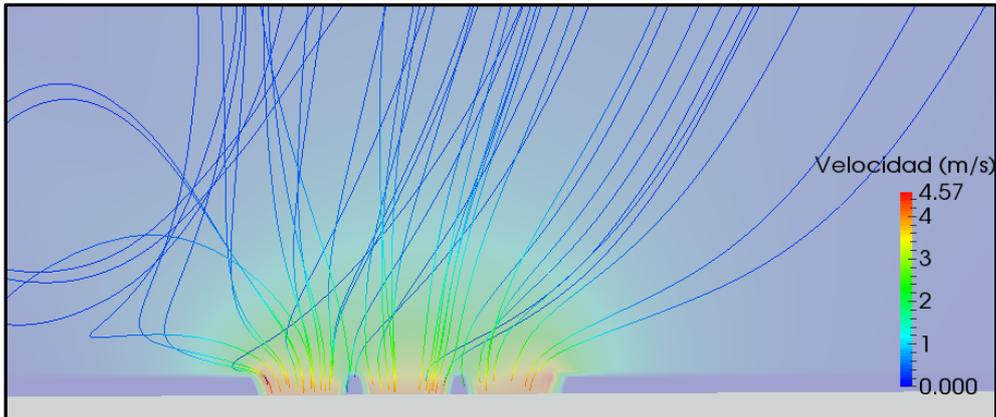


Figura 23.- Líneas de corriente en la aproximación, tres vertederos trabajando libre (ParaView)

En todos los resultados donde se presentan imágenes con las líneas de corriente, las cuales parecerían intersectarse, eso no debe considerarse de esta forma debido a que la presentación es en planta, pero en realidad estas líneas se encuentran en diferentes niveles que al ver en planta darían la idea de intersección.

6.2 Tres Vertederos funcionando con compuertas semiabiertas

		MAPA DE VELOCIDADES	DESCRIPCIÓN
ZONA DE VERTEDEROS SEMIABIERTOS	Planta		<p>A altura de la cresta de los de los vertederos los vectores de velocidad tienen de tres tipos de tendencia, la primera un flujo recto hacia el vertedero central, mientras que para los vertederos laterales el flujo se aproxima lateralmente de izquierda y derecha. Se produce vorticidad en la zona derecha del embalse en la aproximación a la pantalla de la presa</p>
			<p>Acercamiento a los vertederos, visto en el nivel más alto de agua, donde se distingue presencia de vórtices en las zonas de pilas, los vórtices son mucho mayores en los extremos</p>
	Sección Longitudinal		<p>Vectores de velocidad horizontales son mucho más grandes que los verticales. Algunos vectores en la zona de vertederos no siguen una tendencia uniforme hacia la salida, debido a la compuerta que se encuentra allí ubicada, lo que produce variaciones de flujo, esto se da en los tres vertederos</p>

Figura 24.- Vista en planta y sección longitudinal, tres vertederos con compuertas semiabiertas

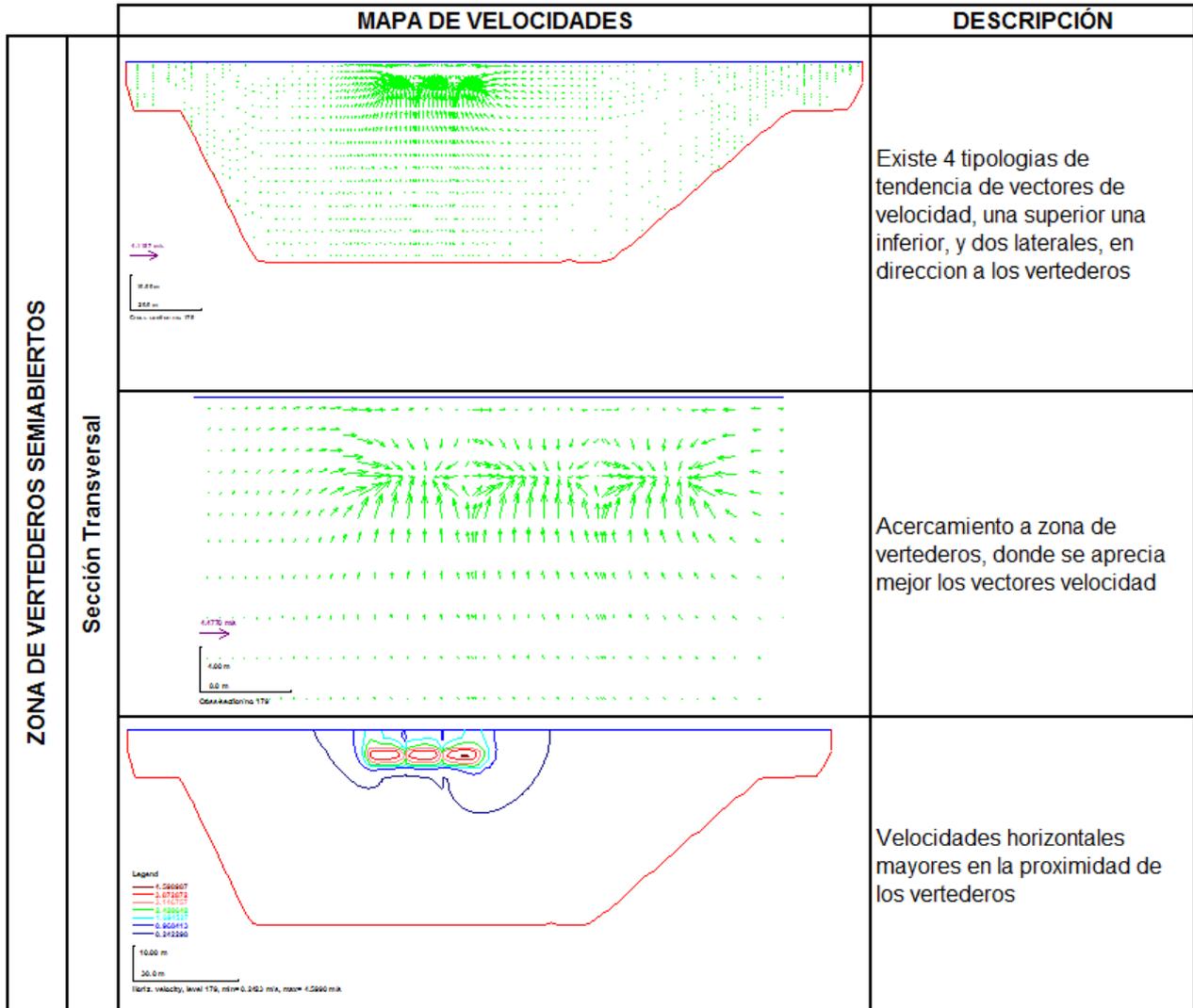


Figura 25.- Sección transversal, tres vertederos con compuertas semiabiertas

En el ensayo de tres vertederos realizado en modelo físico, el objetivo central fue el análisis de vorticidad, el ensayo se realizó con un caudal de $1554 \text{ m}^3/\text{s}$ y con las compuertas de los vertederos semiabiertas, además las compuertas de desagüe de fondo y de bocatoma totalmente cerradas, el nivel del agua para este ensayo fue 792.86 m.s.n.m. , se produce vorticidad en la zona de pilas, mucho mayor en las pilas extremas que en las pilas centrales, como se puede apreciar en la Figura 26.

Para la respectiva comparación se realizó la exportación del archivo Paraview.vtk mismo que fue obtenido de la simulación con SSIM, este archivo con extensión vtk será utilizado para las respectivas interpretaciones en el programa ParaView que tiene una interfaz gráfica mucho más amigable y además es un Software libre mucho más avanzado que permite visualizar las líneas de corriente y vorticidad.

El resultado obtenido con Paraview de esta simulación se observa en la Figura 27, se realizó un análisis de vorticidad en la zona cercana a la presa, lo que concuerda con los resultados del modelo físico, existen vórtices bastante notorios en la aproximación de la cresta de los vertederos, se puede ver que las líneas que representan la vorticidad alcanzan la superficie de agua.

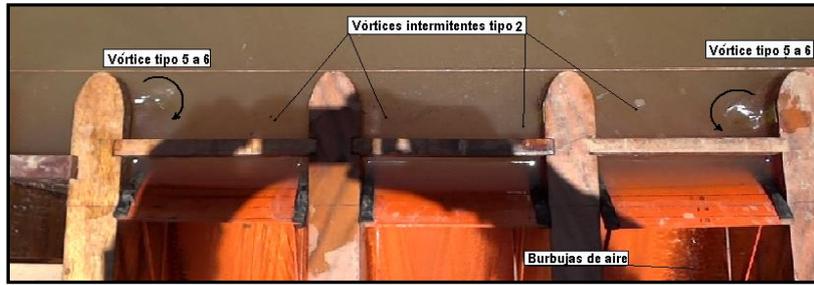


Figura 26.- Vorticidad en las pilas de los 3 vertederos (modelo físico)

