



# REVISTA INGENIO

## Desarrollo del Marco Metodológico para la Calibración y Validación del Modelo Hidrodinámico del Sistema de Alcantarillado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

### Development of the Methodological Framework for the Calibration and Validation of the Hydrodynamic Model of the Sewer System of the Faculty of Engineering and Applied Sciences

Diego Fernando Paredes Méndez [1](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador, Quito (Ecuador)

#### HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 06/08/2023  
Publicación: 31/01/2024

#### PALABRAS CLAVE

Sistemas de drenaje urbano, modelo hidrodinámico, monitoreo hidrometeorológico, validación, PCSWMM, calibración,

#### ARTICLE HISTORY

Received: 01/12/2023  
Accepted: 31/01/2024

#### KEY WORDS

Urban drainage systems, hydrodynamic model, monitoring flows and rainfall, calibration and validation, PCSWMM.

#### RESUMEN

Los sistemas de drenaje urbano (SDU) han existido desde épocas del Imperio babilónico. Su objetivo es preservar y promover la salud pública, bienestar social, protección de inundaciones, contaminación de cuerpos receptores. El crecimiento poblacional en áreas urbanas, cambio climático, envejecimiento de las estructuras provocan el colapso de esta infraestructura sanitaria e inundaciones. En la presente investigación se desarrolló un marco metodológico para evaluar el funcionamiento hidráulico del sistema de alcantarillado de una cuenca piloto. Mediante tres tipos de información: espacial, temporal y topográfica se generaron principalmente lluvias de diseño, lluvias históricas, caudales y patrones de agua residual, topología del SDU del área de estudio, usos, cobertura del suelo, DTM, DSM, ortofoto; consecuentemente, el modelo hidrodinámico 1D de drenaje urbano fue construido. Mediante mediciones hidrometeorológicas registradas en sensores ultrasónicos para medir calados y velocidades del flujo en las tuberías y un pluviómetro, se calibró y validó el modelo de drenaje.

#### ABSTRACT

Urban drainage systems (UDS) have existed since the Babylonian Empire. Its objective is to preserve and promote the public health, welfare, flood protection, water pollution. Population growth in urban areas, climatic change, ageing structures, produce failures in the sewer systems, and urban flooding. Therefore, in this research, a methodologic framework was developed to assess the hydraulic performance of an UDS in a pilot basin. By using three kinds of information, spatial, temporal and terrain, a number of products were generated such as: design rainfall, historic precipitation, dry weather flows and their patterns, topological network, land uses, DTM, DSM, orthophoto, subsequently a hydrodynamic 1D model was built. Calibration and validation of the model was carried out by employing hydrometeorological data that was registered in four sensors to measure depth, velocity of the flow and a gauge station that were implemented in the study area.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de drenaje urbano (SDU) son una de las infraestructuras sanitarias más importantes de la sociedad, cuya función principal es preservar la salud pública, maximizar el bienestar social y reducir la frecuencia de inundaciones. Una variedad de factores afecta el funcionamiento de los SDU. El crecimiento urbanístico modifica constantemente los usos y coberturas de suelo, provocando varios efectos en el ciclo hidrológico, principalmente la reducción de infiltración y tiempos de concentración, incremento de picos, volúmenes y velocidades de escorrentía. [1] De igual forma, la alteración de los patrones de lluvias por el cambio

climático. Otros factores son el envejecimiento propio de la infraestructura de alcantarillado, sedimentos en los conductos y sumideros, los mismos que en conjunto o independientemente contribuyen con el colapso de los sistemas sanitarios. Los resultados son inundaciones urbanas, que constituyen uno de los impactos más peligrosos en la sociedad, y que provocan no solamente grandes afectaciones ambientales y económicas, sino también, y la más sensitiva, la pérdida de vidas humanas. El funcionamiento de los SDU es muy complejo, por la variabilidad espaciotemporal de sus parámetros hidráulicos y físicos, así se tiene el cambio súbito de flujo

de superficie libre a presurizado, subcrítico a supercrítico. Esta variabilidad se debe tanto a las condiciones iniciales y de borde como a las características de la topología del sistema [2]. Para disponer de una gestión óptima de los SDU, con una visión preventiva y proactiva, es esencial invertir en información base e implementar un modelo hidrodinámico que permita analizar, calcular y comprender su funcionamiento hidráulico e hidrológico [3], cuyos resultados servirán de aporte en la toma de decisiones de ampliación, operación, rehabilitación y construcción de obras de mitigación. Estas actividades representan una inversión considerable para los gobiernos locales, mismas que frecuentemente son subestimadas hasta que eventos catastróficos sucedan [4]. Para disminuir el grado de incertidumbre de los resultados arrojados por el modelo, de tal forma que estos sean representativos y confiables, se deben ejecutar una serie de actividades de campo, como catastros técnicos del sistema de alcantarillado, levantamiento, monitoreo hidrometeorológico, que son cruciales para efectuar los procesos de calibración y validación [5]. La presente

investigación se enfoca en la evaluación y diagnóstico hidráulico del funcionamiento del sistema de alcantarillado de una cuenca piloto. Para lo cual un marco metodológico fue desarrollado para calibrar y validar el modelo hidrodinámico, mismo que está compuesto de una serie de etapas que están interrelacionadas entre sí.

### Área de estudio

El propuesto marco metodológico de esta investigación fue ensayado en una cuenca piloto en la Universidad Central del Ecuador. En la Figura 1 se observa el mapa del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) con sus cuatro cuencas de drenaje urbano del cantón Quito. El área de estudio se encuentra en el sector centro norte de la ciudad de Quito, en el límite de las cuencas de Anglo French y el Batán, tiene una superficie de 4,45 hectáreas que abarca el sistema de alcantarillado combinado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas y como aporte las Facultades de Ciencias Químicas y Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, construido hace más de 60 años.

**Figura 1**

*Entornos de OT*



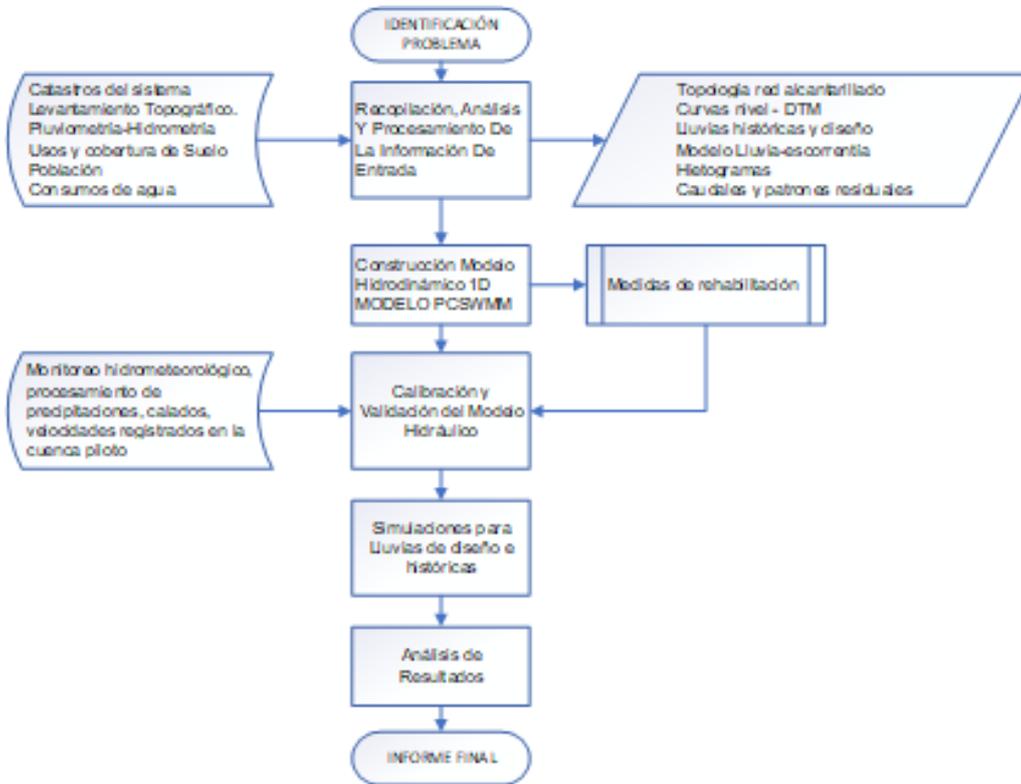
## 2. MÉTODO

Los diferentes pasos efectuados para generar el marco metodológico para la calibración y validación del modelo hidrodinámico del sistema de alcantarillado del área de estudio están resumidos en el siguiente flujograma.

