

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LAS IMPRESORAS 3D EN LA ELABORACIÓN DE MODELOS FÍSICOS DE OBRAS HIDRÁULICAS EN EL DEPARTAMENTO DE TARIJA

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF 3D PRINTERS IN THE DEVELOPMENT OF
PHYSICAL MODELS OF HYDRAULIC WORKS IN THE DEPARTMENT OF TARIJA

Fecha de recepción: 02/05/2025 | Fecha de aceptación: 27/06/2025

Gamarra Mendoza Mario Carmelo¹, Perales Avilés Moisés²

¹Ingeniero Civil, M.Sc.
Investigador Centro de Investigación del Agua (CIAGUA), Carrera de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS)

ORCID: 0000-0003-4486-4815

Correspondencia del autor: mariogamarra@uajms.edu.bo¹, mcgamarramendoza@gmail.com¹

Tarija - Bolivia

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE LAS IMPRESORAS 3D PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS FÍSICOS EN OBRAS HIDRÁULICAS

² **Perales Avilés Moisés**

Ingeniero Civil, Ph.D.

Director Centro de Investigación del Agua (CIAGUA), Carrera de Ingeniería Civil

Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS)

moisesperales@uajms.edu.bo

moisesperalesaviles@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8067-0773

Tarija, Bolivia

RESUMEN

Este estudio analiza la aplicación de impresoras 3D en la creación de modelos físicos de obras hidráulicas en Tarija, Bolivia. La impresión 3D permite la fabricación rápida y económica de prototipos personalizados, optimizando el diseño y reduciendo costos. Se colaboró con el software WinFLume para diseñar aforadores precisos y personalizados, mejorando la gestión de recursos hídricos. Se utilizaron materiales como PLA y PETG en la impresión 3D para crear componentes detallados y duraderos. La evaluación de estos modelos se realizó con el software Kinovea, que analiza el comportamiento de los fluidos en los modelos hidráulicos, proporcionando datos precisos para ajustar y optimizar los diseños. Los resultados destacan la capacidad de los modelos físicos hidráulicos para simular y estudiar fenómenos como la erosión y sedimentación. Además, se resalta la colaboración con instituciones educativas y de investigación para avanzar en la gestión de riesgos hídricos y sostenibilidad ecológica. En conclusión, la integración de la impresión 3D y herramientas de análisis como Kinovea está transformando la ingeniería hidráulica, ofreciendo nuevas oportunidades para la investigación, desarrollo y educación en este campo.

ABSTRACT

This study analyzes the application of 3D printers in the creation of physical models of hydraulic works in Tarija, Bolivia. 3D printing allows the rapid and economical fabrication of customized prototypes, optimizing design and reducing costs. We collaborated with WinFLume software to design accurate and customized gauges, improving water resource management. Materials such as PLA and PETG were used in 3D printing to create detailed and durable components. The evaluation of these models was performed with Kinovea software, which analyzes the behavior of fluids in hydraulic models, providing accurate data to adjust and optimize designs. The results highlight the capacity of the physical hydraulic models to simulate and study phenomena such as erosion and sedimentation. In addition, collaboration with educational and research institutions is highlighted to advance water risk management and ecological sustainability. In conclusion, the integration of 3D printing and analysis tools such as Kinovea is transforming hydraulic engineering, offering new opportunities for research, development and education in this field.

Palabras Clave: Impresión 3D, Modelos físicos, Hidráulica, Kinovea.

Keywords: 3D Printing, Physical Models, Hydraulics, Kinovea.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos físicos hidráulicos son herramientas esenciales en el diseño y verificación del funcionamiento de estructuras hidráulicas. Su importancia se explica en detalle a continuación:

Simulación Realista: Los modelos físicos permiten simular de manera realista el comportamiento del agua en diferentes escenarios, lo que ayuda a los ingenieros a entender cómo interactuará una estructura con su entorno. (Rocha Felices, 2003)

Los modelos hidráulicos deben definir sus escalas estableciendo las fuerzas preponderantes del modelo. Así, en los flujos en régimen libre (aliviaderos y descargas por desagües de fondo de presas, ríos y canales, etc.) suele ser imprescindible tomar en cuenta la acción de la gravedad, es decir además de la invariancia del número de Euler se ha de asegurar la del número de Froude. (Mateos, 2000)

Optimización del Diseño: Al probar diferentes diseños en un modelo físico, se pueden identificar y corregir problemas antes de la construcción, optimizando así el diseño final para mejorar su eficiencia y funcionalidad. (Barrios Córdova, Vaquera Huerta, Romero Padilla, Crossa, & Burguete Hernández, 2020)

Pruebas de Capacidad Hidráulica: Los modelos físicos se utilizan para determinar la capacidad hidráulica de estructuras como canales, tuberías y vertederos, asegurando que puedan manejar los caudales previstos sin fallos. (López Fernández, Ruiz Díaz Cardoso, de Dios, & Liscia, 2018)

Interacción con Modelos Computacionales: Complementan los modelos computacionales, proporcionando datos empíricos que mejoran la precisión y confiabilidad de las simulaciones numéricas. (Flores, Servín, & Mendoza, 2019)

Diseño de Vertederos y Presas: Determinación de coeficientes de descarga y optimización del diseño para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente. (Bautista Hernández, Palacios Vélez, Jiménez Magaña, & Arteaga Tovar, 2021)

Los modelos físicos hidráulicos son una herramienta invaluable en la ingeniería hidráulica, proporcionando datos precisos y confiables que mejoran el diseño, la seguridad y la eficiencia de las estructuras hidráulicas.

Una referencia importante del abordaje de los modelos físicos hidráulicos a escala reducida representa JBA Trust, que ha revolucionado el entendimiento de fenómenos hidráulicos mediante el uso de modelos hidráulicos reducidos, facilitando una comprensión más profunda y precisa de los procesos fluviales y costeros. Aquí se detalla cómo lo han logrado:

Modelos Físicos Reducidos.- JBA Trust utiliza modelos físicos a escala reducida para simular y estudiar el comportamiento del agua en diferentes escenarios. Estos modelos permiten observar y analizar fenómenos como la erosión, sedimentación, y el impacto de estructuras hidráulicas en un entorno controlado. (JBA Trust, 2022)

Investigación y Educación.- La organización colabora con universidades, industrias y gobiernos para llevar a cabo investigaciones avanzadas en gestión de riesgos hídricos y sostenibilidad ecológica (JBA Trust, 2022). Los modelos físicos reducidos son una herramienta clave en estos estudios, proporcionando datos empíricos que complementan los modelos computacionales.

Recursos Educativos.- JBA Trust también desarrolla recursos educativos y materiales didácticos basados en sus investigaciones con modelos físicos. Estos recursos ayudan a estudiantes y profesionales a entender mejor los principios de la hidráulica y la gestión del agua. (JBA Trust, 2022)

La incorporación de la impresión 3D ha revolucionado los modelos físicos hidráulicos en varios aspectos clave. Se explican los factores más importantes:

La impresión 3D permite la creación de componentes con un nivel de precisión y detalle que sería difícil de lograr con métodos tradicionales. El empleo de modelos físicos hidráulicos que utilizan elementos fabricados con impresoras 3D es de gran importancia en la ingeniería hidráulica y la gestión de recursos hídricos. Aquí se destacan algunas de las principales razones:

Prototipado Rápido y Económico

Agilidad en el Desarrollo: La impresión 3D permite la creación rápida de prototipos, lo que facilita la iteración y mejora del diseño en menos tiempo y con menor costo comparado con métodos tradicionales¹. (Cruz, 2022) **Reducción de Costos:** La fabricación aditiva reduce significativamente los costos de producción y transporte, especialmente para modelos a pequeña escala o en ubicaciones remotas¹. (Cruz, 2022)

Personalización y Flexibilidad

Diseños Personalizados: La impresión 3D permite fabricar modelos con geometrías complejas y personalizadas que se adaptan a las condiciones específicas del sitio de estudio². (Stefano, Prieto Fernández, & León Méndez, 2021) **Materiales Diversos:** Se pueden utilizar diferentes materiales para imprimir los modelos, adaptándose a las necesidades específicas de resistencia y durabilidad². (Stefano, Prieto Fernández, & León Méndez, 2021)

Investigación y Desarrollo

Innovación Tecnológica: La combinación de impresión 3D y modelación hidráulica fomenta la innovación en el diseño de estructuras hidráulicas, permitiendo experimentar con nuevas formas y configuraciones. **Estudios Avanzados:** Facilita la realización de investigaciones avanzadas y la vali-

dación de teorías hidráulicas mediante modelos físicos precisos.

Educación y Capacitación

Herramienta Didáctica: Los modelos impresos en 3D son excelentes herramientas educativas, permitiendo a estudiantes y profesionales visualizar y comprender mejor los conceptos hidráulicos y las dinámicas de flujo. **Capacitación Práctica:** Proporcionan una plataforma práctica para la capacitación en técnicas de modelación y análisis hidráulico.

Sostenibilidad y Eficiencia

Minimización de Desperdicios: La fabricación aditiva minimiza el desperdicio de material en comparación con los métodos tradicionales de manufactura. **Sostenibilidad:** La capacidad de producir modelos localmente reduce la huella de carbono asociada con el transporte y la logística.

El uso de modelos físicos hidráulicos fabricados con impresoras 3D ofrece numerosas ventajas, desde la reducción de costos y tiempos de desarrollo hasta la mejora en la precisión y personalización de los diseños. Esta tecnología no solo optimiza el proceso de diseño y construcción de estructuras hidráulicas, sino que también impulsa la innovación y la sostenibilidad en la ingeniería hidráulica.

