

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELACIÓN NUMÉRICA 3D EN OpenFOAM PARA ANALIZAR EL SALTO DE
ESQUÍ DEL EMBALSE ANCOA**

**FELIPE NEGRETE S.¹
LUIS ZAMORANO R.²
ANDRÉS TAPIA G.³
YARKO NIÑO C.⁴
ALDO TAMBURRINO T.⁵**

RESUMEN

El uso de la modelación numérica como una herramienta para la resolución de problemas ligados a la ingeniería hidráulica, es una práctica indiscutible en la actualidad. En este sentido, el software libre OpenFOAM ha sido ampliamente utilizado en el estudio de obras hidráulicas y se ha posicionado como una herramienta fundamental a la hora de analizar el flujo sobre estas estructuras. En este artículo se presenta un análisis del flujo sobre el salto de esquí del Embalse Ancoa, VII Región, Chile, evaluando características del despegue, el impacto, así como también el efecto del viento en la trayectoria del chorro. Las simulaciones numéricas con OpenFOAM logran obtener resultados bastante cercanos a lo proyectado por las formulaciones teóricas y dan a los resultados el carácter tridimensional que tiene este flujo turbulento. En particular, en las simulaciones con viento no había fórmulas que aplicar, por lo tanto, OpenFOAM es el método a seguir. Por último, en este artículo se evaluó la trayectoria del chorro con viento con una nueva fórmula teórica obtenida de un simple análisis de fuerza que debe ser discutida y mejorada en un futuro.

¹ Ingeniero de Proyectos, Unidad de Ingeniería y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica – felipenegrete@inh.cl

² Jefe Unidad de Ingeniería y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica – luiszamorano@inh.cl

³ Ingeniero de Proyectos, Unidad de Ingeniería y Desarrollo, Instituto Nacional de Hidráulica – andrestapia@inh.cl

⁴ Profesor Titular, Depto. Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile – ynino@ing.uchile.cl

⁵ Profesor Asociado, Depto. Ingeniería Civil, Advanced Mining Technology Center Universidad de Chile – atamburr@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Marco del Estudio

El Embalse Ancoa, ubicado al interior de la provincia de Linares, VII Región, comenzó su operación el año 2012. El embalse tiene una altura de 138 [m], con capacidad para almacenar 80 millones de [m³]. Actualmente, la consultora SMI Ingenieros se encuentra estudiando en detalle la parte baja del sistema evacuador de crecidas, particularmente lo referido al salto de esquí y la zona de restitución al río, lo cual no contempló un diseño definitivo previo a su construcción. En el marco de este análisis, se encargó al INH el análisis del chorro proveniente del salto de esquí y su incorporación al río Ancoa. Para esta labor, se ha realizado un modelo numérico en el software OpenFOAM evaluando diferentes ángulos y cotas de despegue del salto de esquí, además de incorporar el efecto del viento en la trayectoria del chorro.

Objetivo

El objetivo principal del estudio es analizar el despegue y trayectoria del chorro desde el salto de esquí, así como también el impacto y restitución de éste al río. En este artículo se pretende mostrar los resultados de la trayectoria del chorro obtenida del modelo numérico, evaluando diferentes ángulos y cotas de despegue del salto de esquí, y contrastarlo con la trayectoria teórica. Por otro lado, se presentan los resultados de incorporar viento en una dirección perpendicular a la trayectoria del chorro, evaluando el desvío que se genera en el punto de impacto aguas abajo.

2. METODOLOGIA

Modelo numérico

Como modelo matemático se usó una aproximación basada en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS, en inglés) en 3D, utilizando una ecuación de cierre de la turbulencia de dos ecuaciones, denominada K – omega (K- ω). Para el tratamiento de la interacción entre el agua y el aire en el mismo modelo, se utiliza un esquema bifásico de dos fluidos incompresibles (aire y agua) utilizando para ello el método de "volumen de fluido" (VOF, en inglés), donde se define una variable que representa el contenido de una fase (α), tomando un valor igual a 1 cuando ésta es agua y un valor igual a 0 cuando ésta es aire, de manera que valores intermedios representarán zonas de interfaz aire-agua.

Para la implementación de dicho modelo matemático se utilizó un software de código libre, en particular se utilizó OpenFOAM, mediante su solver InterFoam, en su versión V16-06+. Este software, y en particular el solver mencionado, permite resolver las ecuaciones diferenciales mediante un esquema de volúmenes finitos, permitiendo además que la turbulencia pueda ser tratada considerando varios enfoques. En el caso del presente estudio, la turbulencia fue tratada usando las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS), pero también pueden usarse enfoques más complejos para su tratamiento como, por ejemplo, Large Eddy Simulation (LES). Por otra parte el tratamiento de la advección de la interfaz aire-agua se realiza utilizando el método de VOF, el cual se implementa en InterFoam mediante el algoritmo denominado MULES

(Deshpande et al. 2012) (en inglés, Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution) que es la opción por defecto. Cabe mencionar que posterior al desarrollo del presente estudio, OpenFOAM presentó en sus últimas versiones un nuevo algoritmo para adveccionar la interfaz, denominada ISO-ADVECTOR (Roenby et al. 2016), el cual sería interesante de validar en las presentes condiciones, sin embargo, en este estudio todas las simulaciones realizadas consideraron MULES.