Las principales herramientas computacionales utilizadas en la presente investigación son: sistemas de información geográfica con ArcMap 10.8.2, en donde se almacenó la geodatabase que contiene la topología del sistema de alcantarillado y se procesó los datos del levantamiento

LIDAR para generar los modelos digitales del terreno; software académico PCSWMM para evaluar el funcionamiento hidrológico e hidráulico del sistema de alcantarillado; Autodesk ReCap para generar imágenes 3D de los datos LIDAR; YDOC INSIGHTS, software que recibe en tiempo real la información hidrometeorológica registrada por los sensores de calado, velocidad y pluviometría.

**Figura 2**  
Metodología de estudio



Nota. Principales pasos de la metodología.

**2.1. Recopilación, análisis y procesamiento de la información de entrada**

Existen tres tipos de información básica de entrada en el modelo: temporal, topográfica y espacial.

**Información temporal**

Es la concerniente a las variables hidrológicas e hidráulicas de la zona de estudio, como precipitación, calados y velocidades del flujo, caudales y patrones de variaciones en períodos secos. Para la generación de lluvias de diseño se utilizaron las curvas IDF de estaciones pluviométricas más cercanas a la zona de estudio, La Chorrera-Rumipamba Bodegas (2,7 km),

Iñaquito-Inamhi (3,0 km) y Quito-Observatorio (1,8 km) pertenecientes a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) [6]. (ver Figura 3). Adicional a las lluvias de diseño, se utilizaron lluvias históricas, es decir, eventos registrados que causaron colapsos en el sistema de drenaje de Quito; en este caso se consideró las estaciones Iñaquito-Inamhi y Cruz Loma. Para el proceso de calibración del modelo se instalaron un sensor pluviométrico (P-FING), en la terraza del edificio de la Dirección de Ingeniería Civil, y dos sensores ultrasónico y piezométrico (H-FING) para medir el calado y velocidad del flujo en el pozo a la salida del área de estudio.

**Figura 3**  
Ubicación de estaciones hidrometeorológicas



Nota. Estaciones circundantes EPMAPS y área de estudio.

**Figura 4**

Ubicación de estaciones hidrometeorológicas



Nota. Sensores de medición de velocidades y calados del flujo y pluviómetro.

Para la obtención del caudal doméstico, se multiplicó el coeficiente de retorno de 0,80 por la población universitaria (docentes, estudiantes y personal administrativo) y por la dotación neta, que está en función del consumo real de agua potable registrado en la zona de estudio correspondiente al período académico 2019-2019, cuando se laboró en forma normal antes de la pandemia. Este caudal doméstico corresponde al caudal medio diario de aguas residuales, debido a que por las características de consumo de la universidad no se consideraron caudales comerciales e industriales.

Los patrones de variación horaria fueron derivados en función de la afluencia de los estudiantes del área de estudio, de acuerdo con sus horarios de clases, de esta manera se obtuvieron los factores pico. El caudal máximo horario corresponde al producto de estos factores por el caudal medio diario. El caudal de infiltración se obtuvo de acuerdo con lo especificado en un sistema de nivel de complejidad medio, conforme a las normas de diseño de la EPMAPS. Finalmente, el caudal de diseño fue calculado con la sumatoria del caudal medio diario y el caudal de infiltración, sin considerar caudales de conexiones ilegales.

#### Información tipográfica

Mediante el levantamiento «LIDAR» (Light Detection and Ranging) «Detección por luz y distancia» (ver Figura

5), que es un sistema de teledetección que mide la distancia entre el punto de emisión del láser (dron) y los diferentes puntos del entorno de la superficie terrestre [8], y la materialización de varios puntos de control en el área, con levantamientos de sistemas de posicionamiento global GNSS, se obtuvo detalles de la superficie del terreno, coordenadas y cotas de pozos de revisión, generación de curvas de nivel y el modelo digital del terreno (DTM, Digital Terrain Model), cuya resolución incide notablemente en los resultados del modelo 1D y futuros modelos en 2D [7].

**Figura 5**

Equipos levantamiento LIDAR



Nota. Dron, equipos GNSS

#### Información personal

Parte de esta información está relacionada con las características físicas de los componentes del sistema de alcantarillado para implementar el modelo hidrodinámico 1D, que es fruto de la ejecución de las actividades del

catastro técnico del sistema de alcantarillado. Anexo Fig. 6.

Adicional a esta información, se generaron los usos y cobertura del suelo para determinar parámetros de los modelos de infiltración, características geológicas, clasificación de sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS), conductividad hidráulica y generación de hidrogramas de escorrentía en las subcuencas de aporte, entre los principales. Para lo cual se realizaron ensayos de campo con infiltrómetros, toma de muestras de suelos para ensayar en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la facultad. Anexo Fig. 7.

## 2.2. Construcción modelo hidrodinámicos 1D (PCSWMM)

Como resultado del catastro técnico del sistema de alcantarillado del área de estudio se construyó el modelo de drenaje urbano 1D en el software académico PCSWMM 7.5. Anexo Fig. 8.

La implementación del modelo hidráulico 1D del sistema de alcantarillado de la facultad consiste en ingresar la información y parámetros al modelo hidrodinámico PCSWMM 7.5 como son:

Información topológica: tuberías, pozos o cajas de revisión, descarga y subcuencas con sus propios parámetros.

Estación pluviométrica con las series de tiempo de los diferentes eventos.

Caudales sanitarios y patrones de aguas residuales.

Parámetros de las subcuencas: pozos de salida, área, áreas permeables e impermeables, pendiente, coeficiente de depresión, modelos de infiltración.

Modelo de la curva cn fue utilizado para el cálculo de infiltración.

El modelo consta de 96 subcuencas con un área total de 4,5 hectáreas, 127 pozos, 126 tuberías, 1 descarga.

## 2.3. Calibración y validación del modelo de drenaje urbano

Con el modelo 1D implementado en el software PCSWMM de la red de drenaje, se procedió a calibrar y validar el mismo, con la utilización de las mediciones simultáneas de los sensores hidrometeorológicos instalados en el área de estudio en diciembre de 2022. Durante el período ene- ro-octubre 2023 se registraron eventos pluviométricos significativos, mismos que permitieron seleccionar 4 eventos para el proceso de calibración y 3 para la validación.

La calibración fue efectuada modificando ciertos

parámetros de las subcuencas, como: ancho, pendiente, porcentaje de impermeabilidad, coeficientes de rugosidad «n» de las superficies impermeables, almacenamiento superficial y rugosidad de tuberías, mediante la utilización de la herramienta SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration) de PCSWMM, que permite ajustar los valores simulados a los valores medidos. [9] SRTC utiliza rangos de incertidumbre para variar automáticamente los parámetros de las subcuencas hasta encontrar el mejor ajuste «goodness of fit», considerando ciertos indicadores estadísticos como: la integral del error cuadrático con sus siglas (ISE, Integral Square Error) (Excelente <3 – Malo >25)); la eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE (Excelente >80% – Insuficiente <20%); el coeficiente de determinación R2 (Excelente =1); el error cuadrático medio (RMSE) (Exacto aprox.=0); mínimos cuadrados [10].