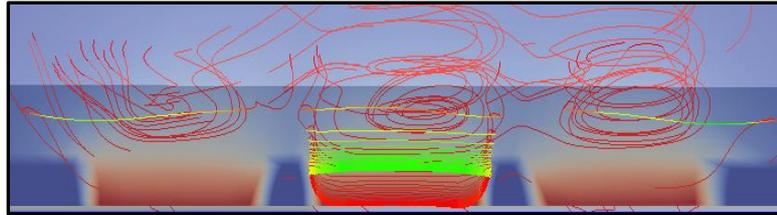


Figura 27.- Vorticidad simulada con SSIIM 1 y vista con ParaView

6.3 Vertedero Izquierdo

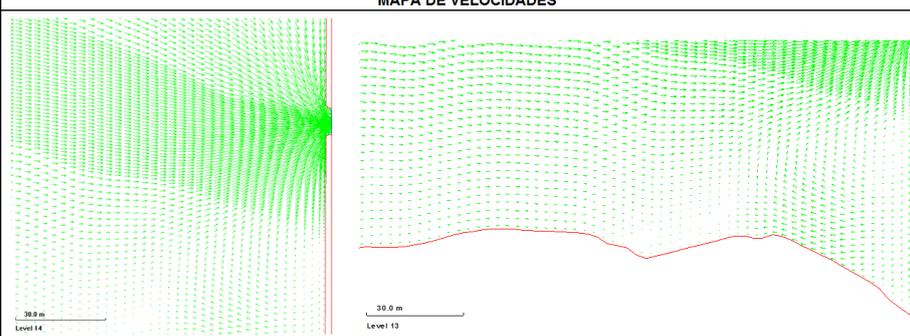
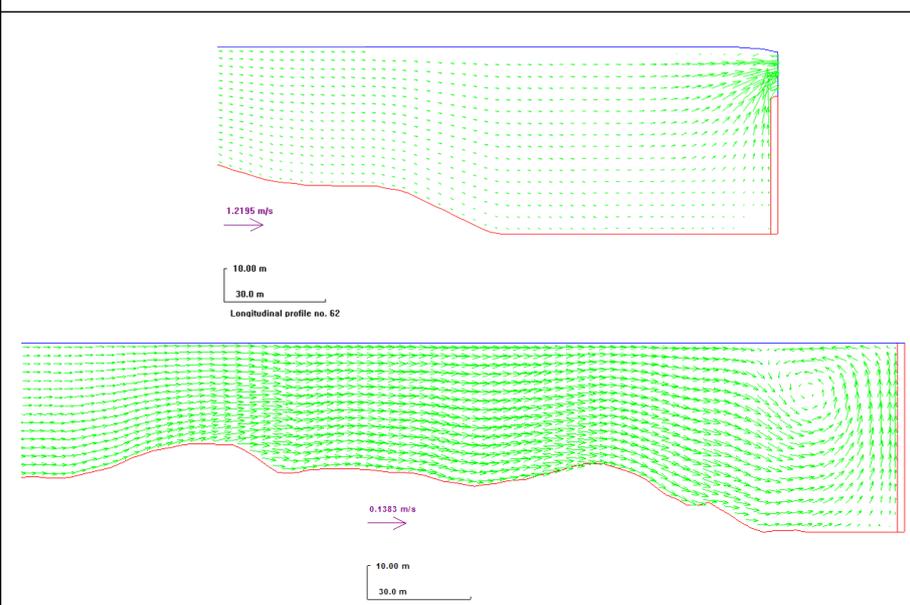
		MAPA DE VELOCIDADES	DESCRIPCIÓN
VERTEDERO IZQUIERDO	Planta		Vista en planta de los patrones de flujo, se observa 4 direcciones principales de flujo en el nivel de salida del vertedero, las velocidades son mayores en la zona de la salida, se aprecia la formación de un vórtice en el margen izquierdo en el nivel 13
	Sección Longitudinal		Existen dos direcciones de flujo predominante en la zona de aproximación al vertedero, una dirección casi horizontal y otra inclinada que va desde el fondo hacia la salida. En la sección longitudinal perteneciente al margen derecho se identificó un vórtice vertical

Figura 28.- Secciones longitudinales y vista en planta de los patrones de flujo para vertedero izquierdo

En la Figura 28 la simbología con la flecha de color morado no indica la magnitud del vector velocidad si no tan solo la escala gráfica del vector, esto pasa para todas las imágenes de SSIIM.

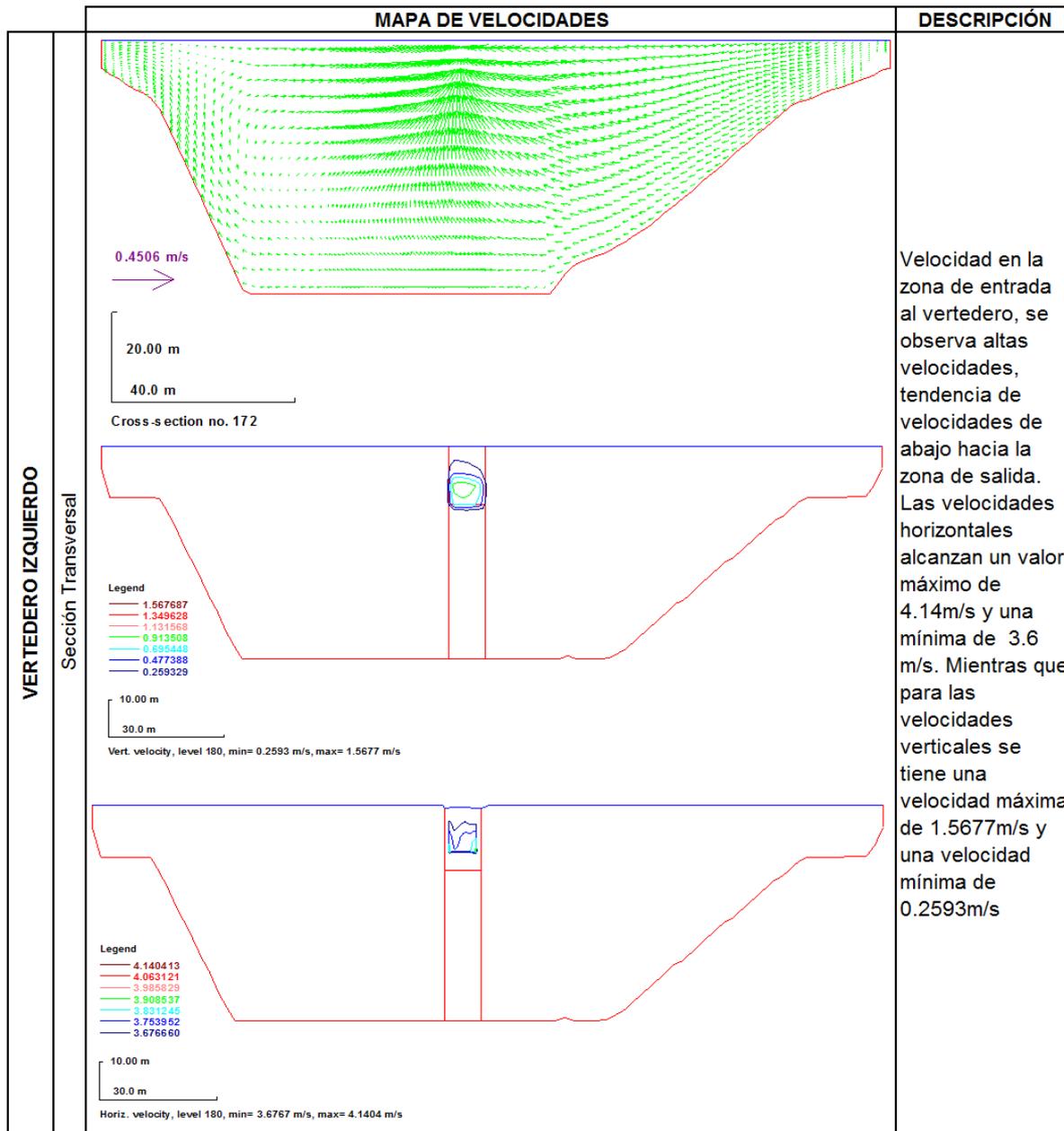


Figura 29.- Secciones transversales vertedero izquierdo

En la Figura 30 el flujo de aproximación hacia el vertedero izquierdo es el mismo para el modelo físico y numérico, además el flujo tiene tres corrientes principales para la aproximación, no se observa formación de vórtices en ninguno de los dos casos, esto se debe a que la compuerta está totalmente abierta, en los dos casos se observa que el flujo aumenta su velocidad al ingresar al vertedero. En la margen derecha existe menos líneas de corriente que en la margen izquierda. No se ha realizado una comparación con las velocidades debido a que no existe medición de las mismas en el modelo físico para este ensayo.

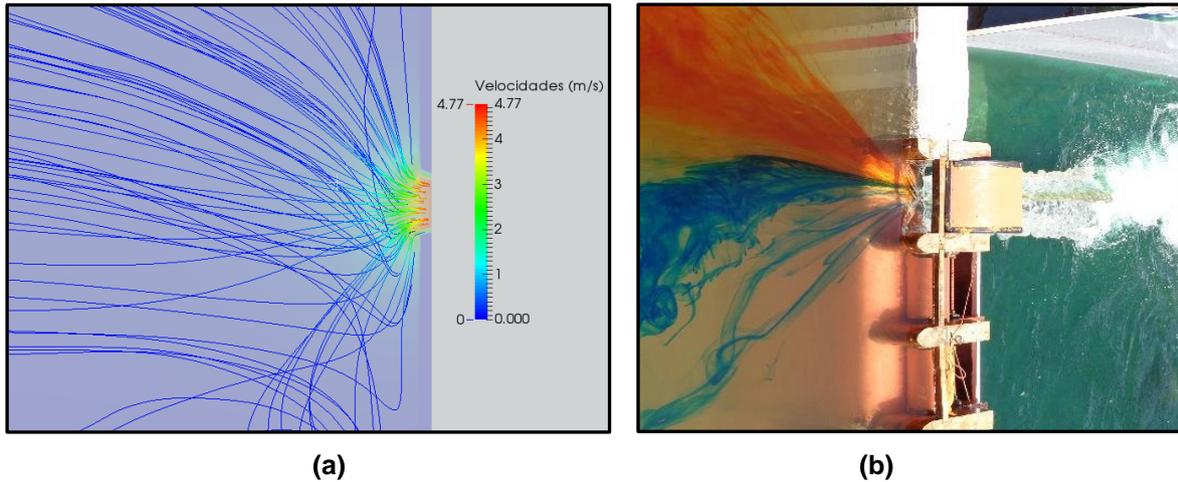


Figura 30.- Patrones de flujo en la aproximación al vertedero izquierdo, (a) modelo numérico, (b) modelo físico