Gracias a la impresión 3D, el diseño y empleo de aforadores utilizando el software WinFLume (Brigido Morales, Carrillo García, Prado Hernández, & Flores Velázquez, 2024) (USDA United States Department of Agriculture, 2024), representa un avance en la ingeniería hidráulica y la gestión de recursos hídricos. Su importancia y las ventajas de combinar ambas tecnologías se detalla a continuación:

Posibilidades de la Impresión 3D en la Diversidad de Modelos

1. **Prototipado Rápido. Agilidad:** La impresión 3D permite crear prototipos de aforadores de manera rápida y económica, facilitando la iteración

y mejora del diseño. Pruebas y Ajustes: Los modelos impresos en 3D pueden ser probados y ajustados fácilmente, lo que acelera el proceso de desarrollo.

2. Personalización y Flexibilidad. Diseños Personalizados: La impresión 3D permite fabricar aforadores con geometrías complejas y personalizadas que se adapten a condiciones específicas del sitio. Materiales Diversos: Se pueden utilizar diferentes materiales para imprimir los aforadores, adaptándose a las necesidades específicas de resistencia y durabilidad.
3. Reducción de Costos. Eficiencia Económica: La impresión 3D reduce los costos de fabricación y transporte, especialmente para modelos a pequeña escala o en ubicaciones remotas. Menor Desperdicio: La fabricación aditiva minimiza el desperdicio de material en comparación con los métodos tradicionales de manufactura. Innovación y Experimentación: Nuevas Tecnologías: La combinación de WinFLume y la impresión 3D fomenta la innovación en el diseño de aforadores, permitiendo experimentar con nuevas formas y configuraciones. Investigación Avanzada: Facilita la realización de investigaciones avanzadas y la validación de teorías hidráulicas mediante modelos físicos precisos.

El uso combinado de WinFLume y la impresión 3D ofrece una metodología robusta y eficiente para el diseño y empleo de aforadores, mejorando la precisión, personalización y eficiencia en la gestión de recursos hídricos. Esta sinergia permite avanzar en la investigación y desarrollo de soluciones hidráulicas innovadoras y sostenibles.

La aplicación de modelos hidráulicos físicos ha avanzado significativamente con la incorporación de la tecnología de impresión 3D, utilizando materiales como PLA, PETG y resina. Estos materiales permiten la creación de componentes detallados y

precisos, optimizando tanto el tiempo como los costos de producción.

La evaluación de estos modelos se realiza mediante el uso del software Kinovea, una herramienta de análisis de video que permite medir y analizar el comportamiento de los fluidos en los modelos hidráulicos. Kinovea facilita la captura de datos precisos sobre el flujo y la dinámica del agua, permitiendo a los ingenieros ajustar y optimizar los diseños de manera eficiente.

La integración de la impresión 3D con materiales como PLA y PETG, junto con la evaluación mediante Kinovea, está transformando la manera en que se diseñan y prueban los modelos hidráulicos físicos, ofreciendo nuevas oportunidades para la investigación y el desarrollo en el campo de la ingeniería hidráulica.

El software Kinovea (Chartman & Contributors, 2024), conocido principalmente por su uso en el análisis de movimientos deportivos, también tiene aplicaciones significativas en la evaluación de fenómenos hidráulicos. Aquí te explico algunas de sus aplicaciones y su importancia:

Precisión y Confiabilidad: Kinovea proporciona mediciones precisas y confiables, esenciales para la validación de modelos y la toma de decisiones informadas en proyectos hidráulicos².

Accesibilidad y Costo: Es un software gratuito y de código abierto, lo que lo hace accesible para investigadores, estudiantes y profesionales sin incurrir en altos costos¹.

Facilidad de Uso: Su interfaz intuitiva y herramientas de análisis fáciles de usar permiten a los usuarios realizar estudios complejos sin necesidad de equipos costosos o especializados².

Versatilidad: Kinovea es versátil y se puede aplicar en una amplia gama de estudios hidráulicos, desde

la investigación académica hasta la implementación práctica en proyectos de ingeniería³.

Integración con Otros Sistemas: Los datos obtenidos con Kinovea se pueden exportar a hojas de cálculo y otros programas de análisis, facilitando la integración con otros sistemas de gestión y análisis de datos. El software Kinovea es una herramienta poderosa y accesible que ha revolucionado la evaluación de fenómenos hidráulicos, proporcionando datos precisos y confiables que son esenciales para la investigación y la gestión eficiente de los recursos hídricos.

Entre los artículos referidos al tema y revisados en el contexto internacional se ha encontrado diversos que tratan la temática de las obras hidráulicas fabricadas con impresoras 3D, que contribuyen con el desarrollo de un modelo físico hidráulico, sin embargo, no se ha encontrado alguna que emplee a la vez el software Kinovea. Se destacan del artículos 3D Printing Technique for Experimental Modeling of Hydraulic Structures: Exemplary Scaled Weir Models (Oertel & Shen, 2022), que ha sido aplicado a un tipo de vertedero escalado, impresora 3D Creativity Ender 3, material PLA (ácido poliláctico), software de diseño 3D AutoCAD.

En nuestro país y específicamente en el Departamento de Tarija, en la actualidad los estudios de futuras obras hidráulicas a través de modelos físicos son demasiado caros, debido a la tecnología y escala que se aplica. Por ello la modelación de obras de infraestructura hidráulica y/o los componentes a escala reducida e incorporando nuevo software e impresión 3D, servirá para elaborar modelos físicos a escala reducida, diseñados en el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la UAJMS, los cuales serán de vital importancia no solo por la reducción de los costos que ello implica, sino también por el aporte al desarrollo académico y el estudiar la probabilidad de cuál será el comportamiento de este tipo de obras a pequeña escala y costos reducidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo físico hidráulico adoptado es de la invariancia del número de Froude, por la preponderancia de las fuerzas de gravedad en el modelo, al ser de flujo libre. El tipo de investigación que se desarrolla al crear una metodología para la modelación hidráulica de un vertedero tipo Creager fabricado con impresora 3D y la estimación de velocidades y trayectorias de flujo utilizando el software Kinovea se clasifica como investigación experimental con un componente de análisis computacional. Se detalla el por qué a continuación:

Investigación Experimental

Definición: Implica la manipulación de variables independientes para observar y medir sus efectos sobre variables dependientes en un entorno controlado. **Control de Variables:** Se controlan y manipulan variables como el caudal de agua y las dimensiones del vertedero. **Repetibilidad:** Los experimentos pueden repetirse para verificar la consistencia de los resultados. **Entorno Controlado:** Se realiza en un entorno controlado, como un canal de flujo de vidrio reforzado. **Manipulación de Variables:** Caudal de agua, diseño del vertedero. **Medición de Resultados:** Comportamiento del flujo sobre el vertedero, variación de velocidades a lo largo del sistema de canal y vertedero.

Análisis Computacional

Definición: Utiliza herramientas y software para analizar datos y simular fenómenos físicos. **Procesamiento de Datos:** Emplea software para analizar y visualizar datos experimentales. **Simulación y Modelado:** Permite simular condiciones que pueden ser difíciles de replicar físicamente. **Aplicación en el Proyecto:** Software Kinovea: Utilizado para estimar velocidades y trayectorias de flujo a partir de videos del experimento. **Análisis de Datos:** Kinovea permite analizar el movimiento del agua sobre el vertedero,

proporcionando datos precisos sobre velocidades y trayectorias.

Vertedero Tipo Creager fabricado con Impresora 3D

Variable Independiente: Caudal de agua, diseño del vertedero. Variable Dependiente: Velocidades y trayectorias del flujo. Entorno Controlado: Canal de flujo de vidrio reforzado fabricado e instalado en el CIAGUA con instrumentos de medición. Herramienta Computacional: Kinovea para análisis de video.

Este tipo de investigación combina la experimentación física con el análisis computacional, proporcionando una metodología robusta para estudiar y entender el comportamiento hidráulico de vertederos tipo Creager. La integración de herramientas como

Kinovea permite obtener datos detallados y precisos, mejorando la calidad y la profundidad del análisis.

La metodología en detalle elaborada y aplicada consiste de los siguientes pasos:

Metodología para Medir Velocidad y Trayectorias del Flujo en Modelos Hidráulicos con Impresora 3D

Todo el sistema que se ha implementado para realizar las mediciones y estimaciones de los parámetros hidráulicos ha sido planteado para poder garantizar mediciones adecuadas a través de todos los componentes. El siguiente gráfico ilustra el esquema general de la metodología seguida para poder garantizar mediciones con cada uno de los componentes del proyecto de investigación:

Figura 1: Esquema de la investigación de modelos hidráulicos con elementos fabricados con impresora 3D



Fuente: Elaboración propia

Los pasos seguidos se detallan a continuación:

1. Diseño de un Canal de Vidrio con SolidWorks

Modelado del Canal: Se ha empleado SolidWorks para diseñar un canal de vidrio con dimensiones específicas. Se han revisado y elaborado detalles para

la conexión del canal con la mesa de sujeción y los elementos de impresora 3D. Simulación: Realiza simulaciones de flujo en SolidWorks para verificar el diseño y optimizar la geometría del canal.

Para realizar el diseño hidráulico del canal se han analizado las velocidades de ingreso para elegir el

diámetro de la boquilla de acceso al sistema del canal, es así que el diámetro de 2 pulgadas es el que muestra un valor de la velocidad razonable y equi-

valente a 0.08 m/s y 0.74 m/s, para los caudales mínimo de 10 l/min y máximo de 90 l/min, respectivamente, que alimenta el sistema de bombeo.