Configuración del modelo

El modelo se ha configurado de la siguiente manera:

Malla de cálculo

Para la generación de la malla de cálculo se recopilaron antecedentes relevantes de terreno, como la geometría de la obra, la cual se obtuvo de los planos de diseño. Otro antecedente relevante corresponde al levantamiento topográfico de la zona de estudio, para lo cual se realizó un modelo tridimensional del terreno. Es importante mencionar que los ingenieros a cargo del diseño del salto de esquí optaron por modificar el fondo del terreno, considerando para ello la calidad de los suelos y rocas y determinando de esta manera una profundidad de socavación del material más blando.

La malla utilizada en el modelo OpenFOAM fue generada con las herramientas disponibles del software, la cual se muestra en la Figura 1. Un primer mallado fue desarrollado con la librería BlockMesh, para posteriormente refinar el modelo en las zonas de interés con la librería SnappyHexMesh. El proceso de mallado fue realizado de manera iterativa, procurando un balance entre el tiempo de cómputo y la resolución de la malla. De esta manera el dominio a modelar posee zonas con mayor refinamiento en las zonas de escurrimiento del flujo.

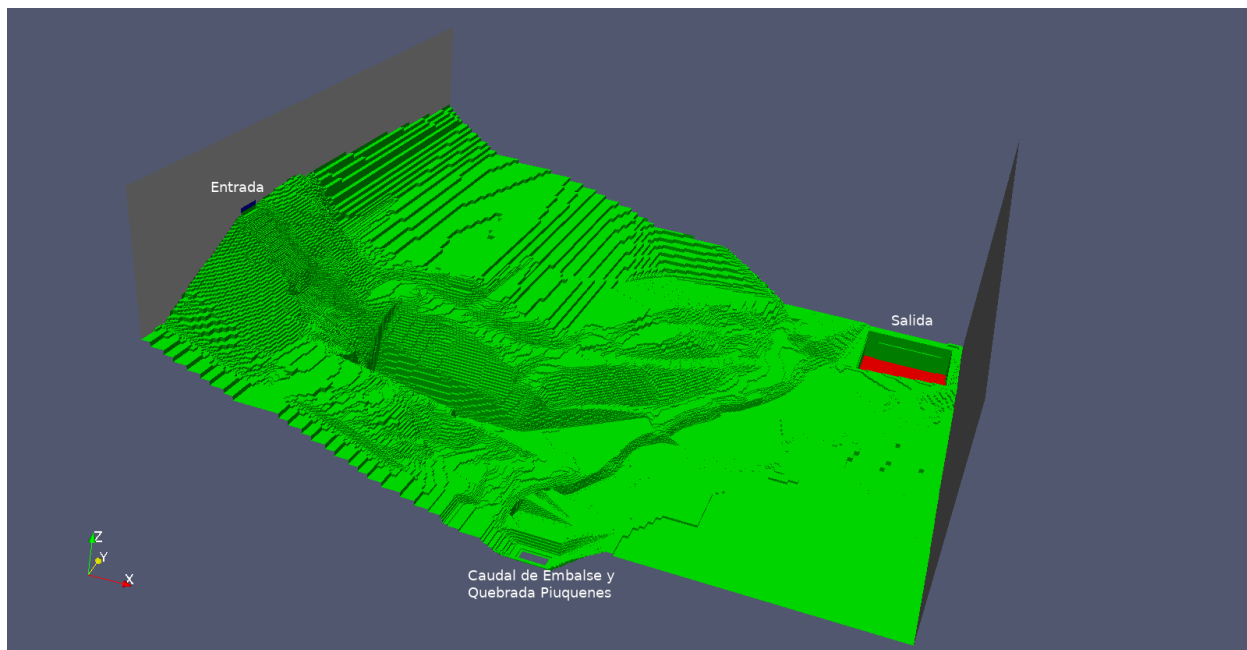


Figura 1. Malla utilizada y definición de las condiciones de borde

Finalmente, la malla implementada tiene las características:

- Caras: 11.500.948
- Celdas: 3.754.817
- Tamaño menor de celda: 0,55 [m]
- Tamaño máximo de celda: 2,20 [m]

Por otra parte, la malla presentada fue revisada con la utilidad checkMesh de OpenFOAM, verificando que se cumple con los criterios de calidad.

Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del modelo corresponden a las entradas y salidas de caudal, forzantes externos y zonas laterales del cauce. Cabe mencionar que el presente modelo, además de tener por objeto el determinar la trayectoria del chorro, tiene también la meta de presentar las características del impacto y del escurrimiento en el punto de restitución. De esta forma, se presentan todas las condiciones de borde consideradas en el estudio, las que se pueden identificar en la Figura 2.