## 2.4. Simulaciones para lluvias de diseño e históricas

Con un modelo calibrado y validado, es decir, que refleje resultados cercanos a la realidad, se procede a evaluar el comportamiento de la red bajo varios escenarios con lluvias de diseño generadas con las ecuaciones IDF de las estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio con diferentes períodos de retorno. Adicionalmente se evaluó con lluvias históricas registradas en los años 2017 y 2022, mismas que causaron inundaciones en pasos deprimidos de la y, avenida Atahualpa, sector plataforma financiera norte, aluvión de La Gasca.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Información pluviométrica

Las estaciones pluviométricas Quito-Observatorio; Ñaquito-Inamhi y la Chorrera-Rumipamba bodegas de la EPMAPS, son circundantes al área de estudio. Considerando la extensión reducida del área de estudio aproximadamente 4,5 hectáreas, distancia entre las estaciones pluviométricas con la zona de estudio, y que la estación Quito-Observatorio presenta mayores eventos pluviométricos, no se contempló la variabilidad espacial de la lluvia, y se trabajó con los hietogramas de diseño (2, 10, 25 y 50 años de período de retorno) derivadas de la ecuación IDF de la estación Quito-Observatorio. En la figura 9 se muestra el hietograma para el período de retorno de 25 años. Anexo Fig. 9.

Adicional a los hietogramas de diseño, se empleó en la evaluación hidráulica del sistema de drenaje dos eventos históricos (Anexo Fig. 10) registrados en las estaciones pluviométricas Ñaquito-Inamhi el 24 de abril de 2017, y

en Cruz Loma el 31 de enero de 2022. El primer evento se produjo durante 95 minutos, desde las 13h50 a las 15h25, con una precipitación acumulada de 44,9 mm. Mientras que, en el segundo evento, la precipitación ocurrió de forma continua durante 24 horas, con un total de 75,1 mm. Como productos (Anexo Fig. 11) del levantamiento LIDAR se obtuvo principalmente archivos de tipo LAS, que sirvieron para obtener curvas de nivel cada metro, DTM (modelo digital del terreno), DSM (modelo digital de superficie), ortofoto, en el sistema de coordenadas wgs84 17s, y las locales del Distrito Metropolitano de Quito (sires).

### 3.2 Información espacial

Las actividades de los catastros técnicos permitieron identificar varios puntos críticos en la red (Anexo Fig. 12), con problemas de funcionamiento debido a la falta de mantenimiento como son: taponamientos en pozos, cajas de revisión y conductos con gran cantidad de sedimentos, basura y material orgánico, tuberías rotas, tramos de considerable longitud sin tuberías. Estos problemas impedían la circulación de los flujos en la red, provocando inundaciones, mal funcionamiento de los

baños de oficinas y estudiantes, desborde de las aguas residuales a los espacios verdes de la facultad, generando un ambiente desagradable al personal y estudiantes. Como obras de mitigación se efectuaron una serie de actividades de limpieza de pozos, tuberías, renovación y reemplazo de tramos de tuberías y pozos, lo que ha permitido mejorar el nivel de servicio de la red de drenaje de la facultad.

El modelo 1D construido en PCSWMM, consta de una red de tuberías con una longitud total de 1,7 km, con materiales de PVC (30%) y hormigón simple (70%), y con secciones circulares que varían en un rango de 0,1 a 0,3 m. En la Figura 13, se aprecia la red de alcantarillado y los diferentes usos de suelo del área de estudio, que tiene un 67% de áreas impermeables (techos, aceras, calzadas de asfalto y adoquín) y el 33% de zonas permeables (áreas verdes de jardines con césped y árboles. Anexo Fig. 13).

Mediante los resultados de los ensayos de granulometría en varios puntos de la zona de estudio (D10, D30, D60, Cc, Cu, porcentajes de grava, arenas y finos), tipos de suelo hidrológico y cobertura de suelo, y con la utilización de intersección de polígonos de las subcuencas en ArcMap se obtuvieron los números de curva (cn) para cada área de aporte.

**Tabla 1**

*Números de curva (cn) para cada área de aporte*

Tipo de suelo	Cobertura	Número de curva CN
A	Espacios abiertos con cobertura de césped > 75%	39
-	Pavimentados asfálticos	98
-	Techos y aceras de hormigón	98
-	Adoquinados	70

*Nota. Valores de cn en las subcuencas*

### 3.3 Calibración y validación del modelo

El procedimiento de la calibración y validación se resume en la siguiente Figura 14. Anexo Fig. 14.

Como se mencionó en el numeral 3.3, el propósito de la calibración es disminuir la diferencia entre valores simulados y medidos, ajustando los parámetros de subcuencas y tuberías hasta que esa diferencia esté dentro de rangos óptimos de los indicadores estadísticos, utilizando la información registrada cada minuto en los sensores hidrometeorológicos. Esta información fue observada durante el período enero-octubre de 2023; a continuación, se presenta la información instantánea de enero a abril, cuando acontecieron eventos pluviométricos significativos. Anexo Fig. 15.

Luego del análisis hidrológico detallado y en función de la importancia de la magnitud de las variables de precipitación, nivel y velocidad se han elegido los siguientes eventos para calibrar y validar el modelo, en la Figura 16 (Anexo Fig. 16) se muestran un evento por cada proceso.

Los hietogramas de los eventos seleccionados (ver Tabla 2) fueron ingresados en el modelo construido para generar los valores simulados de calados y velocidades en el punto de medición. De igual forma se subieron los valores observados de calados y velocidades, y así se dispone en el modelo de los valores simulados y medidos, como se observa en la figura 17 (Anexo Fig. 17) del evento del 01 de enero de 2023.

**Tabla 2**

*Eventos hidrometeorológicos seleccionados*

<b>Eventos Procesos de Calibración</b>	<b>Eventos Procesos de Validación</b>
01 enero 2023 17H30-18H00	09 abril 2023 14H38-15H20
05 enero 2023 18H30-19H00	12 abril 2023 13H55-14H20
06 enero 2023 14H00-14H30	25 abril 2023 14H00-14H40
08 febrero 2023 18H00-18H40	

*Nota. Eventos para calibración y validación*

A pesar de que el modelo no está calibrado, se puede observar que existe una correlación aceptable en picos y volúmenes de los gráficos de calados y velocidades, y se corrobora en los indicadores estadísticos cuyos valores no están muy distantes de los recomendados. Este comportamiento se repite en los otros eventos, lo que nos revela que la información de entrada tiene un nivel de calidad y precisión acertados.

Los parámetros por modificarse en el proceso de calibración se muestran en la tabla (ver Tabla 3), al igual que los porcentajes de incertidumbre (porcentaje que se utiliza para encontrar el máximo y mínimo valor del rango que se modifica el valor del parámetro) asignados en la herramienta SRTC de PCSWMM. Tradicionalmente, el proceso de calibración consiste en variar manualmente cada parámetro y simular tantas veces hasta obtener coherencia entre los resultados simulados con los observados; sin embargo, la bondad de esta calibración depende del criterio y experiencia del modelador y diseñador, es decir, se convierte en un proceso bastante complejo, incierto y demandante de tiempo.

Luego de ejecutar la calibración, los valores de los

indicadores en los cuatro eventos (01, 05, 06 de enero y 08 de febrero de 2023) se enmarcan en los rangos recomendados, como se puede apreciar en la figura 18 (Anexo Fig. 18); de igual forma, las gráficas de calados y velocidades tienen un comportamiento temporal muy similar entre los valores simulados y medidos. Por lo que se concluye que el modelo está calibrado. Los parámetros que indicaron mayor sensibilidad fueron el ancho (width), rugosidades de áreas impermeables y permeables de subcuencas y tuberías.

Tres eventos distintos a los cuatro utilizados en la calibración fueron utilizados para la validación del modelo. La diferencia entre los dos procesos radica en que los parámetros del modelo obtenidos en la calibración no son modificados en la etapa de validación. En la figura 19 (Anexo Fig. 19) se indican los resultados de validación.

Los resultados arrojados revelan que los indicadores estadísticos poseen valores que se enmarcan en una valoración entre excelente y muy buena tanto en calado como en velocidad. Con base en los productos obtenidos se concluye que se dispone de un modelo hidráulico calibrado y validado del sistema de alcantarillado de la zona de estudio.