Tabla 1: Tabla de elección de boquilla de acceso del agua bombeada

Boquilla Salida		Q (l/min)	Velocidad (m/s)
Diámetro (") =	1	10	0.32892087
Diámetro (mm) =	25.4	90	2.96028786
Boquilla Salida		Q (l/min)	Velocidad (m/s)
Diámetro (") =	1.5	10	0.14618705
Diámetro (mm) =	38.1	90	1.31568349
Boquilla Salida		Q (l/min)	Velocidad (m/s)
Diámetro (") =	2	10	0.08223022
Diámetro (mm) =	50.8	90	0.74007197

Fuente: Elaboración propia

El sistema de recirculación recorrerá un sector de sección rectangular que también deberá preservar velocidades de flujo adecuadas, esto se puede lograr con 2 secciones, una de 0.3 m x 0.1 m y otra con

0.1 m x 0.1 m, como se puede observar en la siguiente tabla, en donde figuran velocidades que fluctúan entre valores comprendidos entre 0.0056 m/s hasta 0.15 m/s.

Tabla 2: Tabla de elección de dimensiones del canal de vidrio que coincide con el sistema de recirculación

Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.45	0.30	0.1350	0.0012	0.270	1620.0
	0.25	0.1125	0.0015	0.225	1350.0
	0.20	0.0900	0.0019	0.180	1080.0
	0.15	0.0675	0.0025	0.135	810.0
	0.10	0.0450	0.0037	0.090	540.0
	0.05	0.0225	0.0074	0.045	270.0
Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.45	0.30	0.1350	0.0111	0.270	180.0
	0.25	0.1125	0.0133	0.225	150.0
	0.20	0.0900	0.0167	0.180	120.0
	0.15	0.0675	0.0222	0.135	90.0
	0.10	0.0450	0.0333	0.090	60.0
	0.05	0.0225	0.0667	0.045	30.0

Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.3	0.30	0.0900	0.0019	0.180	1080.0
	0.25	0.0750	0.0022	0.150	900.0
	0.20	0.0600	0.0028	0.120	720.0
	0.15	0.0450	0.0037	0.090	540.0
	0.10	0.0300	0.0056	0.060	360.0
	0.05	0.0150	0.0111	0.030	180.0

Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.3	0.30	0.0900	0.0167	0.180	120.0
	0.25	0.0750	0.0200	0.150	100.0
	0.20	0.0600	0.0250	0.120	80.0
	0.15	0.0450	0.0333	0.090	60.0
	0.10	0.0300	0.0500	0.060	40.0
	0.05	0.0150	0.1000	0.030	20.0

Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.2	0.30	0.0600	0.0028	0.120	720.0
	0.25	0.0500	0.0033	0.100	600.0
	0.20	0.0400	0.0042	0.080	480.0
	0.15	0.0300	0.0056	0.060	360.0
	0.10	0.0200	0.0083	0.040	240.0
	0.05	0.0100	0.0167	0.020	120.0

Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.2	0.30	0.0600	0.0250	0.120	80.0
	0.25	0.0500	0.0300	0.100	66.7
	0.20	0.0400	0.0375	0.080	53.3
	0.15	0.0300	0.0500	0.060	40.0
	0.10	0.0200	0.0750	0.040	26.7
	0.05	0.0100	0.1500	0.020	13.3

Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.1	0.30	0.0300	0.0056	0.060	360.0
	0.25	0.0250	0.0067	0.050	300.0
	0.20	0.0200	0.0083	0.040	240.0
	0.15	0.0150	0.0111	0.030	180.0
	0.10	0.0100	0.0167	0.020	120.0
	0.05	0.0050	0.0333	0.010	60.0

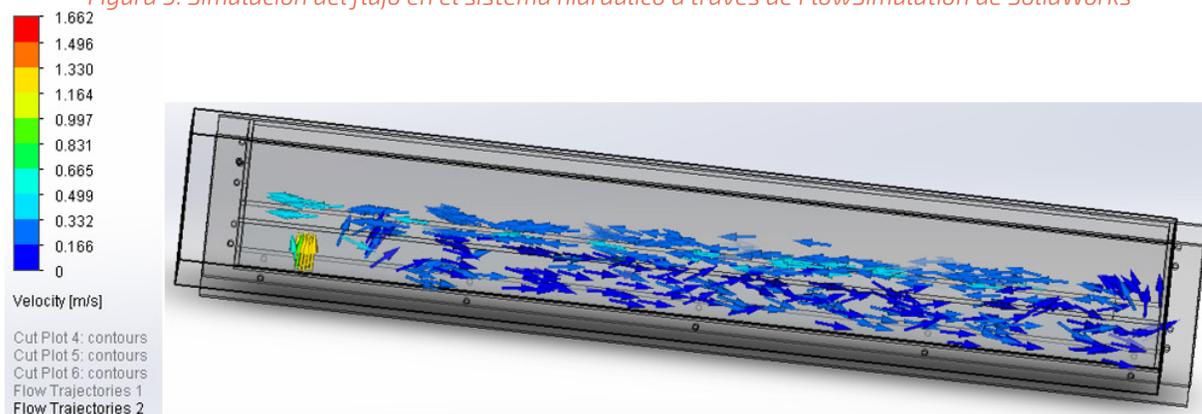
Ancho (m)	Alto (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Volumen (m ³)	Tiempo (s)
0.1	0.30	0.0300	0.0500	0.060	40.0
	0.25	0.0250	0.0600	0.050	33.3
	0.20	0.0200	0.0750	0.040	26.7
	0.15	0.0150	0.1000	0.030	20.0
	0.10	0.0100	0.1500	0.020	13.3
	0.05	0.0050	0.3000	0.010	6.7

Fuente: Elaboración propia

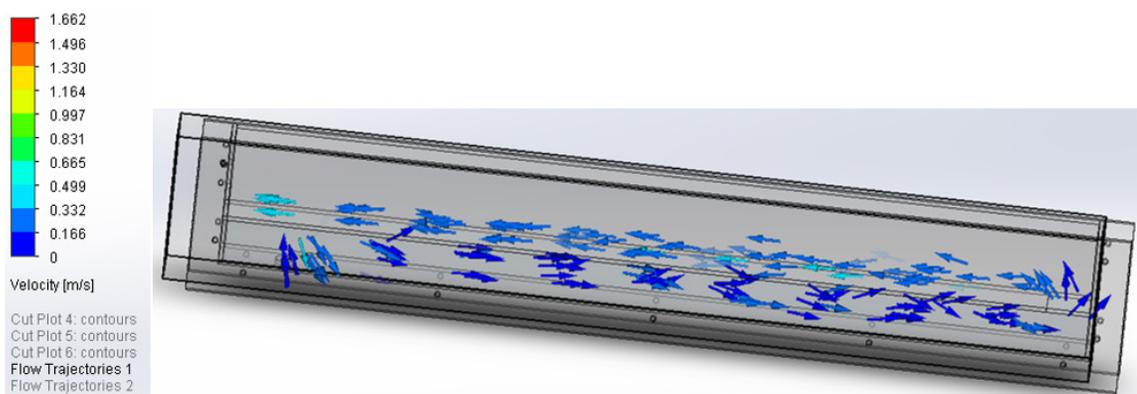
Una vez adoptadas las dimensiones que hidráulicamente permiten manejar un sistema que permita realizar modelaciones hidráulicas, seguidamente se han verificado mediante el complemento Flow-

Simulation de SolidWorks el valor las principales variables hidráulicas de presión y velocidad para garantizar un correcto diseño hidráulico, como se puede observar en las siguientes imágenes.

Figura 3: Simulación del flujo en el sistema hidráulico a través de FlowSimulation de SolidWorks



Simulación del flujo en el canal de vidrio para un caudal mínimo de 10 litros/minuto



Simulación del flujo en el canal de vidrio para un caudal máximo de 90 litros/minuto

2. Diseño de un Vertedero Hidráulico Tipo Creager con Impresora 3D

Modelado del Vertedero: Diseño del vertedero tipo Creager en SolidWorks, asegurando de que las dimensiones sean precisas.

El vertedero se ha adoptado el del Proyecto de la Presa Carachimayo, considerando que se modela-

rá un segmento únicamente del mismo, por lo que es necesario determinar los tirantes del segmento que se modelará. En las siguientes tablas se pueden observar los caudales de referencia para el vertedero de excedencias de la presa Carachimayo, para periodos de retorno de 1,000 años y 10,000 años, y los determinados para la escala de 1:30 aplicada al modelo.

Tabla 3: Caudales reales y a la escala 1:30 del modelo físico para T = 1,000 años

Longitud Vertedero [m]	T = 1000 Años			
	Q laminado [m ³ /seg]		Tirante [m]	
	HEC-HMS	Modelo Físico	HEC-HMS	Modelo Físico
10	59.3	0.0120	2.06	0.0687
12.5	66.8	0.0136	1.93	0.0643
15	72.7	0.0147	1.8	0.0600
17.5	77.9	0.0158	1.7	0.0567
20	82.1	0.0167	1.62	0.0540
22.5	85.8	0.0174	1.54	0.0513
25	89.2	0.0181	1.47	0.0490
27.5	92	0.0187	1.41	0.0470
30	94.4	0.0192	1.35	0.0450

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4: Caudales reales y a la escala 1:30 del modelo físico para T = 10,000 años

Longitud Vertedero [m]	T = 10000 Años			
	Q laminado [m ³ /seg]		Tirante [m]	
	HEC-HMS	Modelo Físico	HEC-HMS	Modelo Físico
10	172.2	1.42E-05	4.2	0.1400
12.5	126.2	1.04E-05	2.94	0.0980
15	136.2	1.12E-05	2.74	0.0913
17.5	144.9	1.19E-05	2.58	0.0860
20	151.8	1.25E-05	2.43	0.0810
22.5	158.1	1.30E-05	2.31	0.0770
25	163.6	1.35E-05	2.2	0.0733
27.5	168.1	1.38E-05	2.11	0.0703
30	172.2	1.42E-05	2.02	0.0673

Fuente: Elaboración propia

De esta manera con los valores revisados del modelo, se han determinado los tirantes sobre el

vertedero considerando una sección de vertimiento y el mismo caudal máximo dado por el sistema de bombeo.