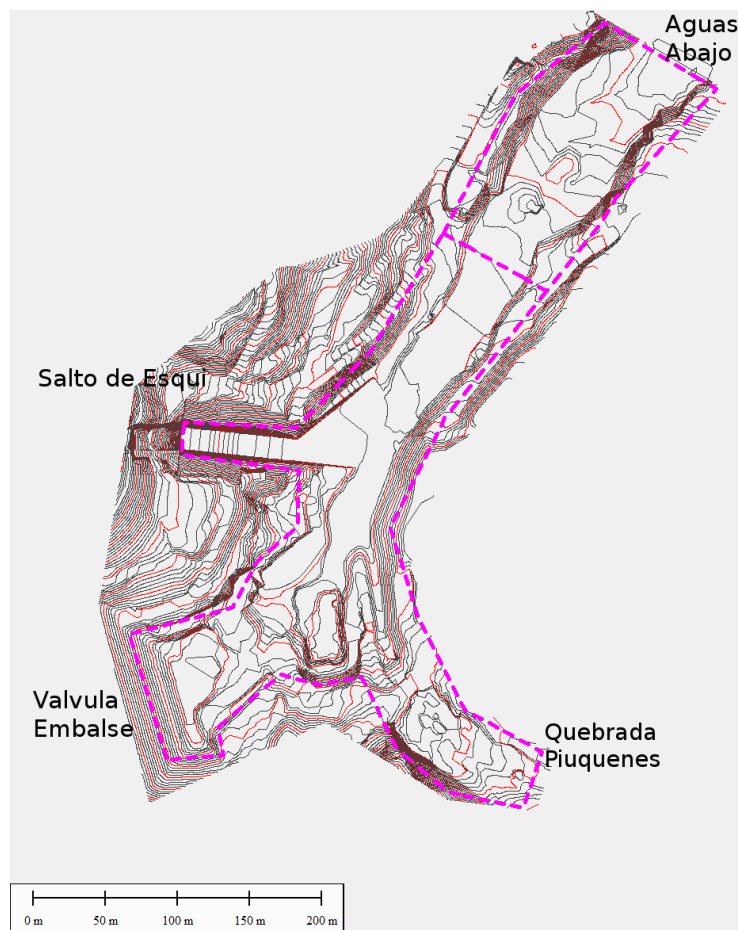


Figura 2. Ubicación de las condiciones de borde del modelo numérico.

Las condiciones de borde se pueden resumir en:

- Condiciones de entrada de agua: Quebrada Piuquenes, válvula del embalse, salto de esquí.
- Condiciones de salida de agua: Altura de agua fija (618 msnm).
- Condiciones de borde para la salida del aire: presión total constante, y velocidad libre para dicha condición.
- Condiciones para bordes solidos: se define una velocidad nula.

Cabe mencionar que los aportes de caudal al modelo como consecuencia de las descargas de las quebradas laterales fueron modeladas según el periodo de retorno. En la Quebrada de Piuquenes se observa un importante aporte, por lo que se incluyó su caudal al modelo, mientras que las quebradas vecinas al rápido de descarga fueron despreciadas, considerando su poca magnitud (caudal máximo de 3,6 [m³/s] para periodos de retorno de 1.000 años). Los caudales considerados son los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caudales utilizados según período de retorno.

Periodo de retorno [años]	$Q_{Piuquenes}$ [m ³ /s]	$Q_{Válvula}$ [m ³ /s]	$Q_{Evacuador}$ [m ³ /s]
2	38	35	152
100	99	35	761
1.000	136	35	1.026

Cálculo del desvío del flujo por viento

En el presente trabajo no pudo encontrarse una fórmula explícita para el desvío del chorro por efectos del viento, sin embargo, con un desarrollo simple se puede llegar a una formulación que a lo menos permite tener un orden de magnitud, comparable con el cálculo realizado mediante modelación numérica.

A partir de un código estructural, como el "Uniform Building Code (UBC 1997)" se puede encontrar una fórmula que relaciona la velocidad del viento con una carga de empuje. En particular, el código en cuestión propone una tabla para transformar la velocidad del viento a presión de empuje. Realizando una curva de ajuste se puede llegar a la siguiente expresión:

$$P = 0,614 V^2 \quad (1)$$

Con P presión en [Pa] y V velocidad del viento en [m/s].

A partir de este valor, es posible integrar el valor de la fuerza a lo largo de todo el chorro y determinar, considerando su masa, un valor para la aceleración. Debido a la complejidad se hacen algunos supuestos, como:

- Se supone que el chorro es cilíndrico, lo que si bien no es correcto, permite un cálculo rápido de áreas y volúmenes.

- El flujo de viento es perpendicular al chorro, por lo tanto, el área que enfrenta al aire se puede aproximar a la longitud del chorro ponderado por el ancho de este.
- Para la validez del cálculo anterior se supone que el chorro no experimenta expansión ni deformación.
- La longitud se determina suponiendo que el efecto del viento no es considerable, esto es que el desvío del chorro no es lo suficiente para aumentar la longitud del chorro, ni para deformar en forma significativa el área proyectada y perpendicular al flujo.