**Tabla 3**

*Parámetros por modificar*

<b>Elemento</b>	<b>Parámetro Seleccionado</b>	<b>Porcentaje de Incertidumbre</b>
<b>Conducto</b>	Roughness	40
	Width	100
	Slope	100
	N Imperv	50
<b>Subcuenca</b>	N Perv	25
	Dstore Imperv	100
	Subcatchment Zero Imperv	30

*Nota. Proceso calibración.*

### 3.4 Análisis modelo hidrodinámico 1D

Una vez que se dispone del modelo calibrado y validado, se analiza el comportamiento de la red bajo 2 escenarios:

Lluvia de diseño

Lluvias históricas, años 2017 y 2022

#### 3.4.1 Simulaciones hidráulicas lluvias de diseño

En el numeral 4.1 se enunció que se evaluaría con la lluvia de diseño de la estación pluviométrica Quito-Observatorio de 2, 10, 25 y 50 años de períodos de retorno. La figura 20 (Anexo Fig. 20) presenta en la izquierda la vista en planta y perfil del tramo principal de la red, donde se aprecia los tramos con insuficiencia de

capacidad hidráulica y los 3 pozos con mayor inundación. Mientras que en el gráfico de la derecha se observa la vista en planta de la zona de estudio, con los tramos con sobrecarga (tuberías azul oscuro), que representa el 57% del total de

conductos. Estos resultados corresponden al período de retorno de 2 años.

En la Tabla 4 se despliega el resumen de los resultados de las simulaciones hidráulicas para los 4 períodos de retorno de lluvias de diseño. De los puntos con inundación en todos los escenarios, tres pozos tienen el mayor volumen y tiempo de inundación, su ubicación se observa en la planta de la Figura 20. De igual manera, se puede denotar que más del 50% de la red de conductos están trabajando a presión, es decir, con falta de capacidad hidráulica.

**Tabla 4.**

*Resumen resultados de simulación hidráulica lluvias diseño*

ITEM	TR	TR	TR	TR
	2años	10años	25años	50años
Volumen total inundación (m <sup>3</sup> )	284	628	823	981
Número de pozos inundados	15	15	19	21
Volumen pozo más crítico (m <sup>3</sup> )	113	235	303	357
Número de tuberías con insuficiencia capacidad hidráulica	71	93	97	97
Volumen descarga (m <sup>3</sup> )	539	634	670	693

*Nota. Variables hidráulicas de resultados*

#### 3.4.2 Simulaciones hidráulicas, lluvias históricas

Como se señaló en el numeral 4.1 del análisis pluviométrico, se seleccionaron 2 eventos registrados el 24 de abril de 2017 y el 31 de enero de 2022 en las estaciones Iñaquito-Inamhi y Cruz Loma,

respectivamente. En la tabla (ver Tabla 5) se despliegan los resultados. La simulación del evento registrado el 24 de abril de 2017, posee una similitud muy estrecha con los resultados generados con la lluvia de diseño correspondiente a un período de retorno de 25 años.

**Tabla 5.**

*Resumen resultados de simulación hidráulica lluvias históricas*

ITEM	24-abr-17	31-ene-22
<b>Volumen total inundación (m<sup>3</sup>)</b>	825	1
<b>Número de pozos inundados</b>	13	1
<b>Volumen pozo más crítico (m<sup>3</sup>)</b>	315	1
<b>Número de tuberías con insuficiencia capacidad hidráulica</b>	81	3
<b>Volumen descarga (m<sup>3</sup>)</b>	699	2884

*Nota. Variables hidráulicas de resultados. Elaboración propia*

A pesar de que el evento ocurrido durante todo el 31 de enero de 2022 (total 75 mm), produjo un colosal aluvión

en la zona de la av. La Gasca, debido a la gran cantidad de material que descendió de la quebrada El Tejado, la

simulación hidráulica, no refleja ningún inconveniente en la zona de estudio. No se presentan pozos de inundación ni insuficiencia de capacidad hidráulica, lo que demuestra que, para una cuenca pequeña, como la cuenca experimental, las intensidades de lluvia de corta duración y gran magnitud son las que inducen a fallas en el sistema de drenaje, mientras que, en cuencas grandes, las intensidades de mayor duración y menor intensidad son más críticas [11].

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se denotó en la presente investigación, el éxito para una gestión óptima de los sistemas de drenaje urbano (SDU) radica en un cambio de prácticas y políticas tradicionales enfocadas en actividades reactivas frente a eventos catastróficos a una gestión proactiva y preventiva, mediante el levantamiento y procesamiento de información base e implementación de modelos hidrodinámicos. Considerando lo expuesto, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar un marco metodológico con un enfoque innovador, para diagnosticar el funcionamiento de los SDU mediante la construcción de un modelo de drenaje urbano, y su calibración y validación, de tal manera que la academia contribuya con los gobiernos municipales en la toma de decisiones para la implementación de óptimas y rentables medidas de rehabilitación, y de esta manera mejorar el nivel de servicio de esta importante infraestructura sanitaria. las principales conclusiones son:

Los tres tipos principales de información de entrada son temporal, espacial y topográfica.

Concerniente a la información temporal, se generaron lluvias de diseño provenientes de los hietogramas para diferentes períodos de retorno de la estación Quito-Observatorio. Adicionalmente, se utilizaron lluvias históricas registradas en los años 2017 y 2022, en las estaciones Ñaquito-Inamhi y Cruz Loma. Estos eventos provocaron inundaciones de gran magnitud en pasos deprimidos de la y, av. Atahualpa, plataforma gubernamental y el aluvión de La Gasca.

Referente a la información topográfica, se realizó un levantamiento LIDAR de esta zona con la finalidad de generar curvas de nivel cada metro, la ortofoto, DTM, DSM, por ende, las coordenadas tridimensionales y cotas de los pozos de la red de alcantarillado y cobertura de suelos.

El tercer tipo de información base es la espacial, específicamente el levantamiento del catastro técnico de la topología del sistema de alcantarillado. Con estos datos se construyó el modelo de drenaje en el software

PCSWMM. La red está compuesta de 96 subcuencas, 127 pozos, 126 tuberías y 1 descarga. La longitud de la red es de 1,7 km. Es menester señalar que otro beneficio de los catastros fue la identificación de anomalías de mantenimiento y daños estructurales de algunos componentes de la red, y efectuar obras de rehabilitación y reconstrucción efectivas. De igual forma se trazaron las subcuencas de aporte con sus correspondientes porcentajes de áreas impermeables y permeables y los parámetros correspondientes para el análisis de infiltración mediante el modelo de SCS número de curva.

las mediciones instantáneas cada minuto en los 4 sensores hidrometeorológicos instalados en la zona de estudio permitió disponer de información durante 10 meses de observación (enero-octubre de 2023), y luego del procesamiento y análisis respectivo se seleccionaron cuatro eventos para la calibración y tres en la validación del modelo de drenaje.

El modelo fue calibrado obteniendo coherencia de variabilidad temporal en los gráficos de calados y velocidades, y los valores de los indicadores estadísticos LSE, NSE, R2, LSE, RMSE se encuentran dentro de los rangos teóricos recomendados.

En el proceso de validación no se modificaron los parámetros del modelo obtenido en la calibración y los resultados de los indicadores estadísticos permiten concluir que el modelo está calibrado y validado.

Este modelo de drenaje urbano, que refleja el comportamiento real del sistema, se convierte en una herramienta de soporte en la toma de decisiones. Por lo cual fue utilizado para analizar su funcionamiento bajo escenarios de lluvias de diseño e históricas, y se concluye que este sistema es hidráulicamente insuficiente incluso para el período de retorno más bajo, añadiendo a esto sus deficiencias estructurales.

Se recomienda expandir esta investigación con la implementación de un nuevo paradigma de mitigación de inundaciones, que es la metodología de sistemas de drenaje sostenibles (SuDs) o sistemas basados en la naturaleza (NBS), medidas que consideran no solo aspectos de cantidad de agua, sino también calidad y biodiversidad. Se recalca que estas medidas se deben aplicar cuando se disponga de un modelo calibrado y validado [12].