Tabla 5: Tirantes estimados sobre el vertedero para la sección parcial del vertedero calculada

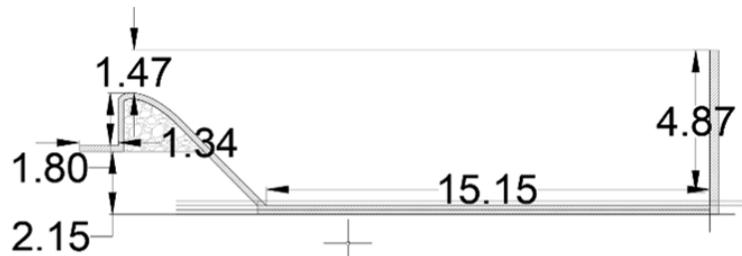
Longitud Vertedero [m]		Q [m ³ /s]		Tirante [m]	
Real	Escala	Real	Escala	Real	Escala
20	0.667	7.394	0.0015	0.325	0.011
3	0.100	7.394	0.0015	1.149	0.038
9	0.3	7.394	0.0015	0.553	0.018

Fuente: Elaboración propia

Con tales valores se ha validado el uso de las dimensiones del vertedero de la presa Carachimayo y se han ajustado los valores del borde superior del canal.

Impresión 3D: Se ha exportado el diseño a un formato compatible con la impresora 3D Artillery SiedeWinder, y se realizó la impresión del modelo 3D.

Figura 3: Sección original del vertedero tipo Creager a escala real de la presa Carachimayo

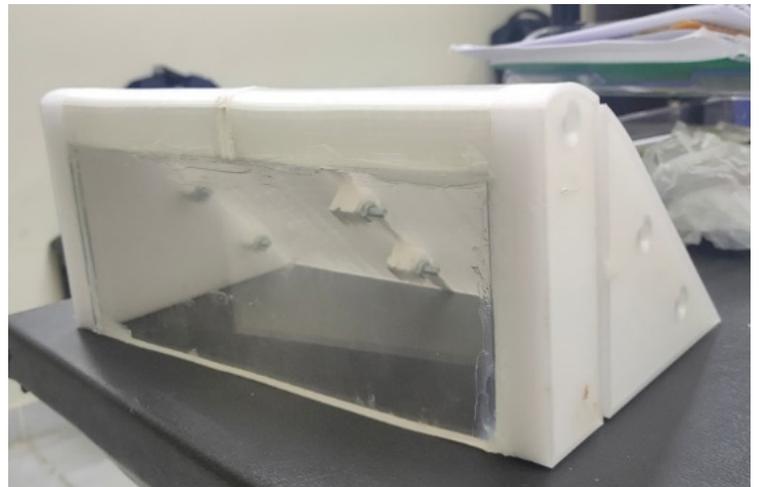


Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Vertederos tipo Creager fabricados con impresora 3D a escala 1:30



Vertedero tipo Creager de 10 cm de longitud



Vertedero tipo Creager de 30 cm de longitud

Hasta este punto se han definido todos los materiales a ser empleados para realizar las mediciones en el modelo físico. Con tales valores se han realizado los pasos que corresponden a la metodología y que se indican a continuación:

1. Mediciones del Caudal con el Ultrasonic Flowmeter PCE-TDS 100 HS. Instalación del Equipo: Colocado de los sensores del caudalímetro ultrasónico en la tubería que alimenta el sistema de bombeo de recirculación del sistema. Medición: Realizado de mediciones del caudal a diferentes velocidades de flujo y registro de los datos.
2. Mediciones de Caudal con Micromolinete FlowWatch JDC Instruments. Preparación del Micromolinete: Colocado del micromolinete en diferentes puntos del canal para medir la velocidad del flujo. Registro de Datos: Registro las velocidades medidas en cada punto del vertedero y del canal de medición y cálculo del caudal total.
3. Verificación de Detección de Movimiento con Free-Fall Apparatus 3B ELWE y Kinovea. Configuración del Ensayo de Caída Libre: Realizar ensayos de caída libre para calibrar la cámara del celular. Calibración con Kinovea: Utiliza Kinovea para calibrar la cámara, estableciendo una escala de referencia.
4. Verificación de Movimiento con Short Range Projectile Launcher PASCO ME-6800 y Kinovea. Configuración del Ensayo de Movimiento Parabólico: Realizar ensayos de lanzamiento parabólico para calibrar la cámara del celular. Calibración con Kinovea: Utilizar Kinovea para calibrar la cámara, asegurando precisión en la detección de movimiento.
5. Determinación de Velocidad y Trayectoria de Flujo en Canales Hidráulicos con Kinovea. Preparación del Canal: Coloca pelotas de plastofor-

mo de diferentes diámetros en el canal. Análisis con Kinovea: Utiliza Kinovea para seguir el movimiento de las pelotas y determinar la velocidad y trayectoria del flujo.

6. Evaluación de la Eficiencia en la Detección de Velocidad y Trayectoria con Kinovea. Configuración de Marcadores: Colocado de múltiples marcadores en el canal para mejorar la precisión de la medición. Análisis de Continuidad: Evaluación de la continuidad de la medición y la precisión de la velocidad medida con Kinovea.
7. Establecimiento de Rangos de Detección de Velocidades con Kinovea. Pruebas de Velocidad: Realización de pruebas a diferentes velocidades de flujo y registra los datos. Análisis de Rangos: Se determina los rangos de detección de velocidades que Kinovea puede medir con precisión.

Esta metodología permite realizar mediciones precisas y detalladas de la velocidad y trayectoria del flujo hidráulico, utilizando una combinación de herramientas de diseño, fabricación y análisis.

Las siguientes metodologías son complementarias y ampliadas de lo requerido para realizar una estimación de caudales medidos en el sistema.

Metodología de Medición con el caudalímetro de flujo acústico PCE-TDS 100 HS

Para garantizar mediciones adecuadas es necesario adecuar una Metodología de Medición con el caudalímetro de flujo acústico PCE-TDS 100 HS, para registrar caudales que son conducidos en el canal de vidrio construido.

Verificación de Detección de Movimiento con Free-Fall Apparatus 3B ELWE y Kinovea

Materiales Necesarios: Instrumento de caída libre, Cronómetro, Regla o cinta métrica, Celular con cámara, Software Kinovea (descargado e instalado en computadora)

Figura 5: Equipo de medición de caída libre



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

Preparación del Instrumento de Caída Libre: Se coloca el instrumento de caída libre en una superficie estable. Se asegura de que el objeto a soltar esté correctamente alineado y listo para caer sin obstrucciones.

Medición de la Altura: Se utiliza la regla o cinta métrica para medir la altura desde la que se soltará el objeto. Se anota esta medida, ya que será necesaria para los cálculos posteriores.

Grabación del Video: Se coloca el celular en un trípode o en una superficie estable para evitar movimientos durante la grabación. Se asegura de que la cámara del celular esté enfocada en el área donde el objeto caerá. Se inicia la grabación de video antes de soltar el objeto.

Realización del Experimento: Se suelta el objeto y utiliza el cronómetro para medir el tiempo que tar-

da en llegar al suelo. Se repite el experimento varias veces para obtener un promedio más preciso. Se verifica con el Software Kinovea.

Importación del Video: Se transfiere el video grabado desde el celular a tu computadora. Se abre el software Kinovea y carga el video.

Calibración del Video: Calibración por Línea: Si el movimiento está en un plano paralelo al plano de la imagen, se utiliza un objeto de longitud conocida visible en el video. Se agrega una línea en Kinovea sobre el objeto, luego se selecciona "Calibrar". Se introduce la longitud real del objeto. Calibración por Plano: Si el movimiento está en un plano 2D arbitrario, se utiliza un rectángulo de dimensiones conocidas visible en el video. Se agrega una cuadrícula de perspectiva en Kinovea y ajusta sus esquinas para que coincidan con el rectángulo. Haciendo clic derecho en una esquina se selecciona "Calibrar". Se introduce el ancho y la altura reales del rectángulo.

Análisis del Video: Se utiliza las herramientas de Kinovea para marcar el punto de inicio (cuando el objeto es soltado) y el punto de finalización (cuando el objeto toca el suelo). Kinovea permite medir el tiempo exacto de caída cuadro por cuadro, lo que puede ser más preciso que el cronómetro manual.

Cálculo de la Velocidad y Aceleración: Con la altura medida y el tiempo de caída obtenido, se puede calcular la velocidad y la aceleración del objeto utilizando las fórmulas de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado:

$$\text{Velocidad final: } v = \frac{2h}{t} \text{ [Ecuación 1],}$$

$$\text{Aceleración: } a = \frac{2h}{t^2} \text{ [Ecuación 2]}$$

Luego se compararon estos resultados con los obtenidos manualmente para verificar la precisión de las mediciones.

Verificación de Movimiento con Short Range Projectile Launcher PASCO ME-6800 y Kinovea

Materiales Necesarios: Instrumento de movimiento parabólico (lanzador de proyectiles), Cronómetro, Regla o cinta métrica, Celular con cámara, Software Kinovea (descargado e instalado en tu computadora)

Figura 6: Equipo de medición de caída libre



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

Preparación del Instrumento de Movimiento Parabólico: Se coloca el lanzador de proyectiles en una superficie estable y ajusta el ángulo de lanzamiento según lo requerido para el experimento. Se asegura el área de lanzamiento esté despejada y que el proyectil pueda moverse sin obstrucciones.

Medición de la Altura y Distancia: Se utiliza la regla o cinta métrica para medir la altura desde la que se lanzará el proyectil y la distancia horizontal que re-

correrá. Se anota estas medidas, ya que serán necesarias para los cálculos posteriores.