De esta manera, considerando que la fuerza sobre la columna de agua es:

$$F = C_d \cdot P \cdot A \quad (2)$$

Con:

F: Fuerza sobre el chorro en [N]

A: Área proyectada del chorro en $[m^2]=L \cdot D$, donde L es el largo del chorro y D su diámetro, ambos en [m]

Cd: Coeficiente de arrastre o de ajuste (adimensional).

Por otra parte, considerando que la masa del chorro corresponde a su volumen, se puede determinar la aceleración del flujo:

$$a = F/M \quad (3)$$

Con:

a : Aceleración en la dirección del viento en $[m/s^2]$

F: Fuerza sobre el chorro en [N]

M: Masa del chorro en [Kg].

La masa del chorro se puede simplificar a la forma de un cilindro, en la cual:

$$M = \rho_{agua} L \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \quad (4)$$

Con ρ_{agua} la densidad del agua.

De esta manera, reemplazando las constantes, se puede llegar a la siguiente fórmula simplificada, para la aceleración:

$$a = 0,7818 \frac{v^2}{\rho_{agua}} \frac{C_d}{D} \quad (5)$$

Notar que la aceleración ya no depende de la longitud, lo cual es lógico, dependiendo exclusivamente de la forma en contra del chorro. De esta manera, para determinar la distancia D_y basta integrar la ecuación de un proyectil, que suponiendo que no existe componentes de velocidades del flujo en el despegue en la dirección del viento obteniendo que:

$$D_y = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (6)$$

3. RESULTADOS PRINCIPALES

A continuación, se muestra parte de los resultados obtenidos del modelo numérico desarrollado.

Trayectoria del chorro sin viento

Se presenta la trayectoria del chorro desde el despegue hasta el punto de impacto para diferentes ángulos y cotas del salto de esquí.

En las Figuras 3 y 4 se observa la trayectoria que sigue el chorro para los caudales asociados a los periodos de retorno 100 y 1.000 años, para la Alternativa 1 correspondiente a un salto de esquí con un ángulo de lanzamiento de 20° y una cota de despegue de 708 msnm.

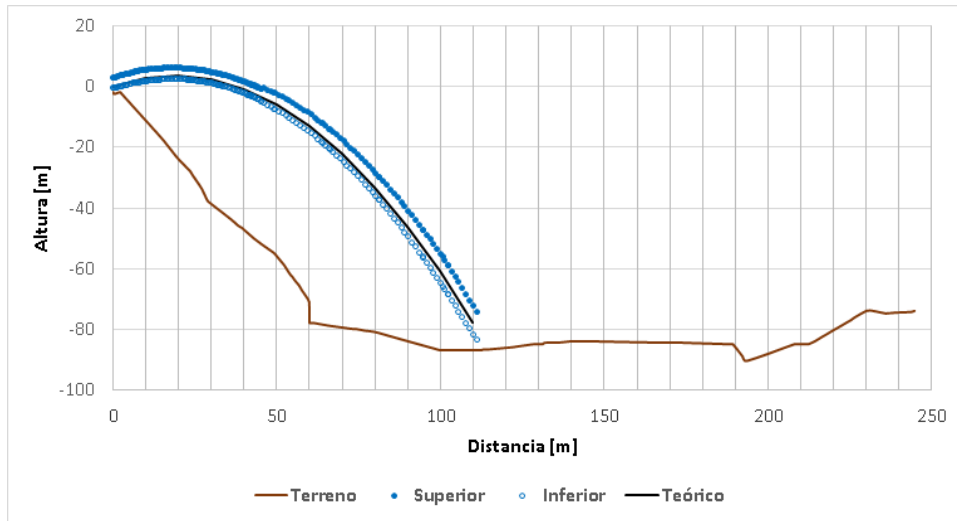


Figura 3. Trayectoria del chorro para T=100 años, Alternativa 1: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 20° y cota de despegue de 708 msnm.

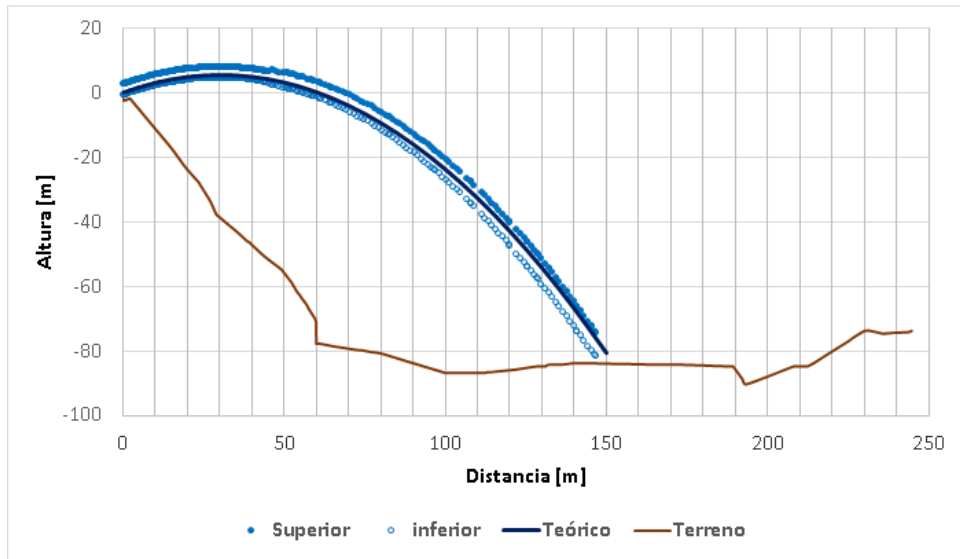


Figura 4. Trayectoria del chorro para T=1.000 años, Alternativa 1: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 20° y cota de despegue de 708 msnm.

