



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
ARQUITECTURA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
TÍTULO**

**RESPUESTA HIDROLÓGICA – HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE
DRENAJE PLUVIAL DE LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE
MANABÍ, ULEAM MANTA.**


AUTORES:

**CHÁVEZ ROJAS NOE FREDDY.
ANCHUNDIA TAPIA LUÍS JOSÉ.**

TUTOR:

**ING. ERIC CABRERA ESTUPIÑÁN, PhD.
MANTA - MANABÍ - ECUADOR.**

2025

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular, bajo la autoría del estudiante CHÁVEZ ROJAS NOE FREDDY, legalmente matriculado/a en la carrera de INGENIERÍA CIVIL, período académico 2025-2, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es “RESPUESTA HIDROLÓGICA – HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ, ULEAM MANTA”.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 30 de enero de 2026.


Lo certifico,



Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD.

Docente Tutor(a)

Área: Hidráulica

 Uleam UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular, bajo la autoría del estudiante ANCHUNDIA TAPIA LUIS JOSÉ, legalmente matriculado/a en la carrera de INGENIERÍA CIVIL, período académico 2025-2, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es “RESPUESTA HIDROLÓGICA – HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ, ULEAM MANTA”.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 30 de enero de 2026.

Lo certifico,



Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD.

Docente Tutor(a)

Área: Hidráulica

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.

Yo, Anchundia Tapia Luís José con CC: 230061205-4, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema **"RESPUESTA HIDROLÓGICA – HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ, ULEAM MANTA"**, el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 12 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



Anchundia Tapia Luís José

C.C. 230061205-4

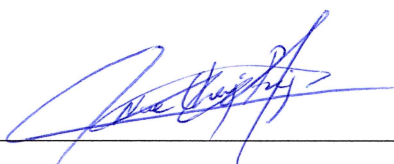
Autor

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.

Yo, Chávez Rojas Noe Freddy con CC: 131306980-7, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema **"RESPUESTA HIDROLÓGICA – HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ, ULEAM MANTA"**, el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 12 días del mes de enero de dos mil veinte y seis.



Chávez Rojas Noe Freddy

C.C. 131306980-7

Autor

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico:

Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de **Proyecto de Investigación**, cuyo tema es “**RESPUESTA HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ, ULEAM MANTA**” de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo **APRUEBO**, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario.

En la ciudad de *Manta*, a los 25 días del mes de febrero de dos mil veinte y seis.



Ing. Ramón Pérez Leira, PhD.

C.C. 0959759069

Tribunal 1



Ing. Horacio Muñoz Cedeño, Mg

C.C. 1310999667

Tribunal 2

5 DEDICATORIA.

A mi familia que es el equipo que ha estado conmigo en todo momento, su amor, paciencia y esfuerzo, han sido el pilar fundamental para lograr esta meta que parecía un sueño muy lejano. En los momentos más adversos de este proceso, fueron sus palabras como un cobijo y un motor, que me permitieron seguir adelante, para no rendirme; por ello, les atribuyo este logro.

A mis docentes, compañeros, y cada persona que forma parte de esta prestigiosa Alma Mater, quienes marcaron una huella importante en mi persona y cambiaron mi forma de pensar, ampliando mi conocimiento para ser un profesional con compromiso social.

A mis amigos, Misael Castro, Meyer Santana y Marlisse Delgado, por hacer que este viaje fuera mucho mejor. Gracias por las noches de estudio, por la ayuda antes de un examen y por cada momento que compartimos.

Y a mí. Por las horas de esfuerzo, por la determinación de seguir a pesar del cansancio y por nunca perder de vista el objetivo. Este logro es la prueba de que el trabajo duro y la dedicación siempre valen la pena.

Chávez Rojas Noe Freddy

A Dios, por ser el cimiento de mi vida, por darme la salud y la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo y por guiarme con su luz en los momentos de incertidumbre. Este logro es, ante todo, una muestra de su infinita bondad.