Como recomendación general a las instituciones gubernamentales, municipales públicas o privadas, encargadas de la gestión de los sistemas de drenaje urbano, se debería considerar el marco metodológico planteado por la academia, el mismo que dará sustento a la toma de decisiones para el mantenimiento, rehabilitación,

rediseño, planificación de inversiones de estas importantes obras de infraestructura sanitaria, que muchas veces son ignoradas hasta que grandes impactos suceden con consecuencias funestas ambientales, económicas, de salud y hasta pérdidas humanas.

## REFERENCIAS

- [1] Butler D., *Urban drainage*, third edition, London: Spon Press; 2009, pp. 3-4.
- [2] Novak P. et al., *Hydraulic modelling an introduction*, OXON, USA: Spon Press, 2010, pp. 392-394.
- [3] Waslki T. et al., *Wastewater collection. System modeling and design*. Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2007, pp. 144-148.
- [4] Paredes D., «Hydraulic analysis of urban drainage systems with conventional solutions and sustainable technologies», *Journal of Water Management Modeling*, 2018, CHI JWMM 2018:C440.
- [5] Kleidorfer M., *Uncertain calibration of urban drainage models*, Innsbruck Austria, 2009, pp. 40-46.
- [6] eMAAP-q., *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado para la EMAAP-Q*, Quito: V&M Gráficas, 2009, p. 73.
- [7] Seyoum S., *Framework for dynamic modelling of urban floods at different topographical resolutions*. Delft, The Netherlands: Unesco-IHE, 2013, p. 32-36.
- [8] Price R., Vojinovic Z., *Urban hydroinformatics*, London: IWA Publishing, 2011, pp. 68-78.
- [9] Finney K., Gharabaghi, «Using the PCSWMM 2010 SRTC tool to design a compost biofilter for highway stormwater runoff treatment», *Journal of Water Management Modeling*, 2011, JWMM R241-09.
- [10] Gujarati, D. N., *Basic econometrics*, fourth edition, Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2003, pp. 202-250.
- [11] Vojinovic Z., Abbott M., *Flood risk and social justice*. London: IWA Publishing; 2012, pp. 275.
- [12] Pascual F., Torres M. Temprano J., Sánchez J., «Sustainable urban drainage system (sUds) modeling supporting decision-making: a systematic quantitative review», *ELSE- vier. Science of the Total Environment*, 806(2022)150447.

## Anexos

**Figura 6**

*Catastro técnico, sistema de alcantarillado*



*Nota. Actividades de campo.*

**Figura 7**

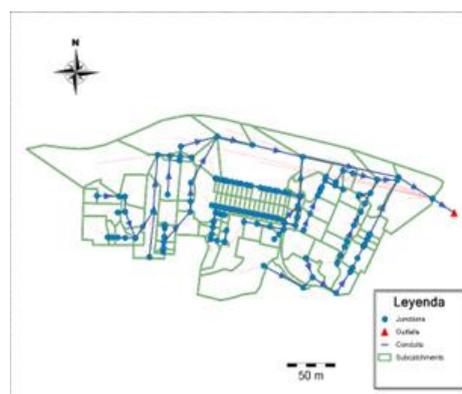
*Ensayos de suelos en el área de estudio*



*Nota. Actividades de campo.*

**Figura 8.**

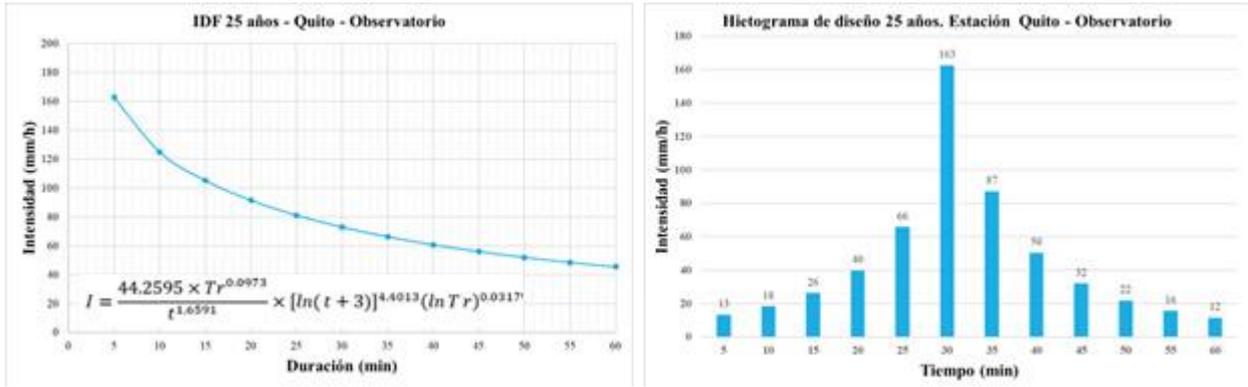
*Red de drenaje del área de estudio*



*Nota. Modelo de drenaje urbano PCSWMM.*

**Figura 9.**

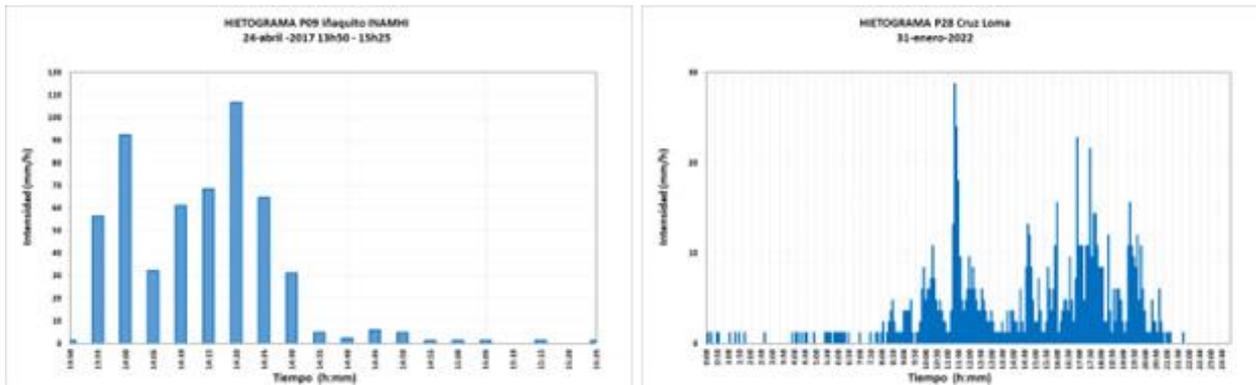
Hietograma, período de retorno de 25 años



Nota. Estación pluviométrica Quito-Observatorio.