En las Figuras 5 y 6 se observa la trayectoria que sigue el chorro para los caudales asociados a los periodos de retorno 100 y 1.000 años para la Alternativa 2, correspondiente a la misma cota de despegue, pero con un ángulo de lanzamiento de 5°.

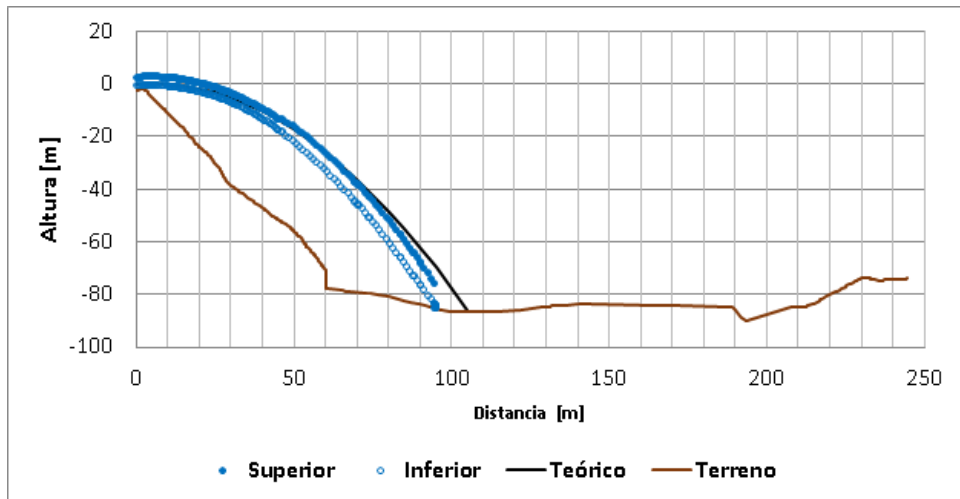


Figura 5. Trayectoria del chorro para T=100 años, Alternativa 2: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 5° y cota de despegue de 708 msnm.

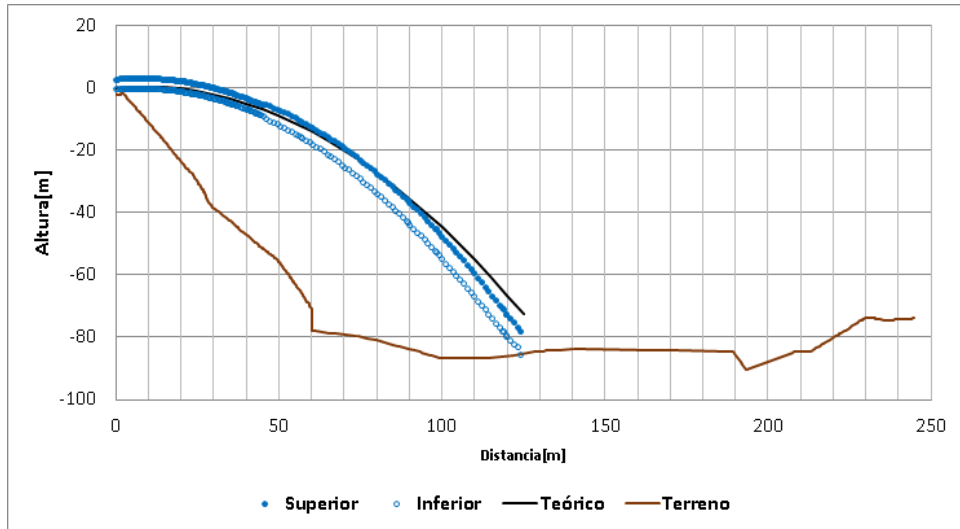


Figura 6. Trayectoria del chorro para T=1.000 años, Alternativa 2: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 5° y cota de despeje de 708 msnm.

En las Figuras 7 y 8 se observa la trayectoria que sigue el chorro para los caudales asociados a los periodos de retorno 100 y 1.000 años para la Alternativa 3, correspondiente a un ángulo de lanzamiento de 5° y una cota de despeje inferior de 652 msnm.