A mi madre, Alejandra Tapia, que no solo me insto a ser una mejor persona día con día, sino que, con su esfuerzo, y dedicación constante, me mostro que los sueños son una meta que no se abandona. Gracias por hacer de mi un ser humano resiliente, y que no se rinde aun es el momento más adverso.

A mis hermanos y mi novia Jeniffer Pinargote, por ese apoyo infalible que siempre estuvo ahí al final de cada día difícil, dándome aliento en los momentos vulnerables; gracias por hacer de este camino académico un logro más significativo.

Finalmente, me dedico este logro a mí mismo. Por la perseverancia en las noches de desvelo, por la disciplina en los momentos de cansancio y por la valentía de no rendirme hasta ver cumplida esta meta.

Anchundia Tapia Luís José

6 AGRADECIMIENTO.

Agradezco a todos los que formaron parte de este proceso desde el inicio y a quienes fui conociendo en el trayecto, su confianza en mí, fue un impulso que me motivo a estudiar lo que me gusta, sus consejos son el camino que me llevo a trazar esta meta.

A mis compañeros y amigos, los cuales han sido una pieza clave en cada logro dentro de las aulas de esta institución.

Un agradecimiento inmenso al Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD. Gracias por su paciencia, por su guía, por su apoyo y por todas las enseñanzas que me compartió a lo largo de este proceso. Su experiencia fue fundamental para poder terminar este trabajo.

Por último, gracias a todos aquellos docentes que con su dedicación y su pasión por enseñar han dejado una marca muy importante en mi formación como profesional y como persona.

Chávez Rojas Noe Freddy

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, por abrirme sus puertas y permitirme formarme como profesional en sus aulas.

A mi tutor, el Ing. Eric Cabrera Estupiñán, PhD, por su invaluable guía, paciencia y por compartir su conocimiento con tanta generosidad. Sus correcciones y consejos fueron fundamentales para la culminación de este trabajo de investigación.

Un agradecimiento especial al Laboratorio de Mecánica de Suelos y a todo su personal técnico, por brindarnos los equipos necesarios de topografía, gracias a su disposición y paciencia en todo tiempo, pudimos realizar la respectiva recolección de datos y llevar a cabo este proyecto de manera efectiva.

A mis amigos, compañeros y docentes, cuyo valor en mi formación, trasciende más allá de las aulas. Las risas y los momentos compartidos son una experiencia que recordare con gratitud.

Anchundia Tapia Luís José

7 RESUMEN.

En el año 2025 se realiza un nuevo sistema de drenaje pluvial en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM en Manta que incluyó redimensionamiento de calles y aceras, sus recubrimientos con adoquines, presencia de un sistema subterráneo de drenaje formado por pozos, tuberías y descargas y un sistema superficial en el que se incluyen registros, sumideros con sus conexiones a los pozos, canalizaciones, etc. En la presente contribución se obtiene la respuesta hidrológica - hidráulica de este sistema ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, gracias a la creación de modelos de simulación tradicional, semidual y dual en el programa SWMM 5.2. Los modelos son creados en QGIS partiendo de datos recabados en informes, sin embargo, la mayoría de los datos necesarios fueron levantados en campo, se elaboró un modelo de elevación digital del terreno DEM y ortoimagen de toda la universidad. Los modelos son exportados a SWMM con Generate Swmm Inp de QGIS donde se realizan las simulaciones y se obtienen los resultados, los análisis y elaboración de informe se realizan en un proyecto de Rstudio con RMarkdown. Además, se crea un proyecto en QGIS con toda la infraestructura espacial del sistema de aguas lluvias AALL que incluye vínculos a imágenes reales y esquemáticas de los elementos imprescindibles para la adecuada gestión del sistema. Se demuestra la superioridad del modelo dual ante su similar tradicional, además se identifican algunos tramos de tuberías y pozos vulnerables a funcionar a presión, con desbordamientos y se brindan soluciones al respecto.

Palabras claves: SWMM, ULEAM, Rstudio, Rmarkdown, Generate Swmm Inp.