6.4 Desagüe de Fondo

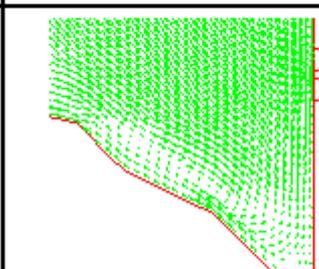
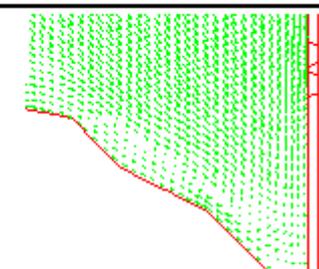
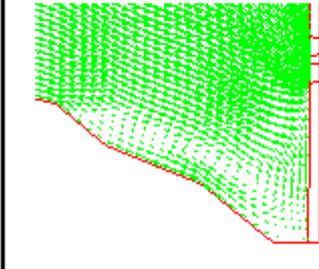
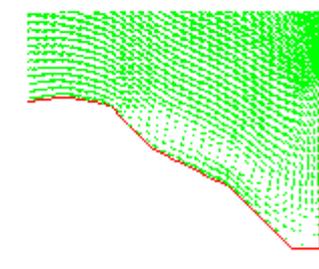
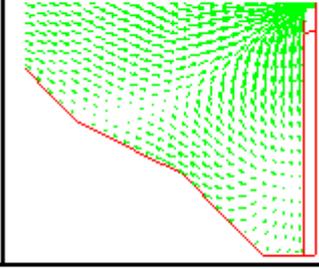
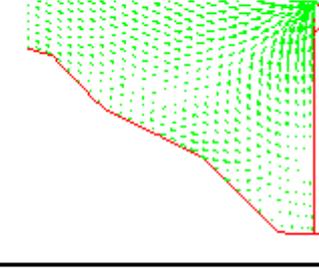
FORMACION DE VORTICES, ANALISIS EN EL MARGEN DERECHO			
Nivel	$K_s=0.036$	DESCRIPCION	$K_s=0.07$
2		Formación de vórtice al lado derecho del embalse	
7		el vórtice se mantiene en este nivel, se puede observar que los vectores de velocidad se van acercando a la presa	
18		Formación del flujo en el espejo de agua, se puede ver tres direcciones de flujo en esta zona	
Se puede ver en los mapas de velocidad obtenidos de SSIIM que la dimensión de los vectores velocidad para $k_s=0.036$ es más grande que para $k_s=0.07$, se puede observar formación de vórtices y flujo preferencial.			

Figura 31.- Vórtice en la margen derecha para desagüe de fondo

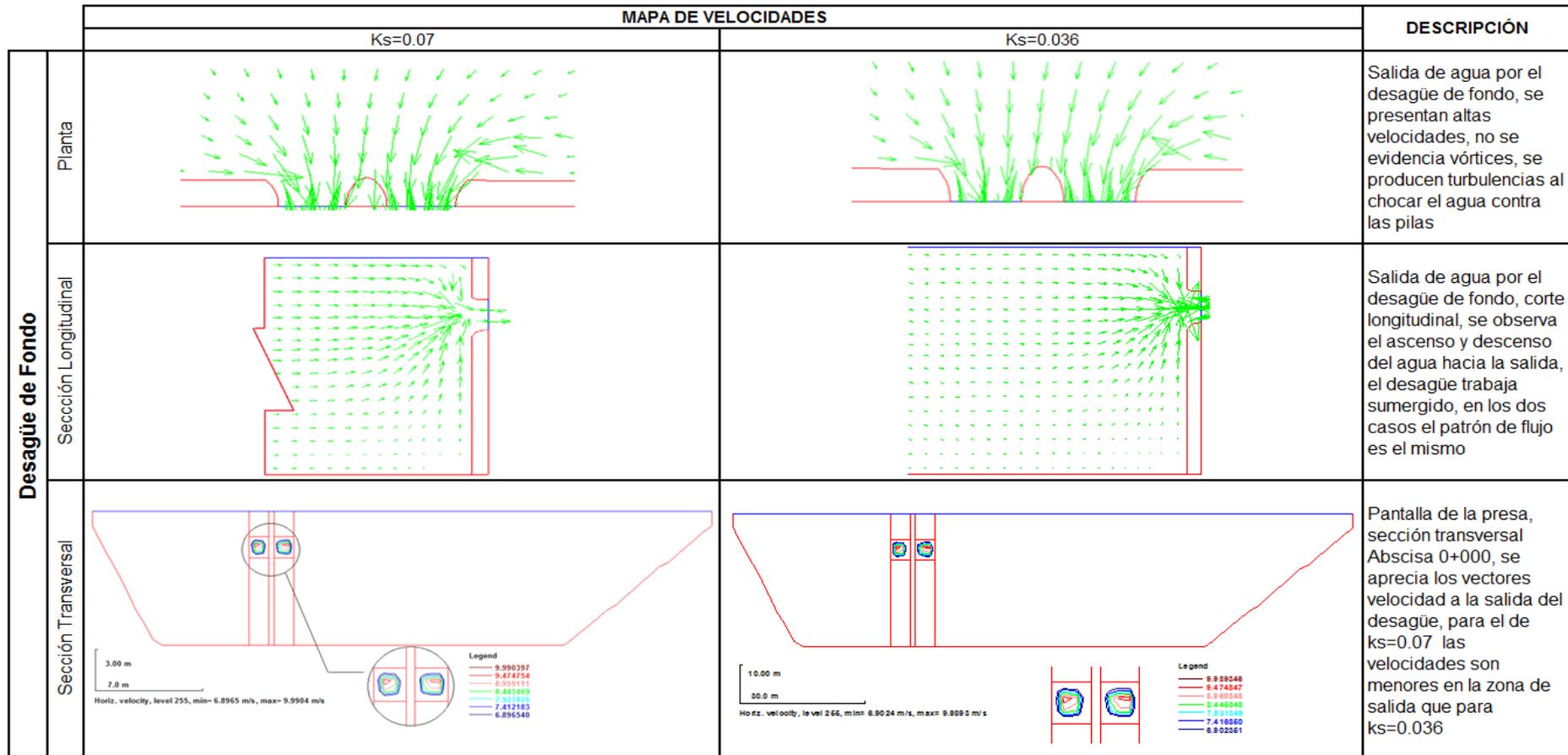


Figura 32.- Resultados del modelo numérico SSIIM para desagües de fondo

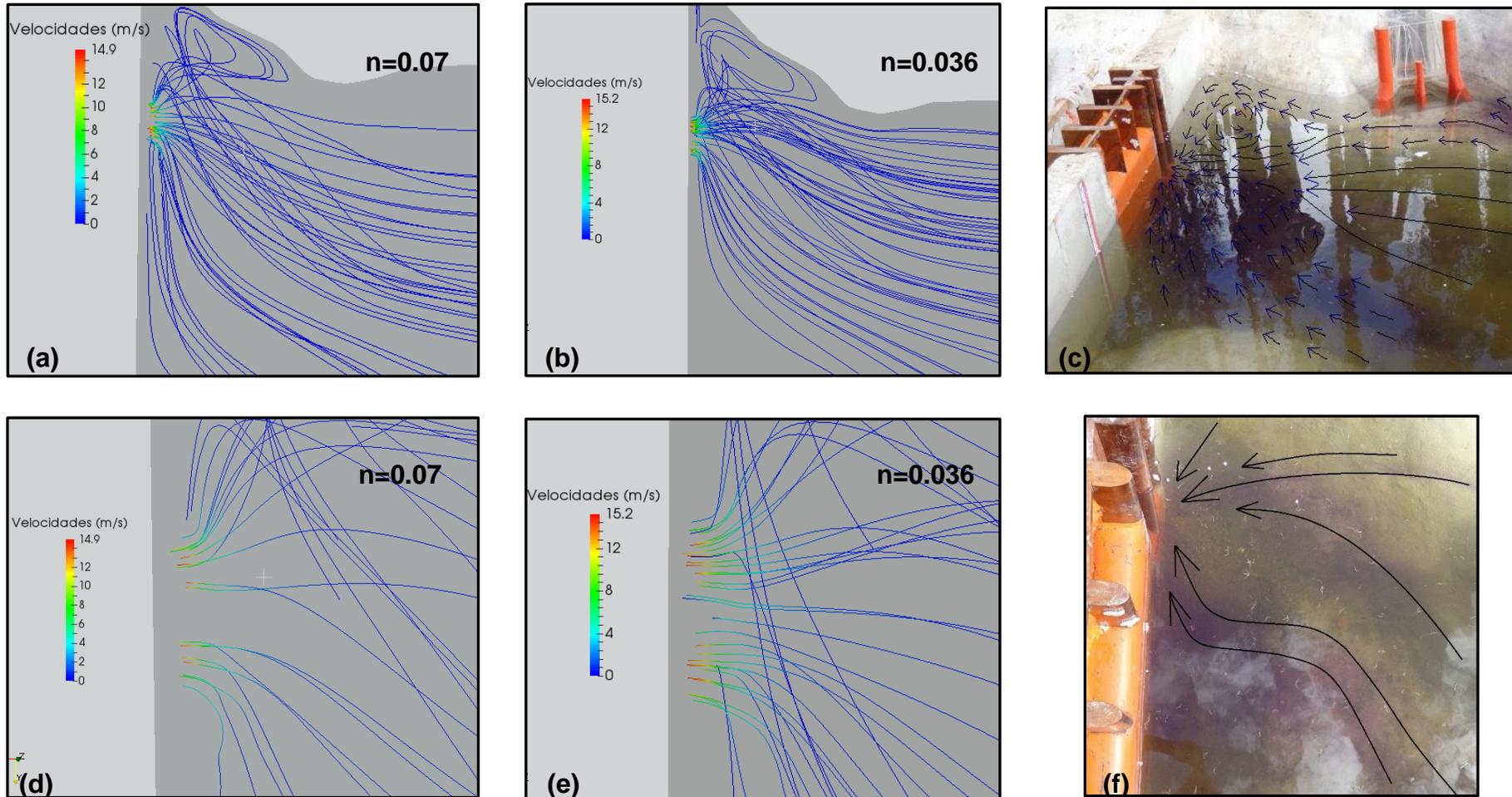


Figura 33.- Patrones de flujo a la entrada de los desagües de fondo, (a), (b), (d), (c) modelo numérico, (c) y (f) modelo físico

En la Figura 33 al comparar los resultados del modelo numérico con el modelo físico del flujo de aproximación ((d) y (e)) hacia los desagües se observa que los patrones de flujo tienen la misma tendencia que el modelo Físico, al comparar los resultados del modelo numérico se aprecia que para un n de Manning menor se dan mayores velocidades así para un n de Manning de 0.07 se obtiene una velocidad máxima de 14.9 m/s y para un n de Manning de 0.036 se obtiene una velocidad máxima de 15.2 m/s. En el modelo físico se ve que existe la formación de un vórtice anti horario en la margen derecha del embalse en la zona intermedia entre los desagües de fondo y la bocatoma Figura 33 (c), el cual es verificado por el modelo numérico para las dos simulaciones Figura 33 (a), (b).