**Figura 10.**

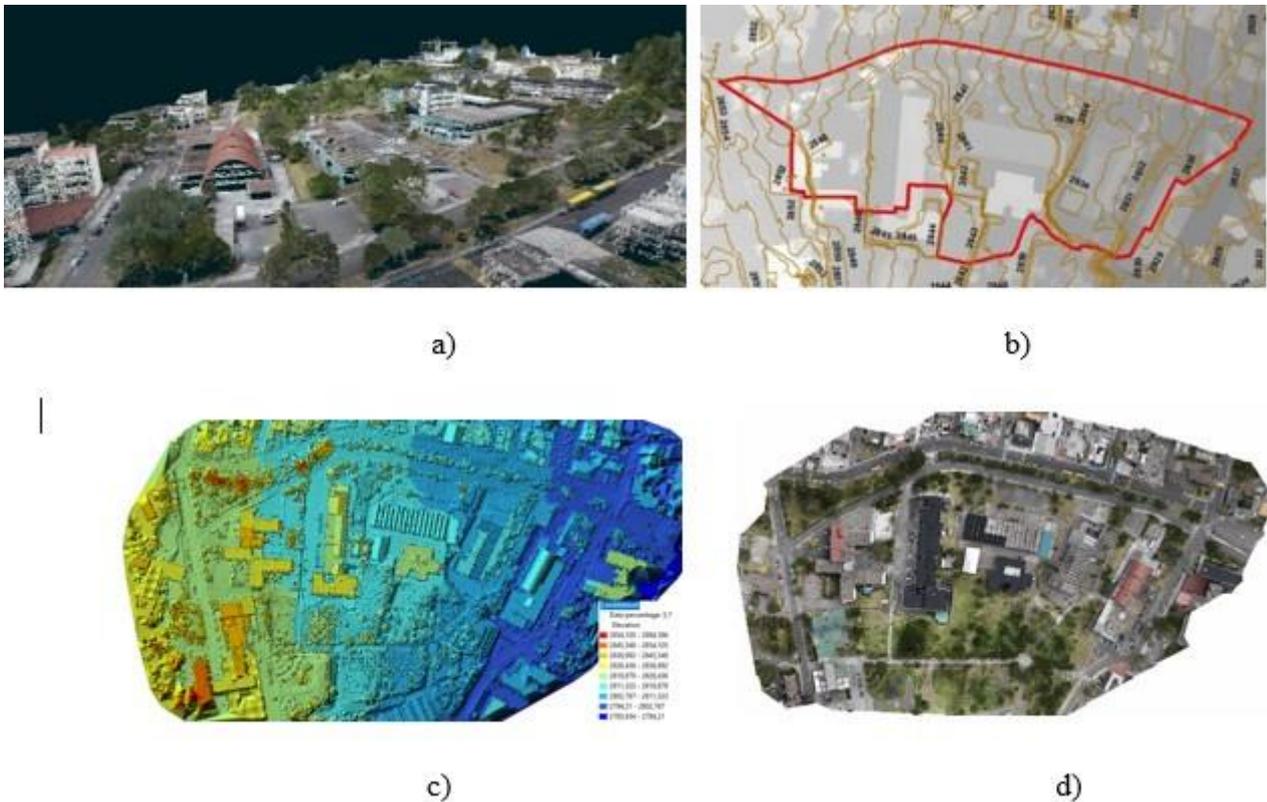
Lluvias históricas



Nota. Datos proporcionados EPMAFS. Elaboración propia.

**Figura 11.**

Resultados LIDAR



Nota. a) Vista 3D; b) DTM y curvas de nivel; c) Procesamiento LAS; d) Ortofoto.

**Figura 12.**

*Puntos críticos de funcionamiento de la red*



*Nota. Obras de rehabilitación.*

**Figura 13**

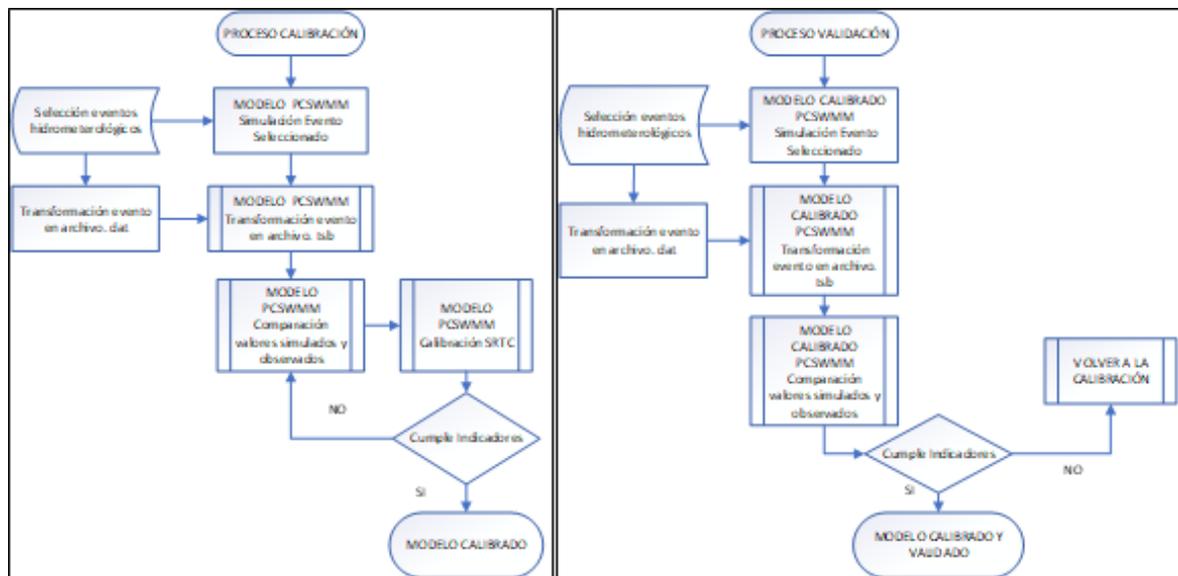
*Red de drenaje y ortophoto*



*Nota. Modelo hidráulico de drenaje.*

**Figura 14**

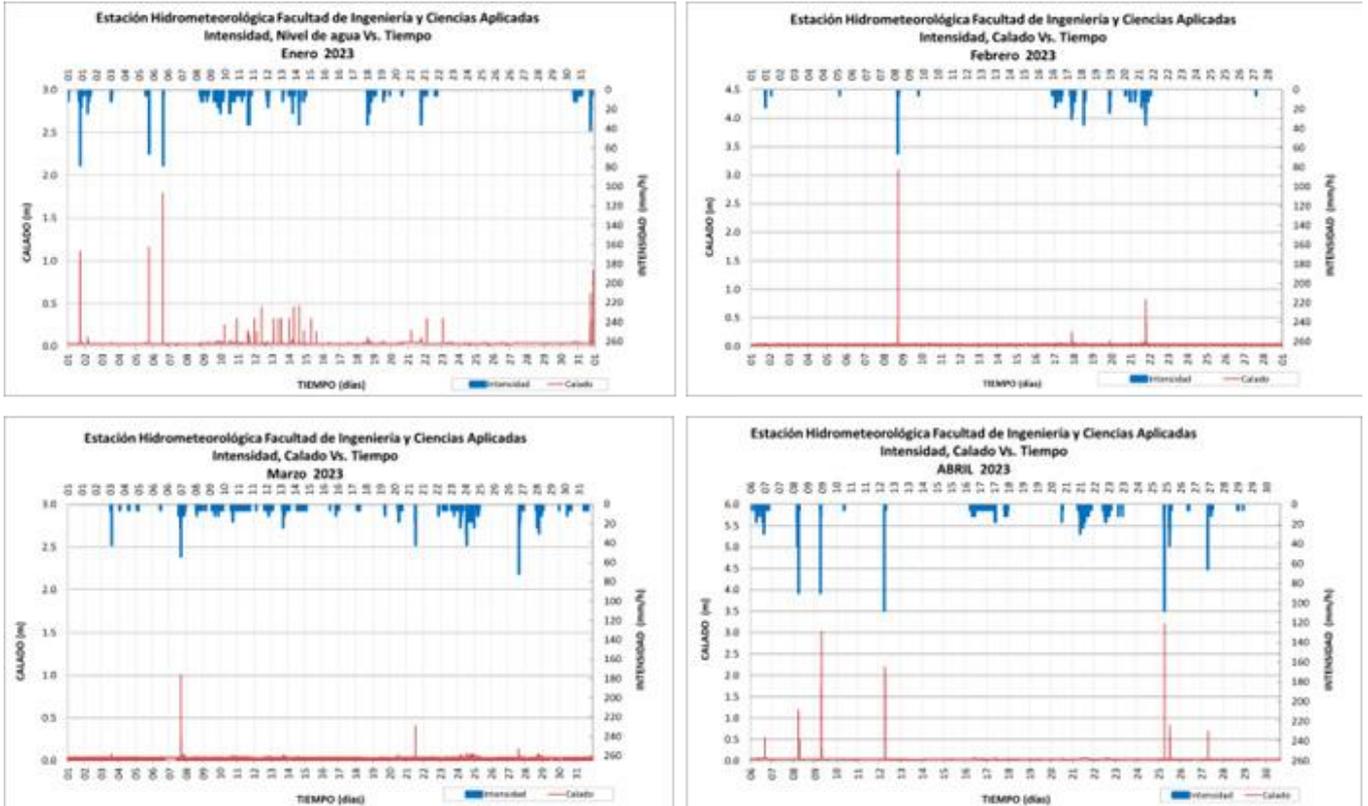
*Procesos calibración y validación*



*Nota. Flujogramas de los procesos.*

Figura 15.