Grabación del Video: Se coloca el celular en un trípode o en una superficie estable para evitar movimientos durante la grabación. Se asegura de que la cámara del celular esté enfocada en el área donde el proyectil se moverá. Iniciar la grabación de video antes de lanzar el proyectil.

Realización del Experimento: Se lanza el proyectil y utilizar el cronómetro para medir el tiempo de vuelo. Se repite el experimento varias veces para obtener un promedio más preciso. Se verifica con Software Kinovea.

Importación del Video: Se transfiere el video grabado desde el celular a la computadora. Se abre el software Kinovea y carga el video.

Calibración del Video: Calibración por Línea: Si el movimiento está en un plano paralelo al plano de la imagen, se utiliza un objeto de longitud conocida visible en el video. Se agrega una línea en Kinovea sobre el objeto, haz clic derecho y selecciona "Calibrar". Se introduce la longitud real del objeto. Calibración por Plano: Si el movimiento está en un plano 2D arbitrario, se utiliza un rectángulo de dimensiones conocidas visible en el video. Se agrega una cuadrícula de perspectiva en Kinovea y se ajusta sus esquinas para que coincidan con el rectángulo. Se selecciona "Calibrar". Por último se Introduce el ancho y la altura reales del rectángulo.

Análisis del Video: Se utiliza las herramientas de Kinovea para marcar el punto de lanzamiento y el punto de impacto del proyectil. Kinovea permite medir el tiempo exacto de vuelo y la trayectoria del proyectil cuadro por cuadro. Cálculo de la Velocidad y Aceleración: Con la altura y distancia medidas, y el tiempo de vuelo obtenido, se puede calcular la velocidad inicial y la aceleración del proyectil utilizando las fórmulas de movimiento parabólico:

Velocidad inicial horizontal: $v_x = \frac{d}{t}$ [Ecuación 3],

Velocidad inicial vertical: $v_y = \frac{2h}{t}$ [Ecuación 4],

Aceleración: $a = \frac{2h}{t^2}$ [Ecuación 5]

Se comparan estos resultados con los obtenidos manualmente para verificar la precisión de las mediciones.

3. RESULTADOS

Aplicando la metodología planteada se han realizado primeramente para calibrar las mediciones de caída libre, movimiento, se han obtenido las mejores correlaciones que se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 6: Estimación de la aceleración gravitacional g con el equipo de caída libre para $h = 0.40$ m

Numero de Prueba	Altura (m)	Tiempo de Caída (ms)	g (m/s ²)
1	0.4	285	9.849
2	0.4	285	9.849
3	0.4	285	9.849
4	0.4	285	9.849
5	0.4	285	9.849

Fuente: Elaboración propia

g (promedio) = 9.849
 g (desviación estándar) = 0

Tabla 7: Estimación de la aceleración gravitacional g con el equipo de caída libre para $h = 0.60$ m

Numero de Prueba	Altura (m)	Tiempo de Caída (ms)	g (m/s ²)
1	0.6	349	9.852
2	0.6	349	9.852
3	0.6	349	9.852
4	0.6	349	9.852
5	0.6	349	9.852

Fuente: Elaboración propia

g (promedio) = 9.852
 g (desviación estándar) = 0

Se observa que la aceleración gravitacional tiene un valor elevado, que no concuerda con el valor esperado considerando una altura sobre el nivel del mar igual a 1866 msnm en el lugar de la medición, que debería estar en un valor de 9.804 m/s². Por tal mo-

tivo no se ha considerado esta prueba para la calibración de la cámara, además que con una resolución mínima de la cámara de video recomendada de 60 fps (sesenta fotogramas por segundo).

Tabla 8: Distancia horizontal hasta el punto de impacto medidos y estimados con el software Kinovea para el ensayo de movimiento parabólico

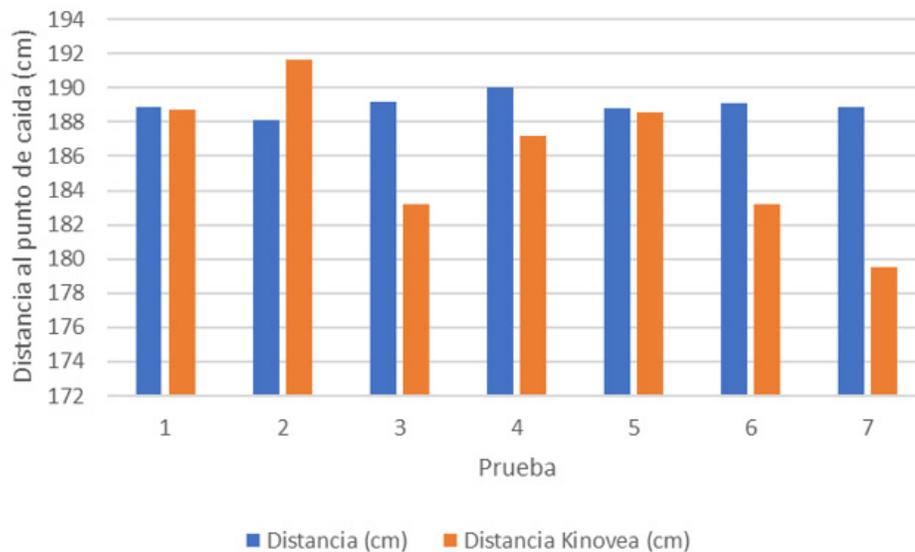
Número de Prueba	Altura (m)	Distancia (cm)	Distancia Kinovea (cm)	Diferencia Distancia Real / Distancia Kinovea (cm)	Variación Porcentual Diferencia Distancia Real / Distancia Kinovea (%)
1	0.6	188.9	188.699	0.201	0.11%
2	0.6	188.1	191.649	-3.549	-1.89%
3	0.6	189.2	183.164	6.036	3.19%
4	0.6	190	187.177	2.823	1.49%
5	0.6	188.8	188.546	0.254	0.13%
6	0.6	189.1	183.173	5.927	3.13%
7	0.6	188.9	179.484	9.416	4.98%

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los valores medidos de la distancia real y la distancia estimada con el software Kinovea sostienen una variación comprendida entre -1.89 %

a 4.98 %, una respecto de la otra, lo que sugiere un razonable ajuste a los valores medidos.

Figura 7: Distancia horizontal real y distancia horizontal kinovea del movimiento parabólico

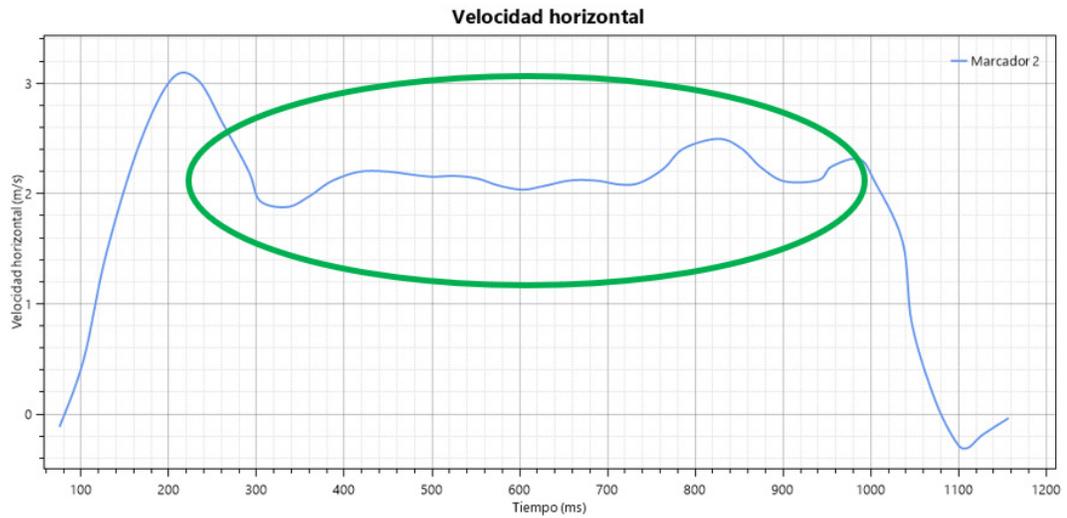


Fuente: Elaboración propia

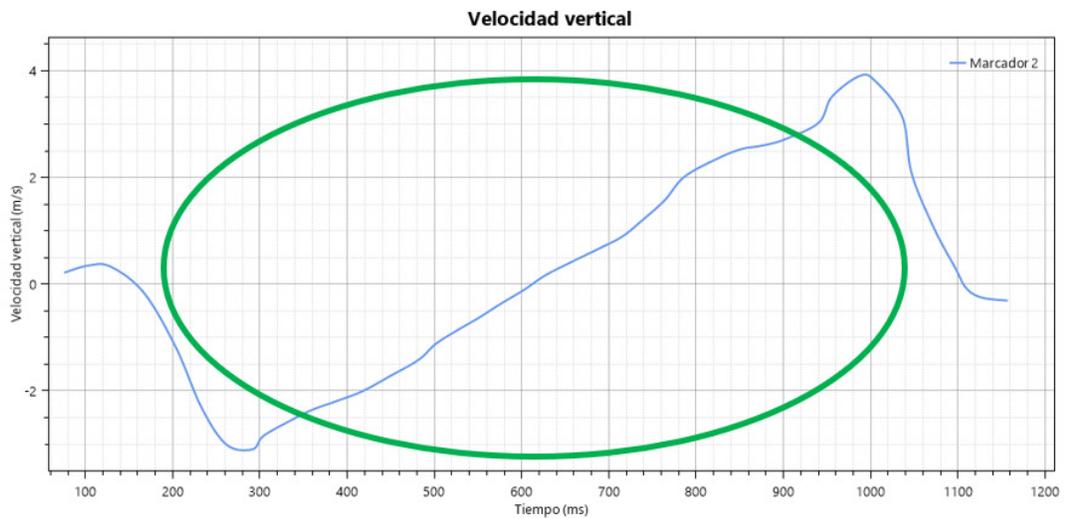
Asimismo, cuando se revisan los valores de la velocidad horizontal, velocidad vertical, aceleración horizontal, aceleración vertical, desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical, estimados por

el software Kinovea se observa que son coherentes con el movimiento parabólico. Por tanto se valida el uso del software Kinovea con la cámara calibrada para tal efecto.