No existe formación de vórtices a la entrada de los desagües de fondo tanto en el modelo físico como numérico, cabe resaltar que los desagües para estas simulaciones numéricas trabajaron sumergidos tal y como se lo realizó en el modelo físico. Como se esperaba en las simulaciones la velocidad aumenta en la salida de los desagües.

6.5 Bocatoma

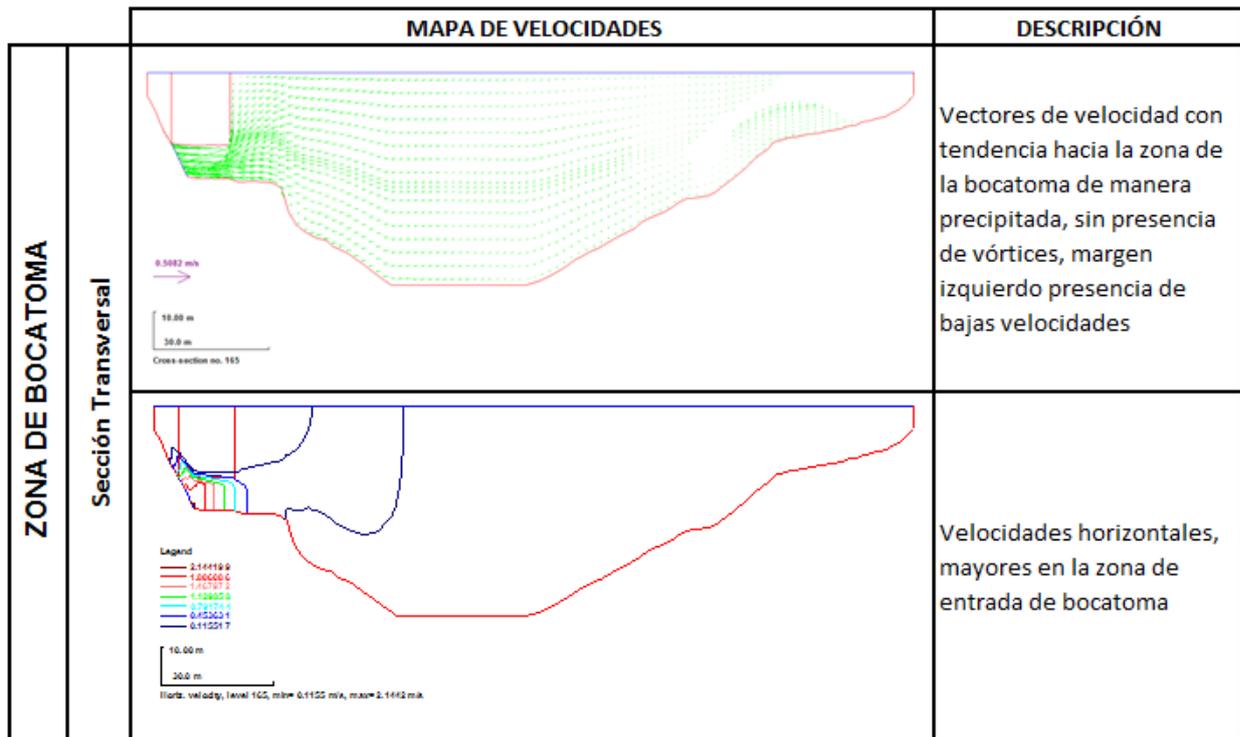


Figura 34.- Sección transversal, bocatoma

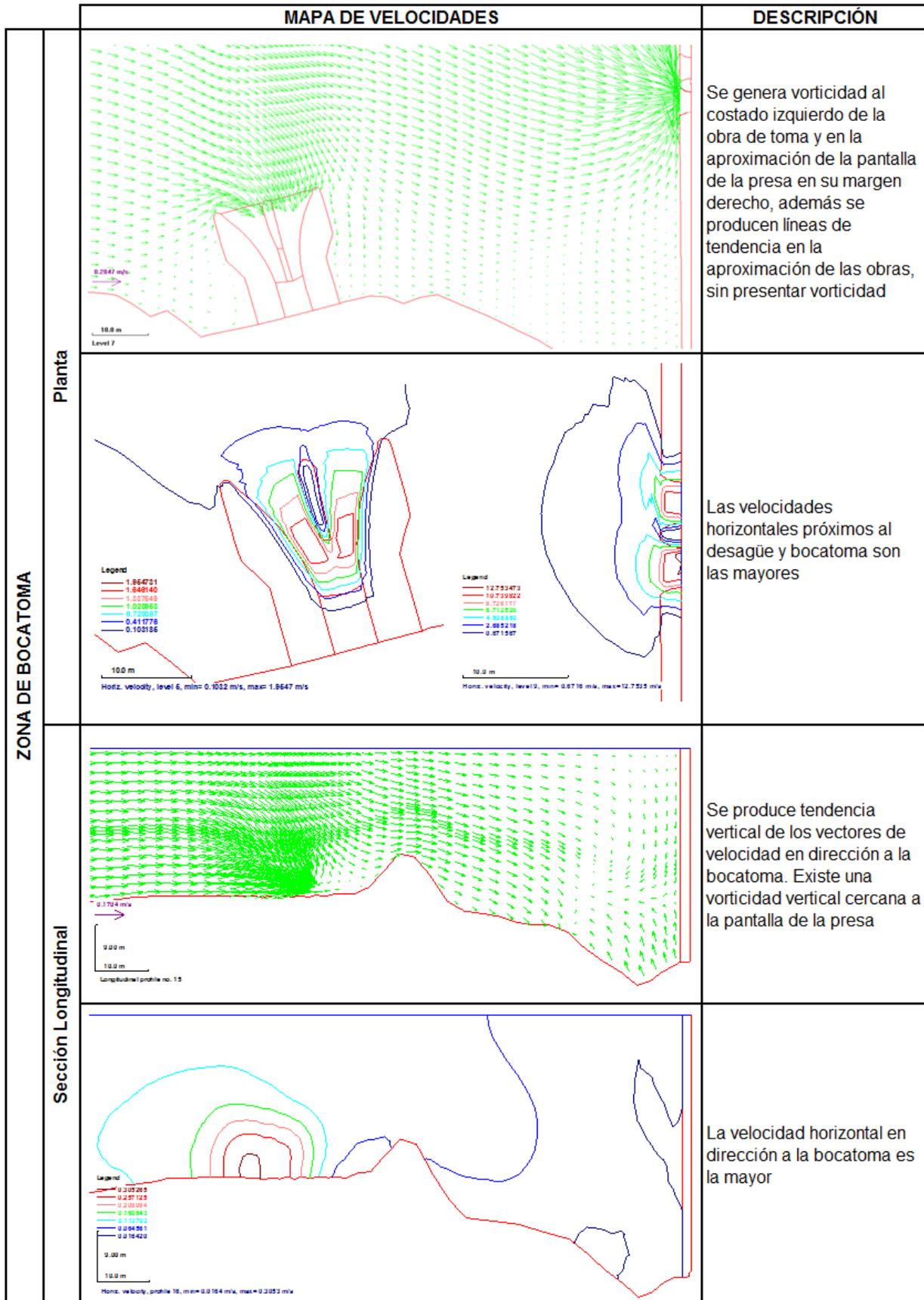


Figura 35.- Vista en planta y sección longitudinal, bocatoma

El análisis de la bocatoma se realizó en función de uno de los ensayos del modelo hidráulico, con un caudal de $600\text{m}^3/\text{s}$, la bocatoma capta $103\text{m}^3/\text{s}$, y los desagües el caudal restante, en la Figura 36 el patrón del flujo, vorticidad en la zona izquierda de la bocatoma y flujo preferencial hacia la bocatoma son evidenciados tanto para modelo físico como para el numérico.

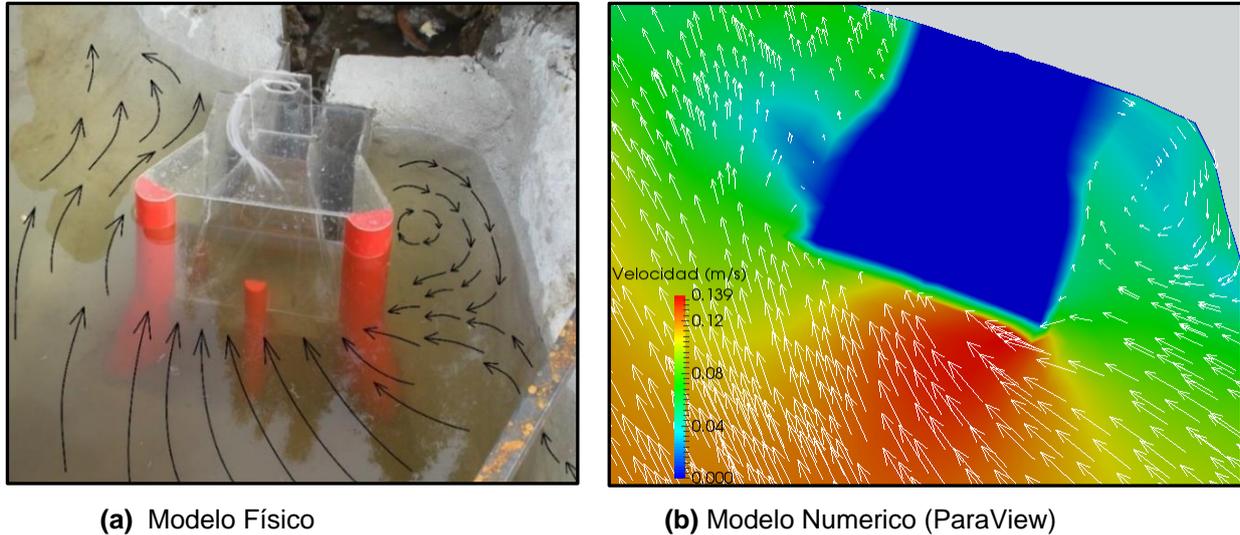


Figura 36.- Líneas de corriente próximas a la bocatoma

En los resultados obtenidos con ParaView para la obra de toma Figura 36 (b), Los vectores de velocidad son mayores en la proximidad de la bocatoma.