8 ABSTRACT.

In 2025, a new stormwater drainage system was implemented at the Eloy Alfaro Lay University of Manabí (ULEAM) in Manta. This included resizing streets and sidewalks, paving them with cobblestones, and installing an underground drainage system consisting of manholes, pipes, and outlets, as well as a surface system with catch basins, catch basins with their connections to the manholes, channels, etc. This contribution presents the hydrological and hydraulic response of this system to extreme hydrometeorological events, achieved through the creation of traditional, semi-dual, and dual simulation models using SWMM 5.2. The models were created in QGIS based on data collected from reports; however, most of the necessary data was collected in the field, and a digital elevation model (DEM) and orthophoto of the entire university were developed. The models are exported to SWMM using QGIS's Generate SWMM Input tool, where simulations are performed and results are obtained. Analysis and report generation are carried out in an RStudio project using RMarkdown. Additionally, a QGIS project is created with the complete spatial infrastructure of the AALL stormwater system, including links to real and schematic images of the essential elements for proper system management. The superiority of the dual model over its traditional counterpart is demonstrated, and some pipe sections and manholes vulnerable to operating under pressure and overflows are identified, along with solutions provided.

Keywords: SWMM, ULEAM, Rstudio, Rmarkdown, Generate Swmm Inp.

9 TABLA DE CONTENIDOS.

1	APROBACIÓN DEL TUTOR.....	1
2	DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
3	DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	3
4	CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	4
5	DEDICATORIA.....	5
6	AGRADECIMIENTO.....	7
7	RESUMEN.....	9
8	ABSTRACT.....	10
9	TABLA DE CONTENIDOS.....	11
10	LISTA DE FIGURAS.....	15
11	LISTA DE TABLAS.....	17
12	ABREVIATURAS.....	18
13	SIMBOLOGÍA.....	21
14	INTRODUCCIÓN.....	22
15	CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....	29
15.1	Sistemas de drenaje pluvial urbanos modernos.....	29
15.2	Modelación de la hidrodinámica de los sistemas de drenaje pluvial.....	30
15.3	El modelo SWMM y su amplio uso.....	32

15.4	Empleo de los SIG en la modelación de las redes de AALL.	33
15.5	Descripción espacial de la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí” en Manta.	34
15.6	Información existente del sistema AALL de la ULEAM Manta.....	40
15.7	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.....	41
16	CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.	43
16.1	Materiales.	43
16.1.1	Normativas técnicas.....	43
16.1.2	Materiales relacionados con topografía y teledetección.....	43
16.1.2.1	Topografía.	43
16.1.2.2	Teledetección o percepción remota.	45
16.1.3	Materiales relacionados con Softwares.	48
16.2	Métodos y modelos empleados.	49
16.2.1	Principales métodos y modelos de SWMM 5.2.	49
16.2.2	Método para definir los pluviogramas para SWMM.....	54
16.3	Modelos tradicional, semidual y dual.....	54
16.4	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.....	57
17	CAPÍTULO III: MODELOS HIDRODINÁMICOS Y PROYECTO SIG DEL SISTEMA DE AALL DE LA ULEAM MANTA.	59
17.1	Estudio de precipitaciones máximas.	59
17.1.1	Estaciones climáticas empleadas.....	59

17.1.2	Obtención de pluviogramas para los modelos.....	61
17.2	Elaboración de modelos de las redes en QGIS con Generate Swmm Inp.....	64
17.2.1	Modelo hidrodinámico en SWMM (Tradicional).	67
17.2.1.1	Subcuencas de drenaje.....	67
17.2.1.2	Pozos de revisión.....	70
17.2.1.3	Conductos.	72
17.2.1.4	Descargas.....	72
17.2.2	Modelo hidrodinámico en SWMM (semiDual).	72
17.2.2.1	Subcuencas de drenaje.....	72
17.2.2.2	Pozos de revisión, conductos y descargas.	76
17.2.3	Modelo hidrodinámico en SWMM (Dual).	76
17.2.3.1	Modelación de sumidero para el modelo dual.....	76
17.2.3.2	Modelación de las calles para el modelo dual.	79
17.2.4	Proyecto SIG del sistema de AALL de la ULEAM Manta.	82
17.2.4.1	Arquitectura de Datos y Estandarización Cartográfica.	82
17.2.4.2	Visualización de perfiles longitudinales con TUFLOW.	83
17.2.4.3	Vinculación de activos multimedia.	86
17.3	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.....	88
18	CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	90