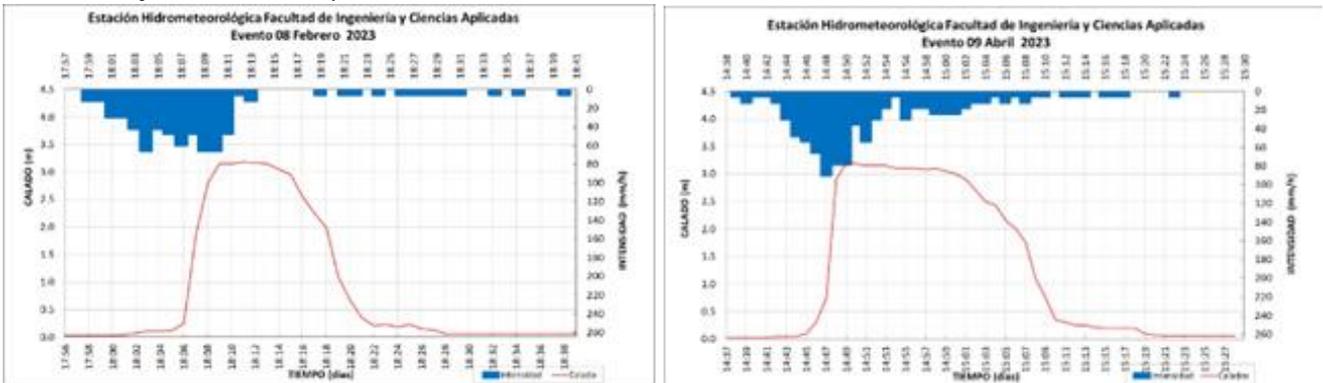
Información hidrometeorológica instantánea registrada, período enero-abril 2023



Nota. Datos registrados en la estación de la zona de estudio.

Figura 16

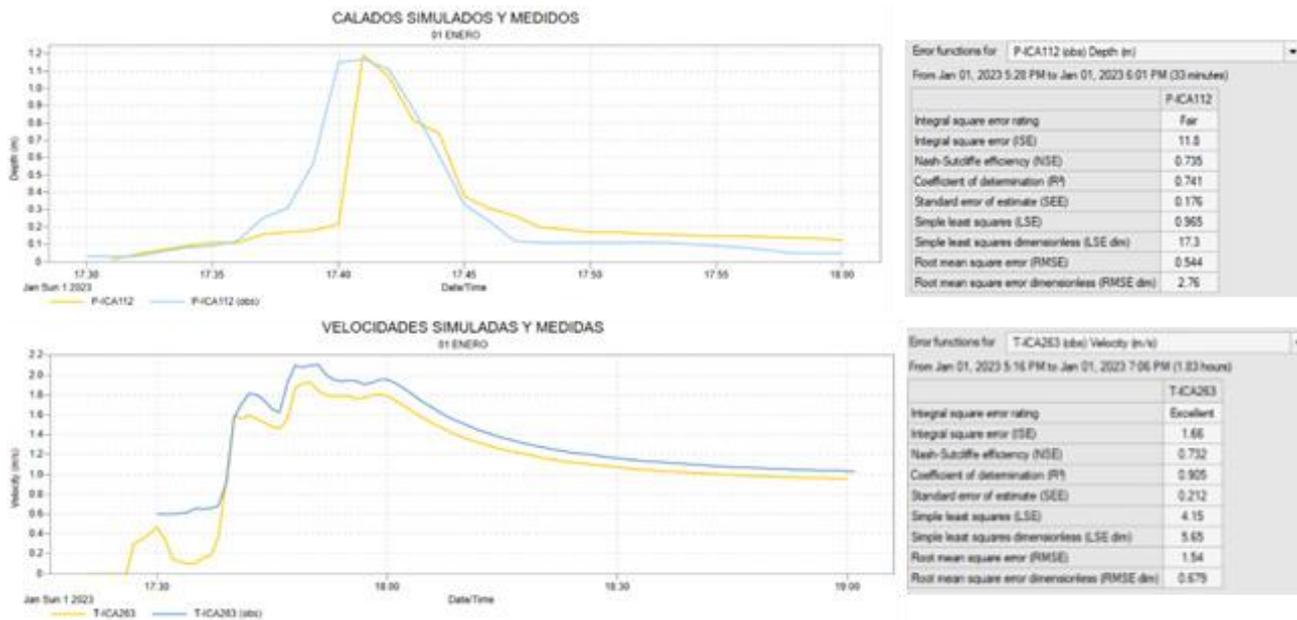
Eventos utilizados procesos calibración y validación



Nota. Un evento por cada proceso.

**Figura 17**

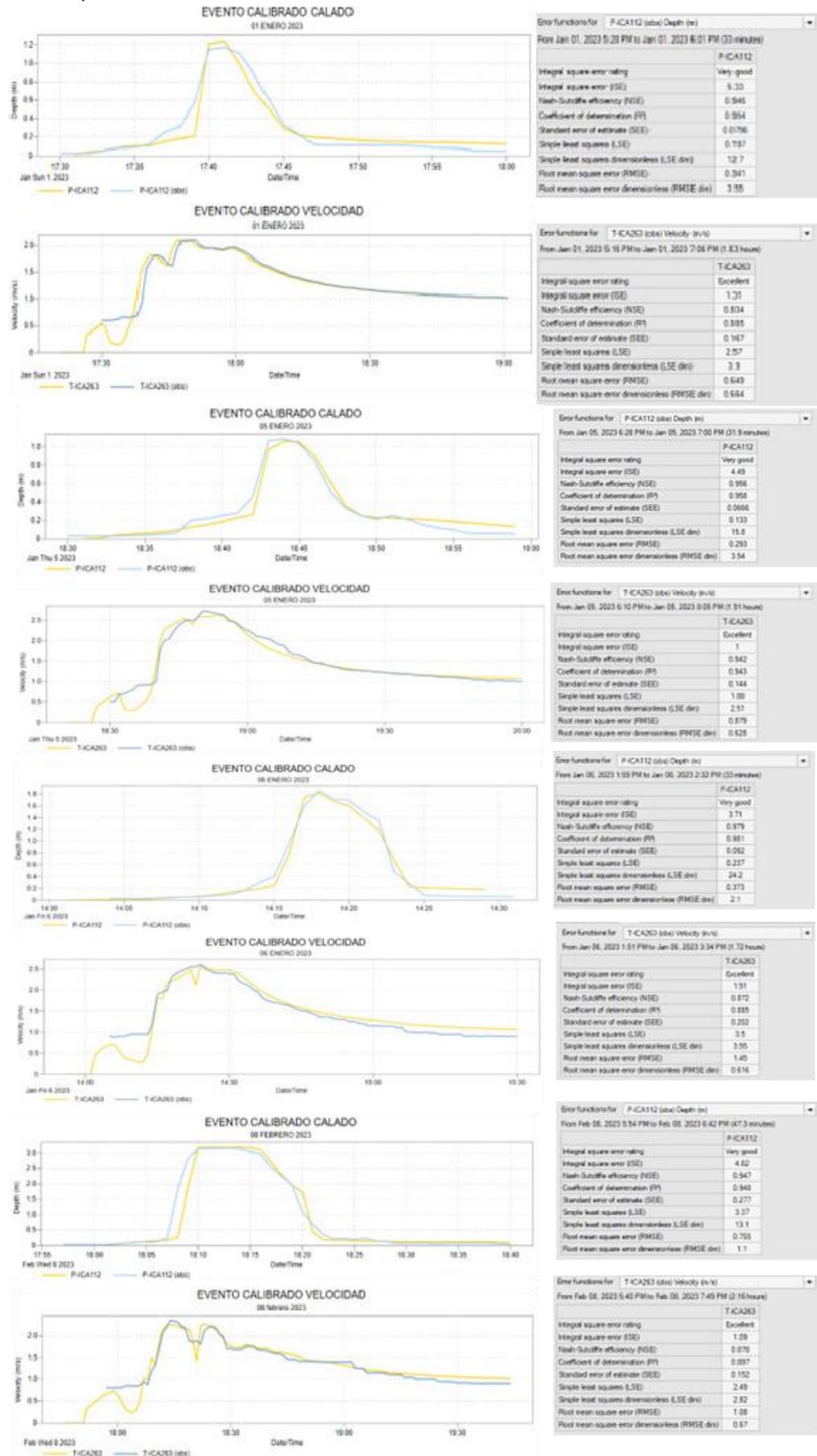
Calados, velocidades, simulados y medidos 01 enero 2023



Nota. Resultados modelo de drenaje e indicadores estadísticos.