En la Figura 37 se observa las líneas de corriente donde la velocidad máxima es de 12.9 m/s se produce en la zona de los desagües de fondo y en la bocatoma se presentan velocidades próximas a 1m/s . Se puede evidenciar vórtices al costado derecho de la toma y los flujos preferenciales de la bocatoma y desagües.



Figura 37.- Líneas de corriente (ParaView)

6.6 Embalse

Al observar todas las imágenes para las obras anexas se ha identificado puntos de interés para el análisis del embalse, se realiza para el nivel normal máximo de operación (NAMO), el cual pertenece al ensayo de los tres vertederos trabajando con las compuertas totalmente abiertas, se analizan los siguientes casos:

- Margen derecha junto a la zona de la presa.
- Margen izquierda a la mitad del embalse.
- Margen Izquierda junto a la presa.
- Sección transversal donde se encuentra ubicada la ataguía.

Las imágenes se presentan a diferentes niveles, los cuales se han considerado críticos o importantes para el proyecto Minas San Francisco como se muestra en la Figura 38.

		MAPA DE VELOCIDADES	DESCRIPCIÓN
EMBALSE	Planta		<p>Margen izquierdo abscisa 0+045 hasta 0+349 se observa velocidades bajas por lo que tiende a ser una zona de deposición de sedimento, al ir al centro del embalse el flujo sigue un patrón curvo como se puede apreciar, formación de un remolino, en esta zona se encuentra la ataguía, lo que origina una disminución de velocidad.</p>
	Sec. Longitudinal		<p>Parte de la Sección longitudinal central del embalse del río Jubones, desde la abscisa 0+000 hasta 0+200 se aprecia el flujo sobre la ataguía</p>
	Sección Transversal		<p>Sección transversal Abscisa 0+150, se observa la ataguía y una posible zona de sedimentación en color azul, se ve que la velocidad es mayor en la zona central, el flujo tiende a irse a la derecha (en la imagen a la izquierda). Presenta velocidades bajas, por lo que se corrobora zona de sedimentación, margen derecha presenta mayores velocidades que la izquierda</p>
	Márgenes		<p>Primera imagen corresponde al Margen izquierdo junto a la presa, se puede visualizar la formación de un vórtice en sentido antihorario, este vórtice se forma desde los 10 m de profundidad hasta la superficie, tiene velocidades bajas, por lo que podría ser un lugar de deposición de material. En la segunda imagen se puede apreciar un vórtice este se forma desde el nivel más bajo hasta la superficie, este alcanza velocidades de hasta 0.534m/s, siendo mayor la velocidad en el lado derecho que en el izquierdo</p>

Figura 38.- Análisis de puntos específicos del embalse



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha construido el modelo numérico SSIIM para el estudio de los procesos de flujo en las obras anexas del proyecto de generación hidroeléctrica Minas San Francisco.
- Se ha realizado la simulación de los procesos de flujo de régimen subcrítico para la aproximación a los vertederos de excesos, desagüe de fondo y bocatoma, así como la validación de los resultados que fueran obtenidos mediante estudio en modelo físico realizado por el Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.
- La simulación numérica mediante SSIMM ha permitido identificar y caracterizar campos de flujo en la aproximación a las obras anexas. Dichos campos de flujo corresponden en buena medida a las características y valores que fueran reportados por el estudio en modelo físico.
- Respecto a fenómenos locales, las simulaciones realizadas permiten confirmar la presencia de vórtices. De manera particular, se ha confirmado la presencia de un vórtice de flujo horario que se produciría en la margen derecha del embalse en la zona de aproximación a la presa. El modelo matemático indica que el vórtice presenta velocidades de 0.529 m/s.
- Se confirma de esta manera la necesidad de realizar los ajustes de diseño que fueran recomendados por el estudio en modelo físico a fin de garantizar seguridad contra procesos de socavación lateral junto a la bocatoma.
- Para todas las simulaciones, en la margen izquierda, se confirma la presencia de un vórtice antihorario, con velocidades bajas. Para la simulación numérica realizada con tres vertederos operando y para un caudal de $1554\text{m}^3/\text{s}$, la velocidad máxima reportada para vórtices observados, es de 0.168m/s. El fenómeno de remolinos con bajas velocidades se replica aproximadamente a 180m aguas arriba de la presa, esto se debe a la presencia de la ataguía y a la configuración curva de la margen izquierda del embalse en esta zona, que alcanza una velocidad media de 0.08 m/s Ver Figura 38.
- En la simulación de los desagües de fondo se reporta la ubicación de vórtices y características de patrones de flujo, similares a los obtenidos en el modelo físico. La Figura 33, del presente estudio indica tres direcciones principales hacia la aproximación al desagüe. Para este ensayo, con el desagüe de fondo sumergido con una carga de 11.59m, la simulación numérica reporta velocidades de aproximación hasta de 15.2m/s a la salida.
- El análisis de sensibilidad realizado en el presente estudio, respecto al efecto del parámetro de rugosidad en las zonas de aproximación, permite reportar un aumento de tan solo 1.97% en la velocidad máxima. Una variación del coeficiente de rugosidad de un valor de 0.07 a un valor de 0.36, implica una variación en la velocidad media simulada en la aproximación de 14.9m/s a 15.2m/s.
- Para el vertedero izquierdo, la simulación numérica, reporta una velocidad de 4.77m/s. Los patrones de flujo obtenidos con SSIIM guardan concordancia con los patrones reportados en el modelo físico. Se confirma adicionalmente el flujo preferencial reportado y se puede concluir que la distribución de velocidades encontrada ratifica los mayores valores en la zona derecha del vertedero.



- En la modelización numérica, para la simulación de operación simultánea de tres vertederos con flujo libre, se reporta la presencia de vórtices que no fueron detectados en el estudio en modelo físico. La simulación ha permitido identificar el campo de velocidades en la zona de aproximación a los vertederos, estableciéndose dos tipologías, tanto en la zona superior como en la zona inferior. Se concluye que las velocidades horizontales son mayores que las componentes verticales. Las velocidades de aproximación a los vertederos que trabajan libremente están próximas a 4.57 m/s.
- Para los tres vertederos semiabiertos los patrones de flujo son similares a los obtenidos en la simulación de los tres vertederos trabajando libremente, con la diferencia que existe un aumento de velocidades en la aproximación al vertedero, debido a las compuertas. Se constató la presencia de vórtices en la zona de pilas, al realizar el respectivo análisis de vorticidad mediante el software ParaView corroborando con los resultados del modelo físico.
- En la aproximación a la obra de toma, se ha observado bajas velocidades hasta de 0.139 m/s, como se muestra en la Figura 36 b. La simulación numérica, confirma la presencia de vorticidad al costado izquierdo de la bocatoma, así como las líneas de corriente semejantes a las del modelo físico.
- El estudio establece que es necesario determinar el dominio de régimen subcrítico de manera previa a la construcción del modelo matemático SSIIM. Para ello se recomienda el empleo de un modelo matemático unidimensional, como HEC-RAS.
- La estabilidad de la ejecución del modelo SSIIM depende en gran medida de la ortogonalidad de los volúmenes finitos que se definan al momento de construir las mallas. En las zonas del proyecto, en donde la arquitectura de las obra no presenta ortogonalidad, el modelo no converge, teniéndose residuales variables. Por otro lado, la construcción de las fronteras físicas a ser simuladas mediante mallas muy finas, tienen un efecto importante en al aumento del tiempo de simulación.
- Considerándose que la elaboración del mallado es el proceso que debe tener mayor atención en la implementación del modelo SSIIM, ya que demanda tiempo y es un proceso crítico para la construcción de un modelo versátil y suficientemente adecuado, se recomienda para análisis de obras similares un mallado con volúmenes del orden de 2x2x2, mismo que resultó adecuado para el estudio realizado.
- Para que no existan distorsiones no deseadas en la configuración de la malla, el estudio establece que es necesario escoger de manera suficientemente adecuada la cota batimétrica, ya que de esto dependerá de que las celdas no presenten vértices en el eje vertical.
- Los coeficientes de relajación son de gran importancia debido a que estos ayudaran en la velocidad de convergencia y estabilidad de la simulación, por lo que en el presente estudio en las simulaciones para desagües y bocatoma se ha cambiado los coeficientes por *default* y se ha utilizado K 3 0.6 0.6 0.6 0.1 0.4 0.4, es decir el coeficiente de relajación para las ecuaciones de velocidad 0.6, presión 0.1, K y épsilon 0.4. En el caso del desagüe al no bajar los coeficientes de relajación se obtuvo divergencia en la simulación.



- Para las simulaciones de tres vertederos trabajando libre y vertedero izquierdo se ha utilizado el algoritmo de SSIIM para calcular el remanso mediante las presiones, esto se lo hace con el data set F 33 2, para este algoritmo se debe usar unos coeficientes de relajación más bajos, iguales a $K = 3 \ 0.4 \ 0.4 \ 0.4 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.2$.
- Los tiempos de simulación ejecutados para el estudio variaron desde 60 a 90 minutos, considerándose como un rango adecuado para el tipo de obras y procesos simulados.
- No fue necesario utilizar las correcciones por bloque. SSIIM tiene fuertes algoritmos de corrección, los cuales incrementan la velocidad de convergencia pero no ayudan en la estabilidad de la simulación.
- En consideración de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica, y de acuerdo a los resultados que fueran reportados por el estudio en modelo físico de escala reducida, se concluye que el modelo SSIIM presenta un buen desempeño para la identificación y análisis de procesos de flujo en obras hidráulicas de un proyecto de generación hidroeléctrica. Al tratarse de un CFD tridimensional es aplicable en obras hidráulicas que estén en régimen de flujo subcrítico, se puede simular desarenadores, túneles, azudes, embalses, canales, socavación en pilas de puentes, optimización de la forma geométrica de pilas y ríos que no tengan ramales y configuraciones geométricas muy complejas debido a que SSIIM1 trabaja con una malla de un solo bloque, por lo que sería muy complicado y poco viable una simulación de este tipo de ríos.