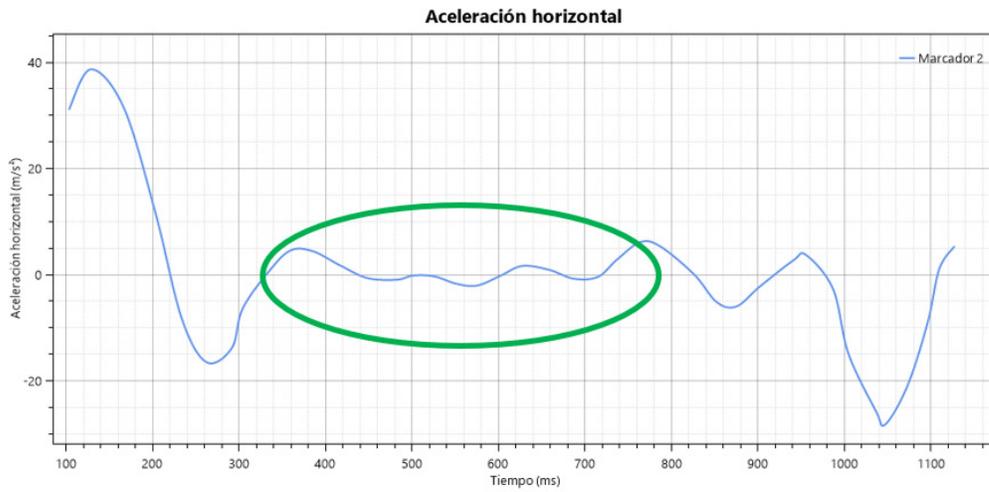
Figura 8: Procesamiento de imágenes de video con el software Kinovea del ensayo del movimiento parabólico



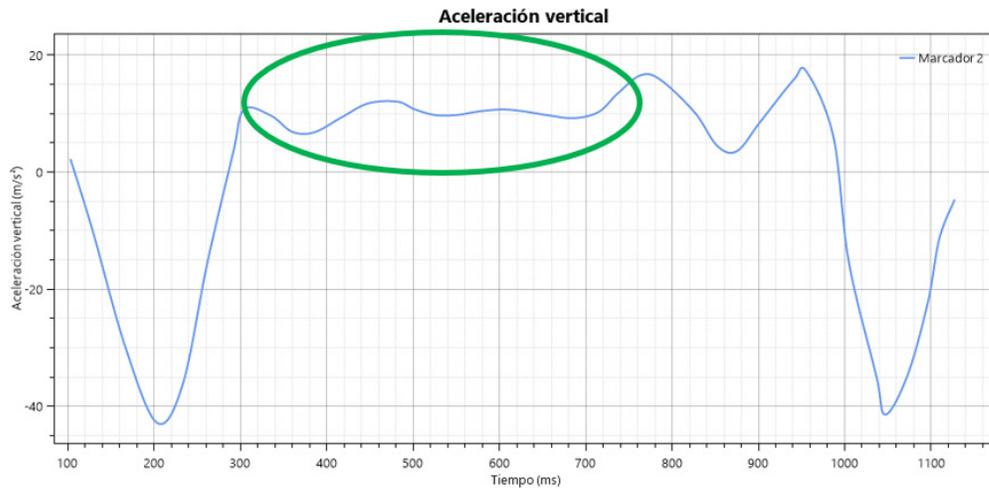
Velocidad Horizontal Movimiento Parabólico Experimento 1



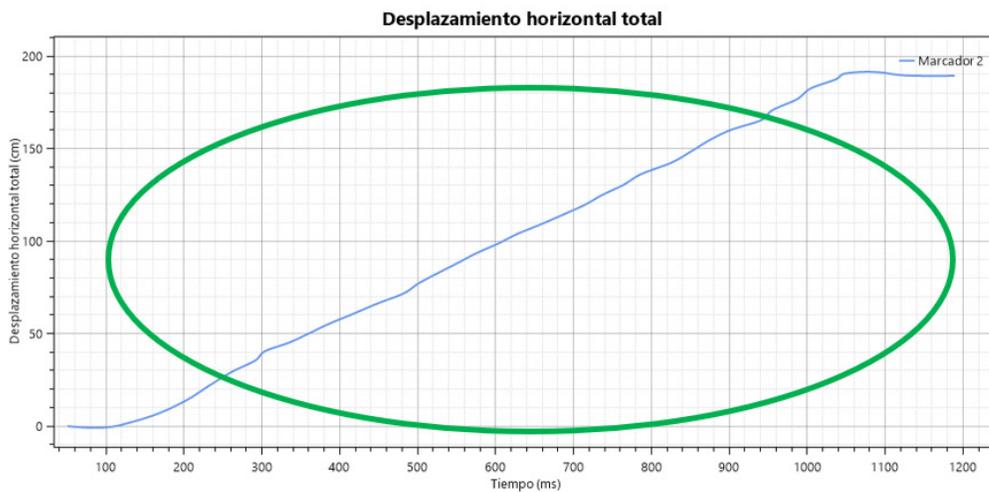
Velocidad Vertical Movimiento Parabólico Experimento 1



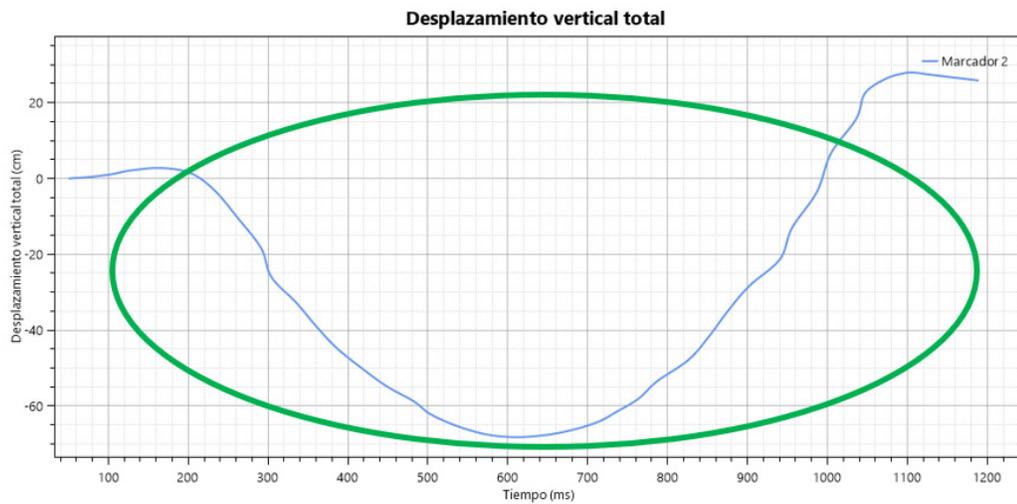
Aceleración Horizontal Movimiento Parabólico Experimento 1



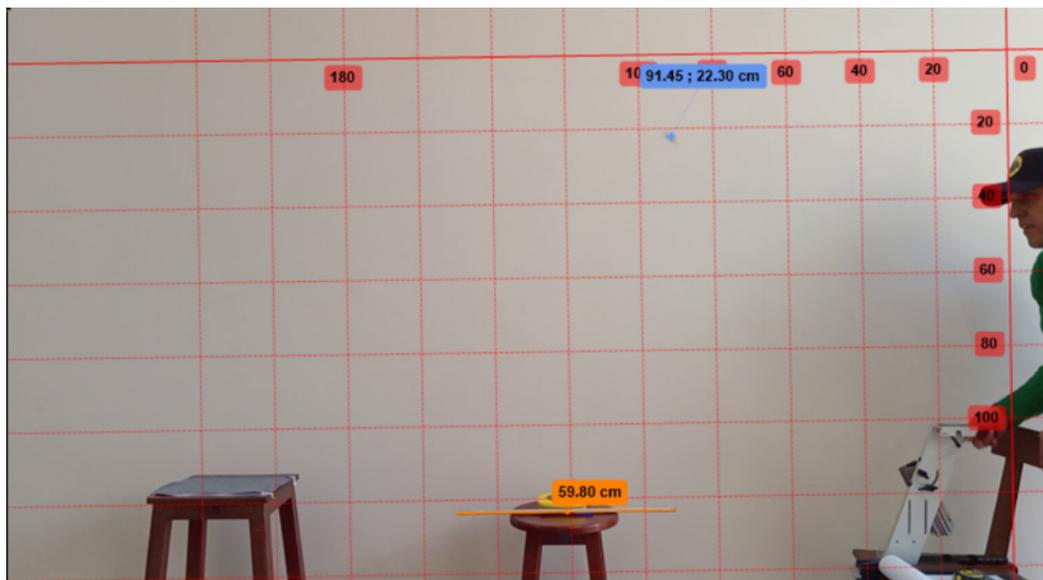
Aceleración Vertical Movimiento Parabólico Experimento 1