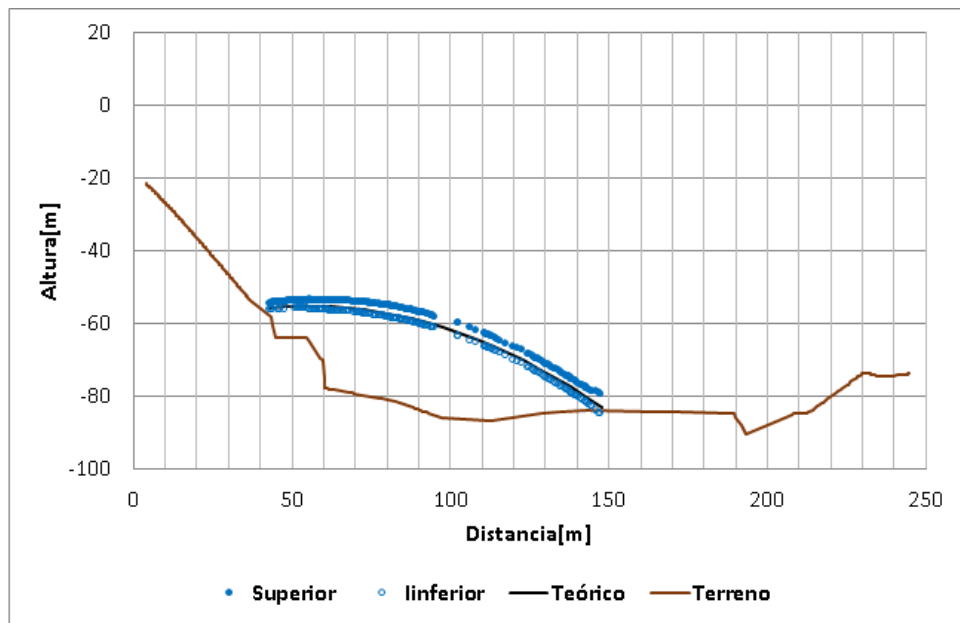


Figura 7. Trayectoria del chorro para T=100 años, Alternativa 3: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 5° y cota de despeje de 652 msnm.

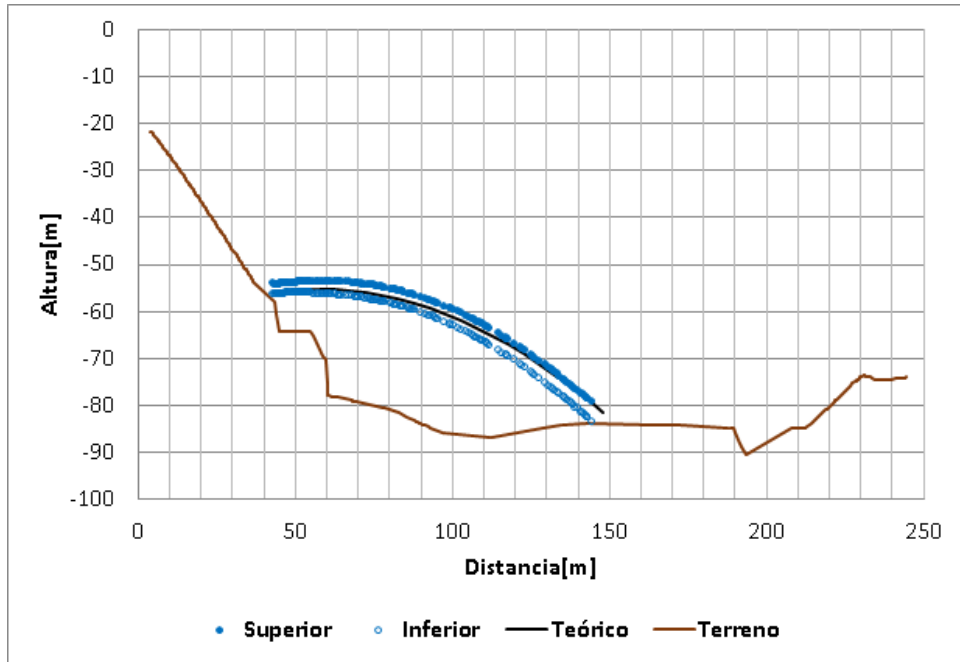


Figura 8. Trayectoria del chorro para T=1.000 años, Alternativa 3: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 5° y cota de despeje de 652 msnm.

En las Figura 9 se observa la trayectoria que sigue el chorro para el caudal asociado a un periodo de retorno de 100 años para la Alternativa 4, correspondiente a un ángulo de lanzamiento de 10° y una cota de despeje de 652 msnm.