8. REFERENCIAS

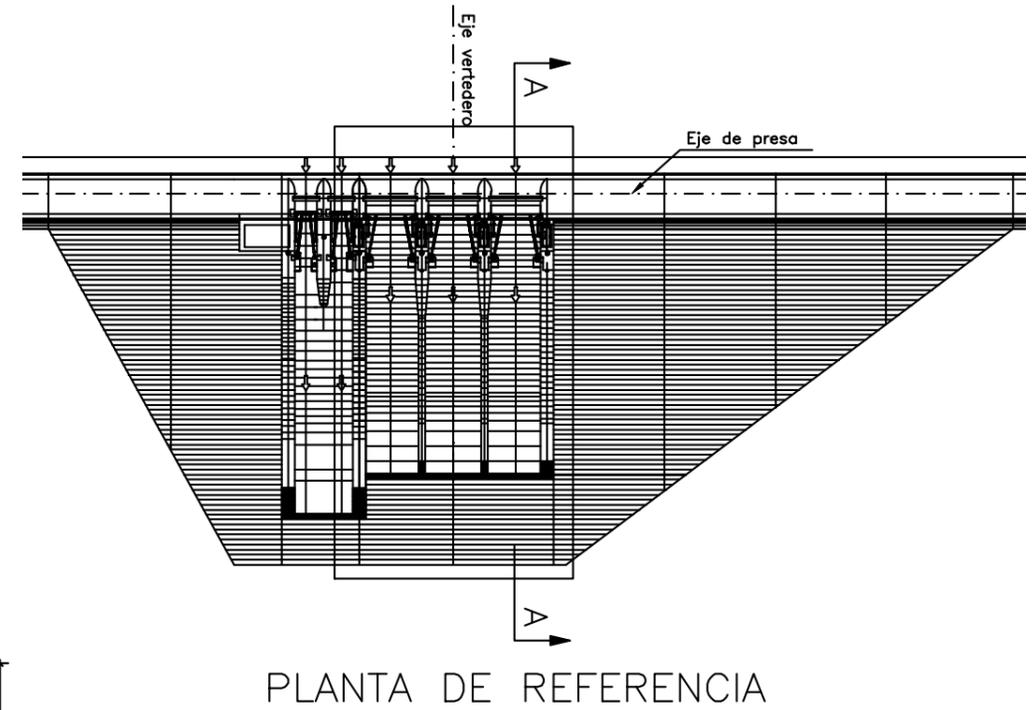
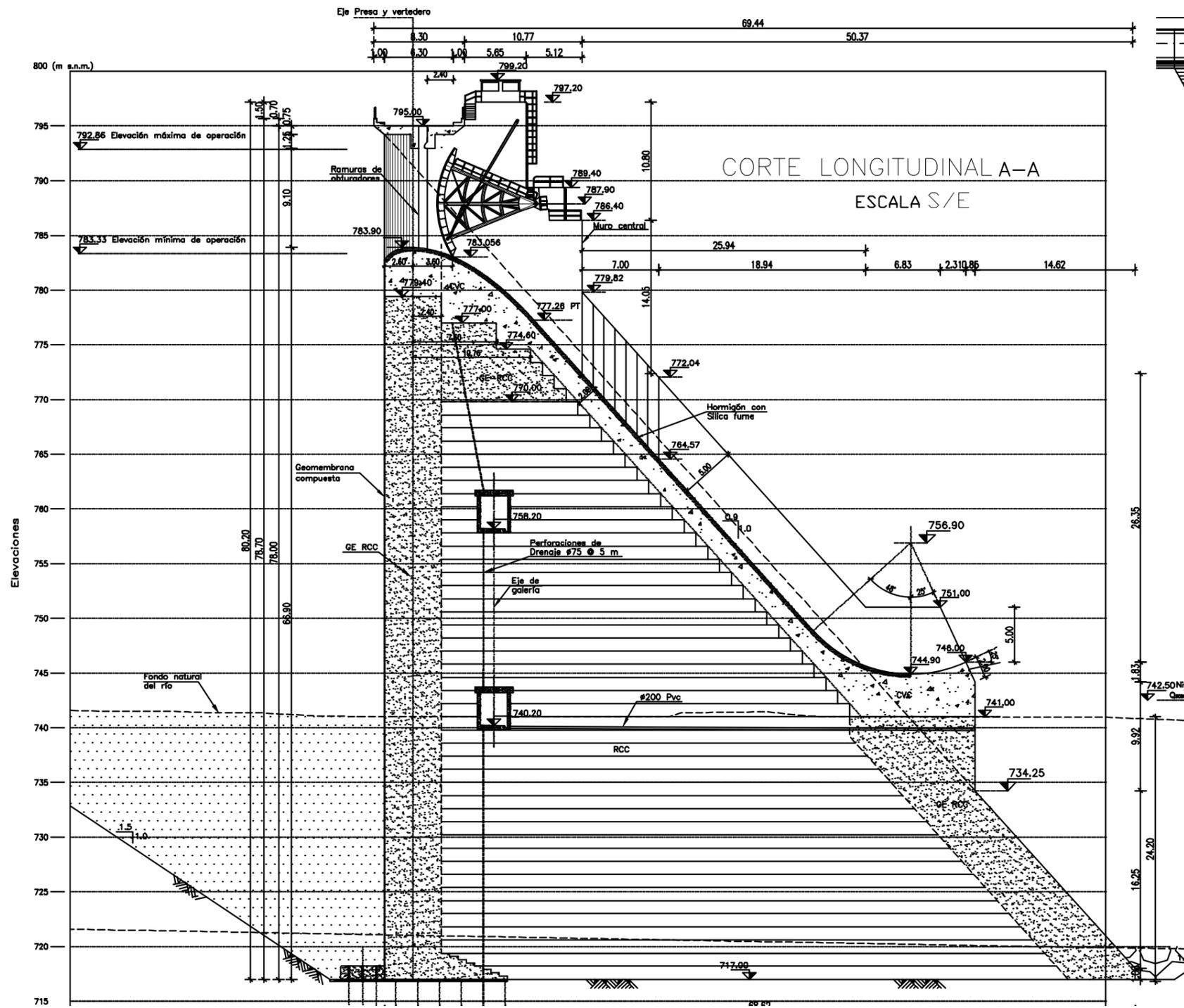
- Enerjubones. *Celec.EP*. 2014. www.celec.gob.ec/enerjubones (accessed Mayo 4, 2014).
- Enerjubones. "Diseño definitivo, PROYECTO MINAS - SAN FRANCISCO, Informe de Hidrología y Sedimentología." INFORME-EVENTO 6, 2011.
- Enerjubones. "Diseño definitivo, PROYECTO MINAS-SAN FRANCISCO, Informe de Hidráulica." INFORME-EVENTO 9, 2011.
- Luzuriga, B., and D. Amaya. "Simulación numérica del flujo de sedimentos en el desarenador del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair." Cuenca-Ecuador, 2014.
- MENDOZA, IVAN HERNANDO RAMIREZ, and SAILY ANTONIA TORRES ROSADO. "MODELO TRIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE AGUA EN PILAS DE PUENTES POR SIMULACIÓN NUMÉRICA." UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER , San José de Cúcuta, 2008.
- Novak, Pavel, A.I.B Moffat, y C Nalluri. *Estructuras Hidráulicas*. 2a Edición. Mc Graw-Hill, Interamericana S.A., 2001.
- Olsen, N. *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering*. Noruega: The Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- . *User's Manual SSIM*. Vol. 4. 2013.
- Olsen, N. *Numerical Modelling and Hydraulics*. Trondheim: Department of hydraulic and Enviromental Engineering The Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- Ordinola, José. "Simulación numerica tridimensional del comportamiento hidráulico del embalse Limón - Proyecto Olmos." Piura - Perú, 2009.
- PROMAS. "Estudios en modelo físico para el proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco y sus obra complementarias." Fase I, Fase II, Fase III, 2013.
- Vásquez, J. www.oocities.org/hidropiura. 2003.
<http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf> (accessed Abril 15, 2013).



9. ANEXOS

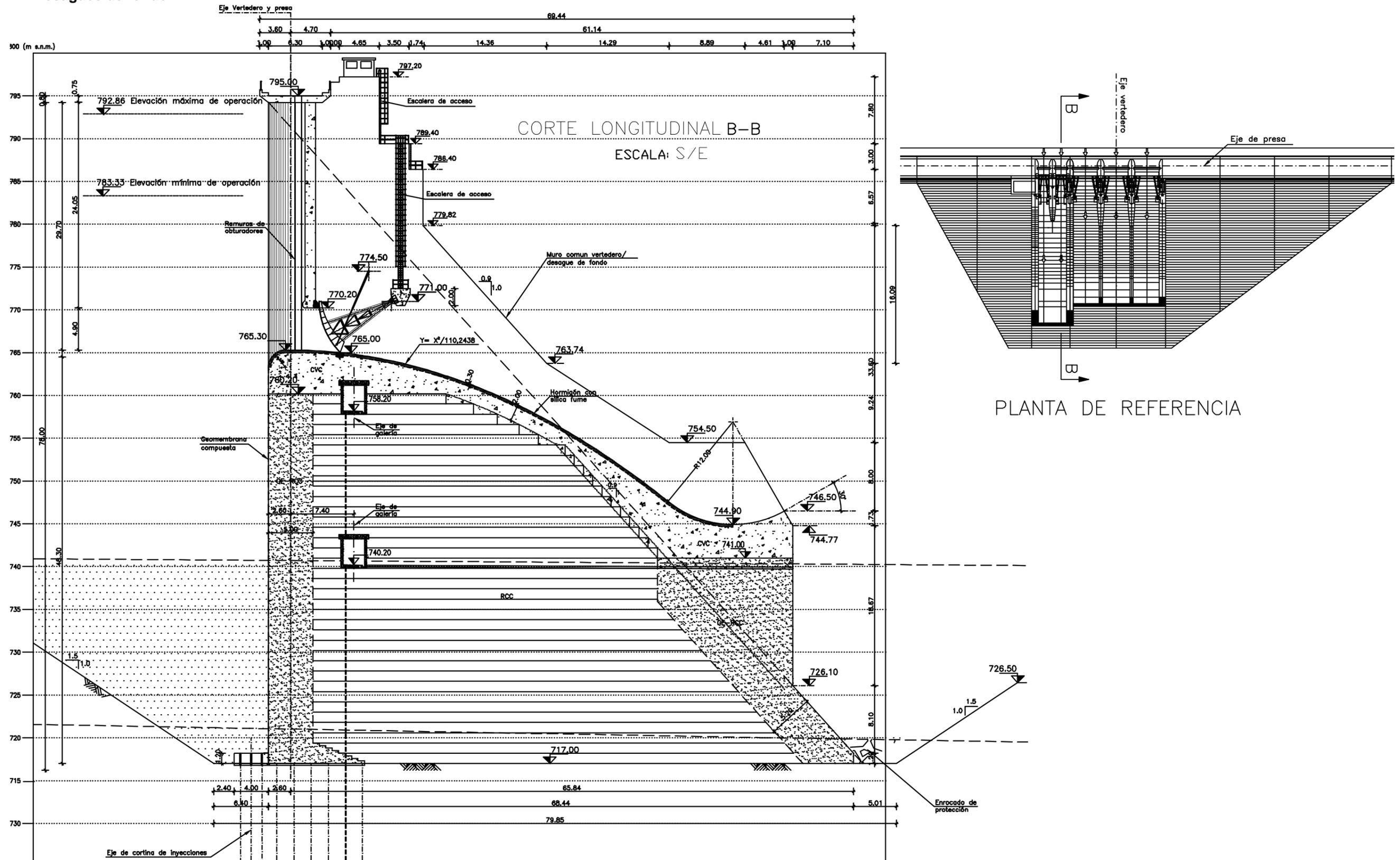
ANEXO A: Detalle de las obras anexas del proyecto Minas San Francisco

A1. Vertederos de excesos





A2. Desagües de fondo



Autoría: Carlos Buñay M.
 Freddy Pacheco A.