Desplazamiento Horizontal Movimiento Parabólico Experimento 1



Desplazamiento Vertical Movimiento Parabólico Experimento 1

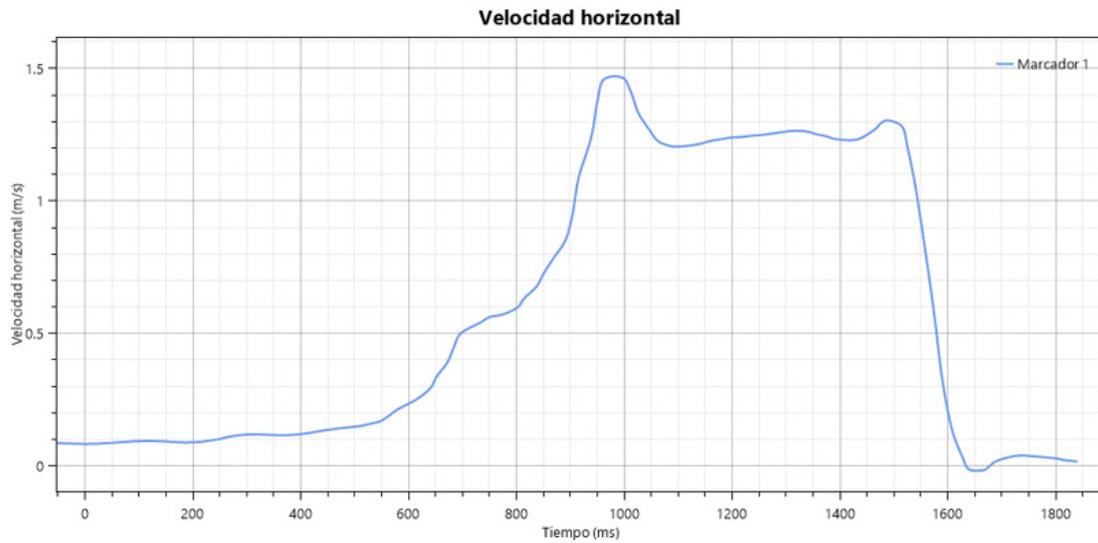


Captura de pantalla del software Kinovea Movimiento Parabólico experimento 1

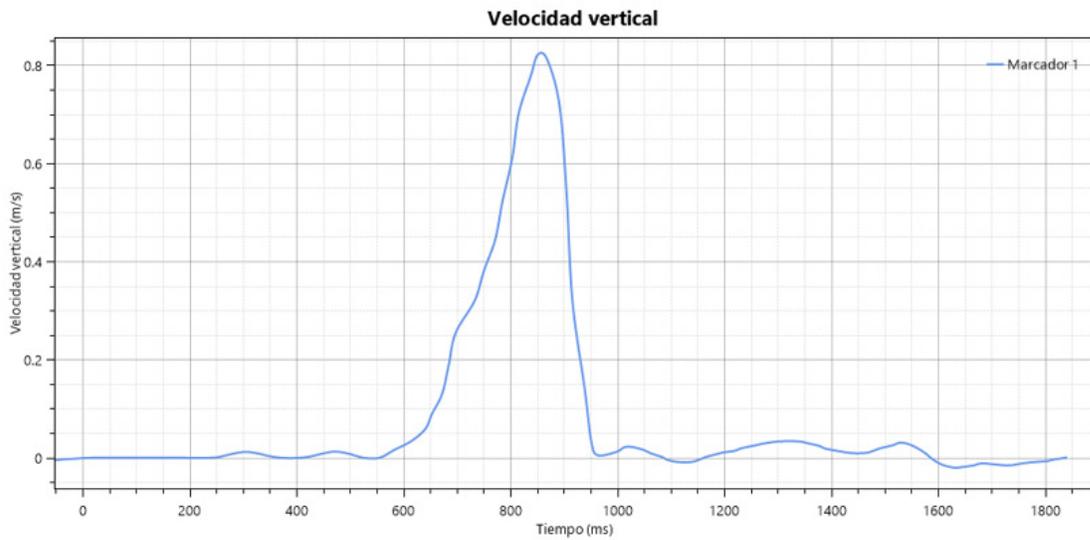
Una vez verificado el funcionamiento del software Kinovea para predecir distancias, velocidades y aceleraciones, se ha aplicado para evaluar el flujo su-

perficial, considerando flotadores sobre el flujo del perfil hidráulico del vertedero.

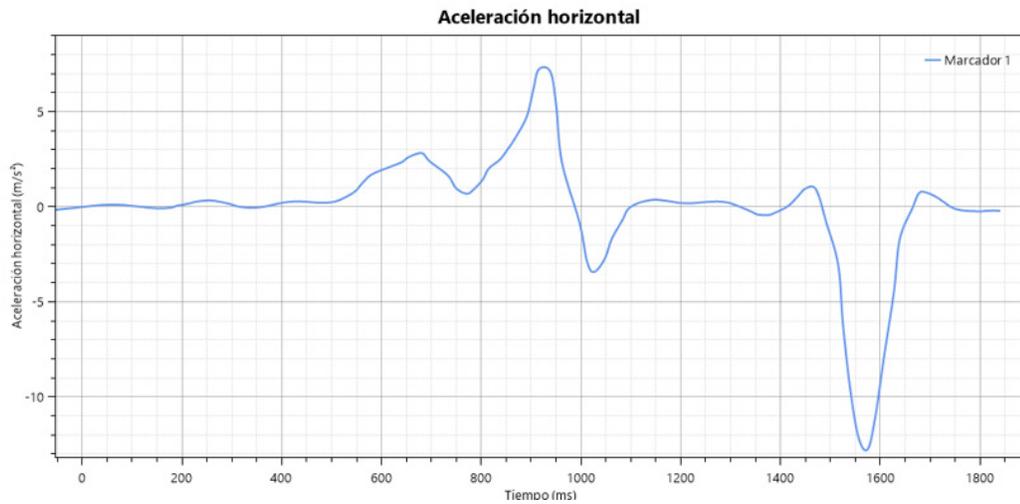
Figura 9: Procesamiento de imágenes de video con el software Kinovea del flujo hidráulico con el vertedero tipo Creager



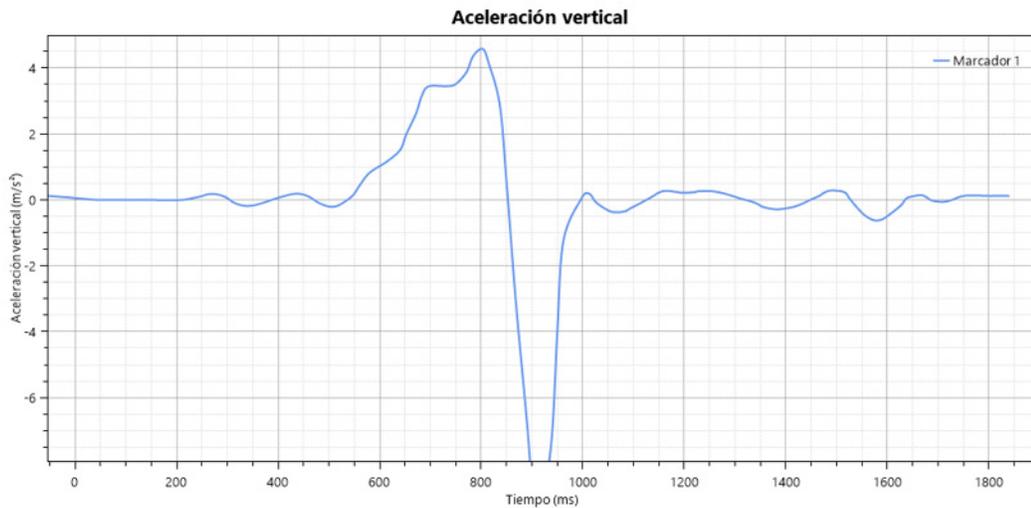
Velocidad Horizontal Perfil Hidráulico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta



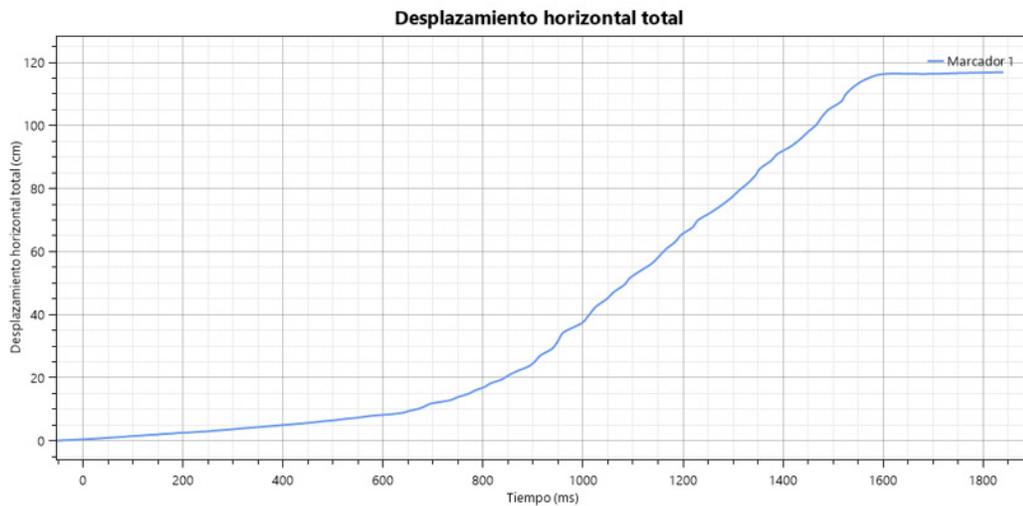
Velocidad Vertical Perfil Hidráulico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta



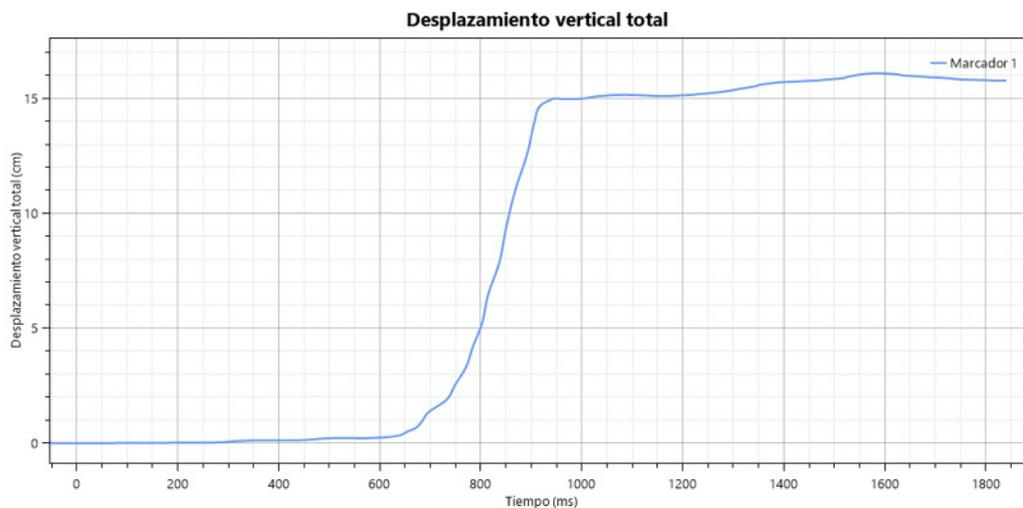
Aceleración Horizontal Perfil Hidráulico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta



Aceleración Vertical Perfil Hidráulico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta



Desplazamiento Horizontal Perfil Hidráulico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta



Desplazamiento Vertical Perfil Hidráulico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta



Captura de pantalla del software Kinovea Movimiento Parabólico Experimento 1 Válvula Totalmente Abierta

Los valores obtenidos mediante el procesamiento con el software Kinovea coinciden con los valores simulados con el software SolidWorks y su complemento FlowSimulation.

4. DISCUSIÓN

Con la aplicación de la metodología propuesta y desarrollada amerita exponer lo siguiente:

- El futuro de la humanidad reside claramente en la manufacturación aditiva, un proceso de fabricación de casi cualquier cosa mucho más preciso, rápido, económico y sostenible que los métodos tradicionales. El mundo de la investigación no es ajeno a ello, siendo casi innumerables las aplicaciones de esta técnica de utilidad para la ciencia. Por ejemplo, las impresoras 3D permiten ya que los laboratorios de países

pobres dispongan de herramientas para realizar sus investigaciones a coste muy inferiores a los habituales en el mercado. La posibilidad de compartir fácilmente los modelos 3D en forma de archivos STL favorece la transferencia de conocimiento entre los distintos grupos de investigación, y ayuda también a visualizar y entender mejor los datos obtenidos en experimentos o exploraciones. En definitiva, las aplicaciones de la manufacturación aditiva en ciencia e ingeniería son innumerables, apareciendo nuevos ejemplos día a día.

- En cuanto a los softwares de modelado 3D utilizados en el sector de la construcción todos sirven para imprimir en 3D y últimamente se ha implementado con fuerza el uso de software BIM el cual posee información del edificio y modelos digitales 3D, del cual están a un solo paso de transformar el modelo digital a un modelo de prototipado 3D.
- La impresión 3D se puede utilizar para una amplia gama de tareas, como el diseño y prueba de prototipos y productos terminados, en un tiempo más corto. En ingeniería los diseños de prototipos se generan continuamente en actividades de clase académica y proyectos de cursos finales por parte de estudiantes y docentes. Sin embargo, los estudiantes muestran limitaciones en la comprensión de los conceptos abstractos representados por dichos diseños.
- Es necesario investigar con otras alternativas para la detección del flujo, y evaluar el rendimiento del kinovea, como asimismo otras resoluciones de la cámara en fotogramas por segundo. Entre los materiales a ser detectados o la metodología alternativa a emplear se pueden citar tintes solubles en agua para marcar las líneas de flujo para una visualización clara de la trayectoria del fluido, pequeñas partículas fluorescentes o reflectantes añadidas al fluido, por ejemplo aquellas partículas que puedan ser iluminadas con luz láser para seguir su movimiento y analizar la velocidad del flujo, también a través de interferometría como una técnica óptica que permite visualizar variaciones en la densidad del fluido, utilizada para estudiar patrones de flujo en líquidos, y por último marcadores visuales en puntos estratégicos del modelo físico para facilitar la calibración y el seguimiento del flujo con Kinovea.
- Uno de los principales retos en el uso de las tecnologías como apoyo a la educación es superar la resistencia al cambio por parte de los profesores de educación convencional, pero no se trata de refutar con las nuevas tecnologías antiguos programas educativos, sino de diseñar y aplicar modelos pedagógicos de innovación que orienten a los alumnos hacia las competencias que necesitarán para adaptarse en un mundo que ya es digital; con esta tecnología, el docente podrá crear nuevas herramientas didácticas de aprendizaje y el estudiante podrá comprender fácilmente muchos temas que quizás son abstractos o difíciles de comprender.
- La modelación hidráulica está permanentemente relacionada con problemas hidráulicos frecuentes en el saneamiento básico y en la ingeniería civil. Debe ser reconocida como una ciencia para el desarrollo de la infraestructura, fundamentalmente frente a problemas complejos para los cuales no puede existir una solución simple, a base de la aplicación de los conceptos básicos de la hidráulica unidireccional. Se requiere entonces de una solución óptima, debidamente aproximada, desarrollada con la ayuda del análisis dimensional y de los principios de similitud ampliamente conocidos, apoyada con pruebas de modelos físicos en el laboratorio.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Barrios Córdova, A., Vaquera Huerta, H., Romero Padilla, J. M., Crossa, J., & Burguete Hernández, E. (02 de Marzo de 2020). Estudio comparativo de técnicas de optimización multirespuesta en diseños experimentales. Obtenido de Ingeniería Investigación y Tecnología: <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v21n2/1405-7743-iit-21-02-e1713.pdf>
- Bautista Hernández, M., Palacios Vélez, O. L., Jiménez Magaña, M. R., & Arteaga Tovar, R. E. (20 de Septiembre de 2021). Causa de falla en la obra de excedencias, presa Endhó: modelación física. Obtenido de Instituto Mexicano de Tecnología, Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422: <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2943/2530>
- Brigido Morales, J. G., Carrillo García, M., Prado Hernández, J. V., & Flores Velázquez, J. (16 de Enero de 2024). Modelación hidráulica de tres aforadores para mínima sedimentación. Obtenido de Revista mexicana de ciencias agrícolas, ISSN: 2007-0934: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342024000100106
- Chartman, J., & Contributors. (2024). Website Kinovea Oficial. Obtenido de Kinovea Version 2023.1.2: <https://www.kinovea.org/>
- Cruz, F. (Noviembre de 2022). Modelación hidráulica: ¿Qué es y cuáles son sus beneficios? Obtenido de Kral Consultores: <https://www.kralconsultores.cl/insights/modelacion-hidraulica-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios/>
- Flores, J. E., Servín, D., & Mendoza, M. (Junio de 2019). Modelos físicos en la ingeniería hidráulica. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte: <https://www.imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=485&IdBoletin=178>
- JBA Trust. (2022). Borrowing our interactive models. Obtenido de Information and Terms & Conditions 2023: <https://www.jba-trust.org/wp-content/uploads/2023/08/Borrowing-our-Physical-Models-TCs-2023.pdf>
- JBA Trust. (2022). Home Page JBA Trust. Obtenido de <https://www.jbatrust.org/>
- JBA Trust. (2022). Research JBA Trust. Obtenido de <https://www.jbatrust.org/research/>
- López Fernández, A. R., Ruiz Díaz Cardoso, A. M., de Dios, M., & Liscia, S. (15 de Diciembre de 2018). Interacción entre modelación física y numérica para el diseño de obras hidráulicas y validación de simulaciones CFD. Obtenido de Revista Sociedad Científica Paraguay: https://www.researchgate.net/publication/332345563_Interaccion_entre_modelacion_fisica_y_numerica_para_el_diseño_de_obras_hidraulicas_y_validacion_de_simulaciones_CFD#:~:text=El%20objetivo%20de%20este%20trabajo%20es%20demostrar%20la
- Mateos, C. (2000). La modelación física en las obras hidráulicas. Ingeniería del Agua - Volumen 7 - Nº 1, 55-70. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/119228/2837-8190-1-PB.pdf?sequence=1>
- Oertel, M., & Shen, X. (2022). 3D Printing Technique for Experimental Modeling of Hydraulic Structures: Exemplary Scaled Weir Models. Water 2022, 14(14), 2153; <https://doi.org/10.3390/w14142153>, 1-12.
- Rocha Felices, A. (Febrero de 2003). CICLO DE CONFERENCIAS. Obtenido de INVESTIGACIÓN EN MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS DE OBRAS HIDRÁULICAS: http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/modelos_hidraulicos_de_rocha.pdf

Stefano, E., Prieto Fernández, A. P., & León Méndez, A. J. (Septiembre de 2021). Recomendaciones básicas para modelar obras hidráulicas empleando la dinámica de los fluidos computacional (CFD). Obtenido de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XLII, No. 4, Oct-Dic 2021, ISSN 2788-6050, RNPS 2066: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v42s1/1680-0338-riha-42-s1-33.pdf>

USDA United States Department of Agriculture. (10 de Julio de 2024). Software WinFLume. Obtenido de Agricultural Research Service: <https://www.ars.usda.gov/research/software/?modeCode=20-20-05-15#:~:text=WinFlume%20is%20a%20software%20package%20for%20the%20hydraulic>