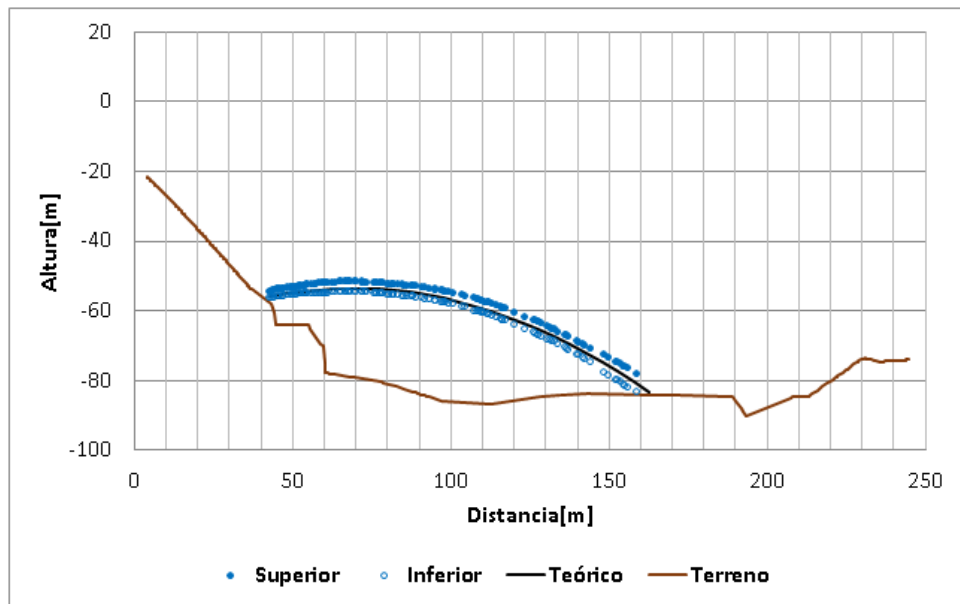


Figura 9. Trayectoria del chorro para T=100 años, Alternativa 4: salto de esquí con ángulo de lanzamiento 10° y cota de despeje de 652 msnm

A modo de resumen, en la Tabla 2 se presentan los puntos de impacto del chorro para cada uno de los chorros analizados, indicando los valores del impacto de la envolvente superior e inferior

obtenidos del modelo numérico, y la distancia a la que impacta el chorro obtenido de la formulación teórica de un lanzamiento de proyectil.

Tabla 2. Distancias o puntos de impactos de los distintos chorros analizados. Valores de la envolvente inferior y superior (modelo numérico) y del cálculo teórico.

D[m]	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4
	T=100	T=1.000	T=100	T=1.000	T=100	T=1.000	T=100
Superior	118,83	153,09	99,63	128,51	154,56	151,62	166,46
Inferior	112,71	147,63	95,34	123,18	148,60	142,55	158,18
Teórico	115,00	152,00	105,00	134,00	147,80	150,80	162,80

En la Tabla 2 se puede apreciar que el modelo numérico reproduce de buena manera la trayectoria seguida por el chorro que despegue desde el salto de esquí al obtener puntos de impacto similares a los deducidos de la formulación teórica. Cabe destacar que el chorro, durante su caída, está sujeto a fenómenos de dispersión y chorreo por el contacto y mezcla con el aire, lo cual podría explicar las pequeñas diferencias encontradas entre ambas formulaciones.

Efecto del viento en el desplazamiento del chorro

En primer lugar, al considerar la ecuación (5) antes mostrada para la aceleración del chorro con viento, y utilizando una velocidad del viento de 100 [km/h] (27,8 [m/s]), un diámetro del chorro de 2,2 [m], un ancho del canal de 10 [m] y un coeficiente de arrastre (C_d) igual a 0.1 se obtiene una aceleración de 0,08 [m/s²].

Por otra parte, se estima el tiempo que demora el chorro desde el despegue del salto de esquí hasta el impacto aguas abajo. Considerando, que la velocidad de salida del chorro es de 23,9 [m/s] (T=100 años), se obtiene para un ángulo de 20°, una velocidad inicial descendente de 8,17 [m/s]. Por otra parte, considerando que la caída es de aproximadamente 85 [m], se obtiene un tiempo de 5,1 [s].

Reemplazando en la ecuación (6), se obtiene un desplazamiento por viento de aproximadamente 1,17 [m].

Por otra parte, de la modelación numérica se puede extraer la separación del flujo para dos simulaciones distintas, una que considera el viento y otra sin viento. La Figura 10 presenta la superposición de ambas simulaciones, con un corte transversal para extraer la envolvente de la superficie libre antes del impacto. La línea azul representa una envolvente del flujo para una sección transversal al flujo para el caso con viento, mientras que la línea roja representa una envolvente del flujo para una sección transversal sin viento. Cabe mencionar que la sección del chorro es la misma, ubicada a unos 5 [m] antes del impacto, a fin de mostrar la deformación y desvío del chorro. La línea blanca representa la distancia entre ambos centroides, la cual es de aproximadamente 5,5 [m].