ANEXO B: Ciclo de limpieza del embalse Minas San Francisco

Volumen Remanente (i+1)	Elevación embalse	Carga	Apertura	H/Hd	Re	Cd	Caudal por desagües	Caudal de aporte	Caudal neto desalojado	Tiempo	Tiempo acumulado	Volumen Remanente (i)	
m ³	msnm	m	m				m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	horas	horas	m ³	
14,377,348	792.86	27.56	4.90	1.00	8.15E+07	0.60	549.36	80.45	468.91	1.00	1.00	12,689,265	
12,689,265	790.44	25.14	4.90	0.91	7.78E+07	0.60	524.68	80.45	444.23	1.00	2.00	11,090,044	
11,090,044	788.13	22.83	4.90	0.83	7.41E+07	0.60	500.01	80.45	419.56	1.00	3.00	9,579,618	
9,579,618	785.57	20.27	4.90	0.74	6.99E+07	0.60	471.14	80.45	390.69	1.00	4.00	8,173,143	
8,173,143	783.11	17.81	4.90	0.65	6.55E+07	0.60	441.58	80.45	361.13	1.00	5.00	6,873,073	
6,873,073	780.36	15.06	4.90	0.55	6.02E+07	0.60	406.16	80.45	325.71	1.00	6.00	5,700,508	
5,700,508	777.85	12.55	4.90	0.46	5.50E+07	0.60	370.67	80.45	290.22	1.00	7.00	4,655,728	
4,655,728	775.22	9.92	4.90	0.36	4.89E+07	0.60	329.58	80.45	249.13	1.00	8.00	3,758,877	
3,758,877	772.99	7.69	4.90	0.28	4.30E+07	0.60	290.17	80.45	209.72	1.00	9.00	3,003,875	
3,003,875	770.74	5.44	4.90	0.20	3.62E+07	0.60	244.12	80.45	163.67	1.00	10.00	2,414,681	
2,414,681	769.40	4.10	4.90	0.15	3.14E+07	0.60	211.86	80.45	131.41	1.00	11.00	1,941,613	
1,941,613	769.13	3.83	4.90	0.14	3.04E+07	0.60	204.81	80.45	124.36	0.20	11.20	1,852,073	
1,852,073	765.30	-	4.90	0.00	0.00E+00	0.60	-	-	-	-	-	1,852,073	
1,852,073	765.30	-	4.90	0.00	0.00E+00	0.60	-	-	-	-	-	1,852,073	
Tiempo total empleado											11.20		
TIEMPO DE VACIADO		0.47	DÍAS								Volumen neto desalojado del embalse		12,525,275.29
TIEMPO DE LLENADO		1.80	DÍAS								Volumen aportación del río		3,243,744.00
UN CICLO		2.27	DÍAS								Volumen total		15,769,019.29



ANEXO C: Archivos Control de las Simulaciones y Residuales obtenidos

Como se ha mencionado en el transcurso del presente documento el archivo control es el cerebro de SSIIM, aquí se especifican las condiciones para la simulación del flujo de agua, sedimentos., algoritmos, etc.

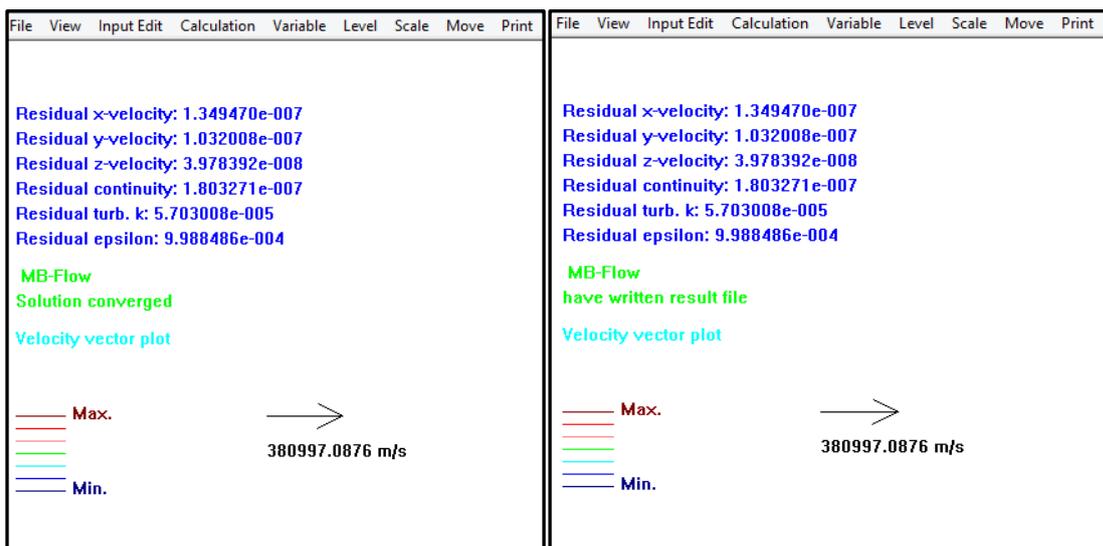
Cabe resaltar que los comandos especificados en los siguientes archivos sirven para las simulaciones realizadas y podrían variar dependiendo de las condiciones hidráulicas y numéricas ingresadas, debido a que pueden variar para cada simulación en particular

C1. Tres Vertederos trabajando libremente (Q=1554m³/s)

Archivo control:

```
F 33 50 1
F 36 2
G 1 186 116 17 1      grid and array sizes
G 3 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 81.25 87.5 93.75 100      vertical grid distribution
G 6 186 54 18 0.1 0.01
G 7 0 1 2 116 2 17 0 0 1554 1 0 0
G 7 1 -1 62 68 14 17 0 0 518 1 0 0
G 7 1 -1 51 58 14 17 0 0 518 1 0 0
G 7 1 -1 41 47 14 17 0 0 518 1 0 0
G 13 3 180 186 69 116 2 17
G 13 3 180 186 62 68 2 13
G 13 3 180 186 59 61 2 17
G 13 3 180 186 51 58 2 13
G 13 3 180 186 48 50 2 17
G 13 3 180 186 41 47 2 13
G 13 3 180 186 2 40 2 17
G 16 179 179 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 71.78 81.25 87.5 93.75 100
G 16 179 180 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 72.32 81.25 87.5 93.75 100
G 16 180 181 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 72.73 81.25 87.5 93.75 100
G 16 181 182 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.03 81.25 87.5 93.75 100
G 16 182 183 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.28 81.25 87.5 93.75 100
G 16 183 184 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.44 81.25 87.5 93.75 100
G 16 184 185 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.57 81.25 87.5 93.75 100
G 16 185 186 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.69 81.25 87.5 93.75 100
W 1 40.5 1554 56.000000
W 2 3 1 93 186
W 4 1 -1 186 69 116 2 17
W 4 1 -1 186 62 68 2 13
W 4 1 -1 186 59 61 2 17
W 4 1 -1 186 51 58 2 13
W 4 1 -1 186 48 50 2 17
W 4 1 -1 186 41 47 2 13
W 4 1 -1 186 2 40 2 17
K 1 40000 60000
K 2 0 1
K 3 0.4 0.4 0.4 0.1 0.2 0.2
```

Convergencia de la simulación





C2. Tres Vertederos trabajando con compuertas semiabiertas (Q=1000m³/s)