Figura 18.

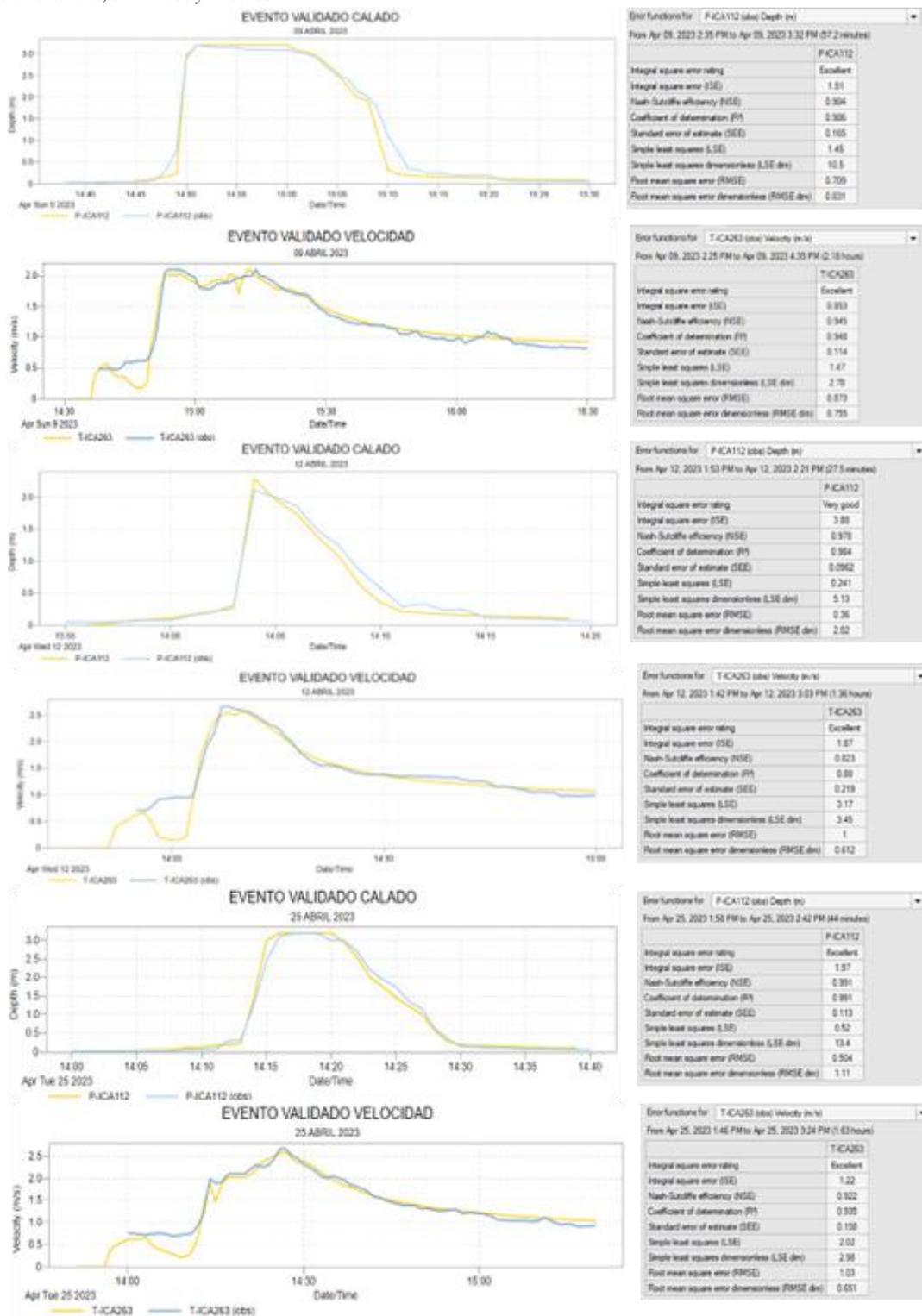
Gráficos calados-velocidades, simulados y medidos



Nota. Proceso de calibración.

Figura 19.

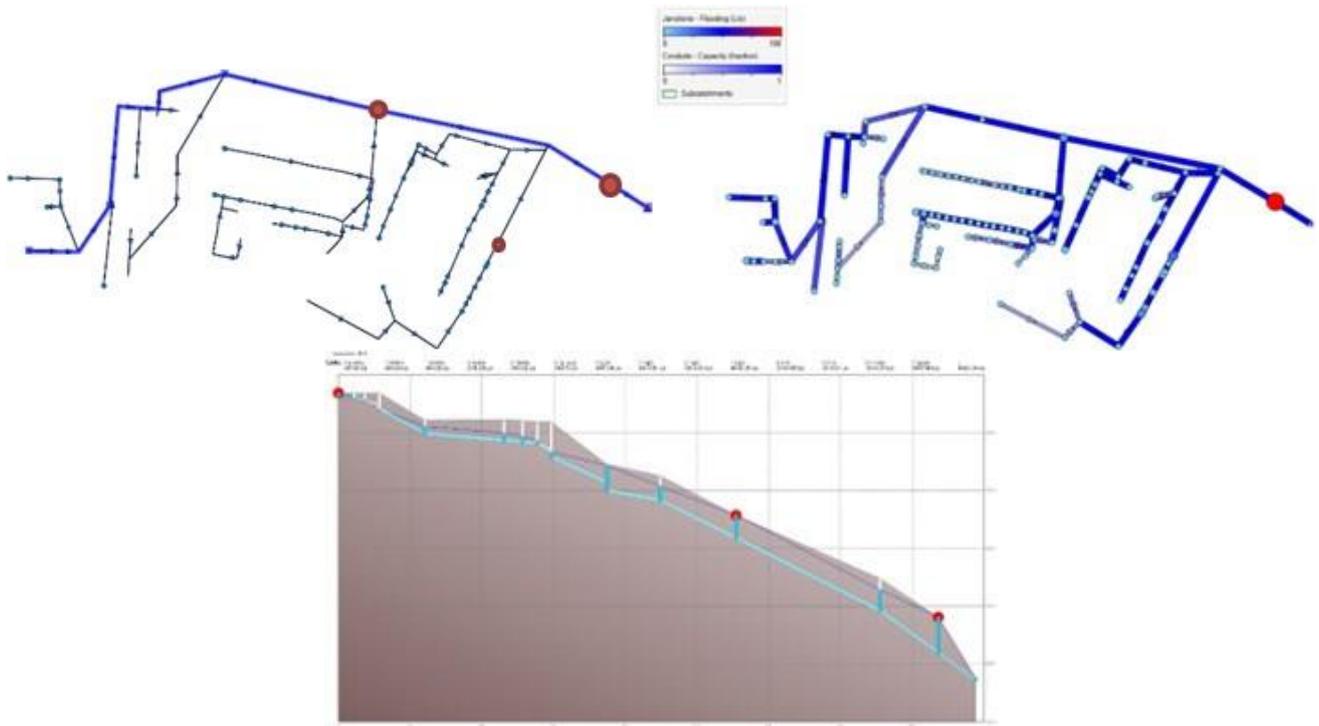
Gráficos calados-velocidades, simulados y medidos



Nota. Proceso de validación.

**Figura 20.**

*Resultados simulación Tr = 2 años*



*Nota. Planta y perfil de resultados hidráulicos*