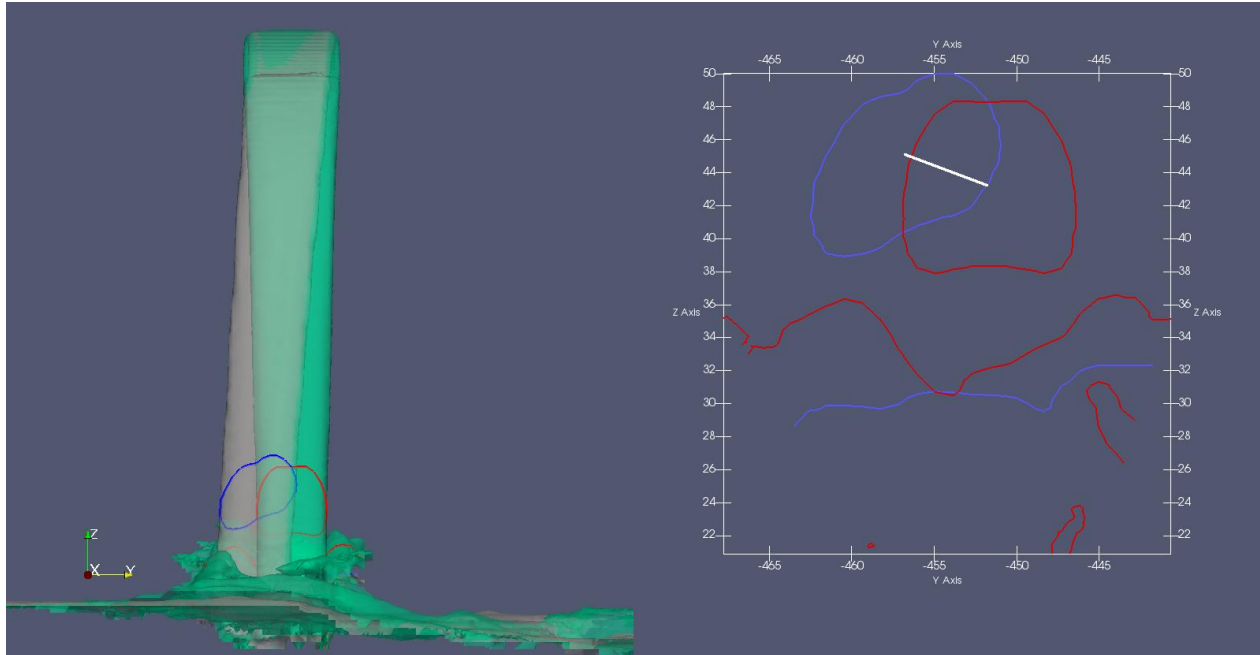


Figura 10. Efecto del viento en la caída del chorro desde el salto de esquí.

De esta manera se puede ver que existe una diferencia no despreciable entre el valor obtenido analíticamente 1,17 [m] y el resultado del modelo numérico 5,5 [m]. La diferencia puede deberse a varios factores, dentro de los cuales se destaca la deformación que tiene el chorro al caer, lo que se puede apreciar en la Figura 10, donde la sección en rojo muestra una diferencia en altura de casi 14 [m] (similar valor para el caso de la línea azul, con viento), que al compararse con la altura del flujo (2,2 [m]) al inicio del chorro, resulta en un aumento de poco más de 6 veces, que es dentro del orden de la diferencia obtenida. De esta manera, para mejorar la predicción de la fórmula analítica, se recomienda incluir un factor de expansión que considere la deformación del flujo, pues el supuesto de que este no se deforma resulta poco cierto, y por otra parte, poco conservador.

4. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

El modelo numérico desarrollado en el software OpenFOAM ha permitido realizar un análisis cualitativo del chorro proveniente del salto de esquí del embalse Ancoa. Se ha estimado de buena manera el punto de impacto del chorro aguas abajo, así como también conocer el efecto de una ráfaga de viento perpendicular a la caída del mismo. Esto ha permitido cumplir con los objetivos trazados en el proyecto realizado.

En este artículo se han presentado siete distintas trayectorias del chorro a partir de la combinación de diferentes ángulos y cotas de despegue, y de distintos caudales evacuados. Los resultados han mostrado una buena correlación entre lo obtenido mediante el modelo numérico y la formulación teórica. Además, se ha presentado el efecto del viento al desviar el chorro y provocar un desplazamiento de la zona de impacto aguas abajo. Al respecto el efecto del viento es pequeño (aproximadamente 5 metros), por lo que para efectos prácticos puede considerarse despreciable.

Cabe destacar que los modelos fueron desarrollados para realizar estimaciones y un análisis cualitativo de la caída del chorro, y que estos serán validados en una etapa posterior del proyecto mediante la modelación física. Por este motivo, no se ha considerado la corrección del ángulo de despegue del salto de esquí y, para efectos estimativos, sólo se ha utilizado el ángulo geométrico de la salida del salto de esquí.

Como estudio posterior, se recomienda realizar algunas simulaciones más, en condiciones distintas, de modo de generar antecedentes y casos para validar una nueva fórmula que permita incorporar los efectos del viento en la trayectoria del chorro. En particular, esta fórmula debiese agregar un término adicional para la expansión del chorro en su caída.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la consultora SMI Ingenieros y a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) por permitir la publicación de los resultados obtenidos en el proyecto desarrollado.

REFERENCIAS

Deshapande, S.; Anumolu, L.; Trujillo M (2012) Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. *Computational science & discovery*, vol. 5, no 1, p. 014016.

Roenby J.; Bredmose H.; Jasak, H. (2016) A computational method for sharp interface advection. *Open Science*, vol. 3, no 11, p. 160405.