Archivo control

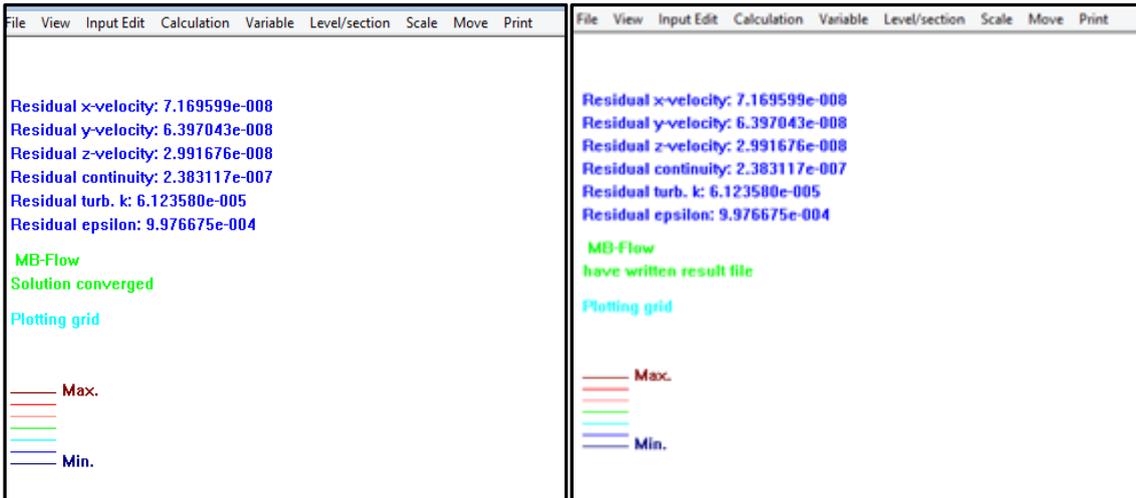
```
T 3 VERTEDEROS SEMIABIERTOS
G 1 186 116 20 1      grid and array sizes
G 3 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 83.33 86.66 90 93.33 96.66 100      vertical grid distribution
G 7 0 1 2 116 2 20 0 0 1000 1 0 0
G 7 1 -1 62 68 16 18 0 0 334 1 0 0
G 7 1 -1 51 58 16 18 0 0 333 1 0 0
G 7 1 -1 41 47 16 18 0 0 333 1 0 0
G 13 3 180 186 69 116 2 20
G 13 3 180 186 62 68 2 15
G 13 3 180 186 59 61 2 20
G 13 3 180 186 51 58 2 15
G 13 3 180 186 48 50 2 20
G 13 3 180 186 41 47 2 15
G 13 3 180 186 2 40 2 20
G 16 179 179 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 82.01 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 179 180 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 82.55 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 180 181 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 82.96 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 181 182 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 83.26 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 182 183 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 83.51 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 183 184 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 83.67 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 184 185 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 83.80 86.66 88.9 91.14 96 100
G 16 185 186 40 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 80 83.92 86.66 88.9 91.14 96 100
W 1 40.5 1000 56.000000
W 2 3 1 93 186
W 4 1 -1 186 69 116 2 20
W 4 1 -1 186 62 68 2 15
W 4 1 -1 186 59 61 2 20
W 4 1 -1 186 51 58 2 15
W 4 1 -1 186 48 50 2 20
W 4 1 -1 186 41 47 2 15
W 4 1 -1 186 2 40 2 20
W 4 1 -1 186 62 68 19 20
W 4 1 -1 186 51 58 19 20
W 4 1 -1 186 41 47 19 20
K 1 40000 60000
K 2 0 1
K 3 0.6 0.6 0.6 0.1 0.4 0.4
```

C3. Vertedero Izquierdo (Q= 576.72 m³/s)

Archivo Control

```
T Vertedero Izquierdo
F 33 50 1
F 36 2
G 1 186 116 17 1      grid and array sizes
G 3 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 75 81.25 87.5 93.75 100      vertical grid distribution
G 7 0 1 2 116 2 17 0 0 576.72 1 0 0
G 7 1 -1 62 68 14 17 0 0 576.72 1 0 0
G 13 3 180 186 69 116 2 17
G 13 3 180 186 62 68 2 13
G 13 3 180 186 2 61 2 17
G 16 179 179 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 71.78 81.25 87.5 93.75 100
G 16 179 180 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 72.32 81.25 87.5 93.75 100
G 16 180 181 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 72.73 81.25 87.5 93.75 100
G 16 181 182 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.03 81.25 87.5 93.75 100
G 16 182 183 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.28 81.25 87.5 93.75 100
G 16 183 184 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.44 81.25 87.5 93.75 100
G 16 184 185 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.57 81.25 87.5 93.75 100
G 16 185 186 61 68 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 56.25 62.5 68.75 73.69 81.25 87.5 93.75 100
W 1 40.5 576.72 56.000000
W 2 3 1 93 186
W 4 1 -1 186 69 116 2 17
W 4 1 -1 186 62 68 2 13
W 4 1 -1 186 2 61 2 17
K 1 40000 60000
K 2 0 1
K 3 0.4 0.4 0.4 0.1 0.2 0.2
```

Convergencia de simulación



C4. Desagüe de fondo (Q= 551.32 m³/s, n= 0.07)

Archivo Control

```

T Desague ks=0.07 k3 bajo
G 1 261 77 18 1 grid and array sizes
G 3 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 64.75 70 75 81.25 87.5 93.75 100 vertical grid distribution
G 7 0 1 2 77 2 18 0 0 551.32 1.0 0.0 0.0
G 7 1 -1 20 22 13 15 0 0 275.66 1.0 0.0 0.0
G 7 1 -1 26 29 13 15 0 0 275.66 1.0 0.0 0.0
G 13 3 255 261 2 19 2 18
G 13 3 255 261 30 77 2 18
G 13 3 255 261 23 25 2 18
G 13 3 255 261 20 22 16 18
G 13 3 255 261 26 29 16 18
G 13 3 255 261 20 22 2 12
G 13 3 255 261 26 29 2 12
G 16 254 254 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 61.05 70 75 82.83 87.5 93.75 100
G 16 254 255 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 63.92 70 75 81.6 87.5 93.75 100
G 16 255 256 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 65.06 70 75 80.95 87.5 93.75 100
G 16 256 257 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 65.9 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 257 258 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.2 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 258 259 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.49 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 259 260 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.63 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 260 261 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.78 70 75 80.83 87.5 93.75 100
W 1 40.5 551.32 34.89
W 2 3 1 130 261
W 4 1 -1 261 2 19 2 18
W 4 1 -1 261 30 77 2 18
W 4 1 -1 261 23 25 2 18
W 4 1 -1 261 20 22 16 18
W 4 1 -1 261 26 29 16 18
W 4 1 -1 261 20 22 2 12
W 4 1 -1 261 26 29 2 12
K 1 40000 60000
K 2 0 1
K 3 0.6 0.6 0.6 0.1 0.4 0.4
    
```



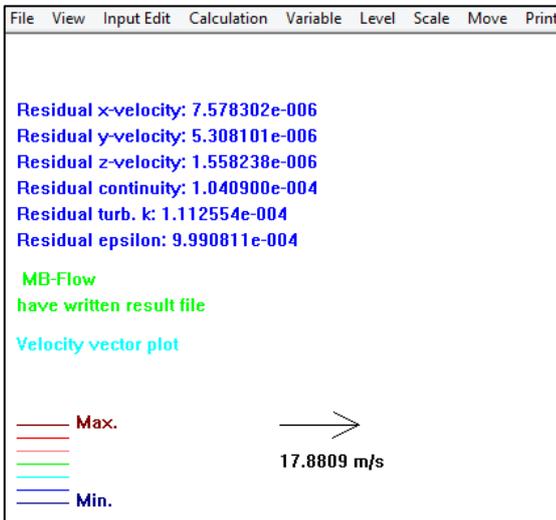
C5. Desagüe de fondo (Q= 551.32 m³/s, n= 0.036)

Archivo Control

```

T Desague ks=0.036 k3 bajo
G 1 261 77 18 1      grid and array sizes
G 3 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 64.75 70 75 81.25 87.5 93.75 100      vertical grid distribution
G 7 0 1 2 77 2 18 0 0 551.32 1.0 0.0 0.0
G 7 1 -1 20 22 13 15 0 0 275.66 1.0 0.0 0.0
G 7 1 -1 26 29 13 15 0 0 275.66 1.0 0.0 0.0
G 13 3 255 261 2 19 2 18
G 13 3 255 261 30 77 2 18
G 13 3 255 261 23 25 2 18
G 13 3 255 261 20 22 16 18
G 13 3 255 261 26 29 16 18
G 13 3 255 261 20 22 2 12
G 13 3 255 261 26 29 2 12
G 16 254 254 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 61.05 70 75 82.83 87.5 93.75 100
G 16 254 255 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 63.92 70 75 81.6 87.5 93.75 100
G 16 255 256 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 65.06 70 75 80.95 87.5 93.75 100
G 16 256 257 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 65.9 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 257 258 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.2 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 258 259 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.49 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 259 260 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.63 70 75 80.83 87.5 93.75 100
G 16 260 261 19 29 0.000000 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43.75 50 55.25 59.5 66.78 70 75 80.83 87.5 93.75 100
W 1 45.25 551.32 34.89
W 2 3 1 130 261
W 4 1 -1 261 2 19 2 18
W 4 1 -1 261 30 77 2 18
W 4 1 -1 261 23 25 2 18
W 4 1 -1 261 20 22 16 18
W 4 1 -1 261 26 29 16 18
W 4 1 -1 261 20 22 2 12
W 4 1 -1 261 26 29 2 12
K 1 40000 60000
K 2 0 1
K 3 0.6 0.6 0.6 0.1 0.4 0.4
    
```

Convergencia de simulación





C6. Bocatoma (Q= 600 m³/s)

Archivo Control

```

IT BOCATOMA
G 1 201 105 19 1      grid and array sizes
G 3 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 43 45.5 47.5 50 56.25 62.5 68.75 75 81.25 87.5 93.75 100      vertical grid distribution
G 7 0 1 2 105 2 19 0 0 600 1 0 0
G 7 1 -1 37 39 9 11 0 0 248 1 0 0
G 7 1 -1 30 33 9 11 0 0 249 1 0 0
G 7 1 3 157 167 5 6 0 0 103 1 0 0
G 13 3 195 201 40 105 2 19
G 13 3 195 201 37 39 2 8
G 13 3 195 201 34 36 2 19
G 13 3 195 201 30 33 2 8
G 13 3 195 201 2 29 2 19
G 13 3 195 201 37 39 12 19
G 13 3 195 201 30 33 12 19
G 13 3 153 156 2 12 2 19
G 13 3 161 163 8 12 2 19
G 13 3 168 171 2 12 2 19
G 13 3 157 167 2 4 2 19
G 13 3 157 160 5 12 7 19
G 13 3 164 167 5 12 7 19
G 13 3 161 163 5 7 7 19
G 16 194 201 29 39 0 6.25 12.5 18.75 25 31.25 37.5 41.60 45 47.5 50.35 56.25 62.5 68.75 75 81.25 87.5 93.75 100
W 1 40.5 600 56.000000
W 2 3 1 97 195
W 4 1 -1 201 40 105 2 19
W 4 1 -1 201 37 39 2 8
W 4 1 -1 201 34 36 2 19
W 4 1 -1 201 30 33 2 8
W 4 1 -1 201 2 29 2 19
W 4 1 -1 201 37 39 12 19
W 4 1 -1 201 30 33 12 19
W 4 3 0 2 157 167 5 6
K 1 40000 60000
K 2 0 1
K 3 0.6 0.6 0.6 0.1 0.4 0.4
    
```

Convergencia de simulación