18.1	Opciones de simulación.....	90
18.2	Simulación del modelo hidrodinámico (tradicional).....	90
18.2.1	Análisis de los conductos.	90
18.2.2	Análisis de los pozos.	94
18.3	Simulación del modelo hidrodinámico (semidual).....	95
18.3.1	Análisis de los conductos.	95
18.3.2	Análisis de los pozos.	98
18.4	Simulación del modelo hidrodinámico (dual).	99
18.4.1	Análisis de los conductos.	99
18.4.2	Análisis de los pozos.	101
18.4.3	Visualización de modelo dual 1D - 1D propuesto.....	102
18.4.4	Caudales y volúmenes evacuados en los puntos de descarga.....	103
18.4.5	Zonas especiales del sistema de AALL en la ULEAM Manta.....	107
18.4.6	Propuestas de acciones para mitigación de inundaciones.	109
18.5	Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.....	111
19	CONCLUSIONES.....	113
20	RECOMENDACIONES.	115
21	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	117
22	ANEXOS.....	122

10 LISTA DE FIGURAS.

Figura 1: Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.....	36
Figura 2: Materiales empleados para el levantamiento topográfico.	44
Figura 3: Modelo de elevación digital del terreno ULEAM.	47
Figura 4: Esquema de modelo de tanque para balance hídrico en SWMM 5.2.	50
Figura 5: Estaciones climatológicas principales y secundarias del INAMHI.....	61
Figura 6: Pluviogramas de la estación M0074 para Tr= 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.....	63
Figura 7: Proyecto en QGIS con el complemento Generate Swmm Inp.	64
Figura 8: Tablas de atributos de capas según Generate Swmm Inp.....	65
Figura 9: Exportación de modelo de red del SIG a SWMM.....	67
Figura 10: Superficie de drenaje para cada descarga, modelo tradicional.	69
Figura 11: Valores de CN, modelo tradicional.	70
Figura 12: Profundidades de pozos y pendientes de conductos.....	71
Figura 13: Superficie de drenaje para cada descarga, modelos semidual y dual.	74
Figura 14: Valores de CN, modelos semidual y dual.....	75
Figura 15: Sumideros existentes en el sistema de AALL de la ULEAM.	77
Figura 16: Definición de orificios para considerar sumideros en el modelo dual.....	79
Figura 17: Definición de calles en el modelo dual.....	80
Figura 18: Modelo de red del sistema dual creado en el GIS.	81
Figura 19: Configuración de láminas técnicas en el Layout de QGIS.....	83
Figura 20: Interfaz de visualización dinámica 1D Integrity Tool-Flow Trace.	85
Figura 21: Interfaz de consulta rápida mediante Map Tips.....	87

Figura 22: Ficha técnica de los objetos del sistema AALL de la ULEAM Manta.	88
Figura 23: Simulación modelo tradicional, caudal máximo en los conductos.....	91
Figura 24: Simulación modelo tradicional, capacidad de llenado máxima en los conductos. .	92
Figura 25: Simulación modelo tradicional, velocidad máxima en los conductos.	93
Figura 26: Perfiles de tramos importantes de la red, modelo tradicional.....	95
Figura 27: Simulación modelo semidual, caudal máximo en los conductos.	96
Figura 28: Simulación modelo semidual, capacidad de llenado máxima en los conductos.....	97
Figura 29: Simulación modelo semidual, velocidad máxima en los conductos.....	98
Figura 30: Simulación modelo dual, caudal máximo en los conductos.	100
Figura 31: Simulación modelo dual, capacidad de llenado máxima en los conductos.	100
Figura 32: Simulación modelo semidual, velocidad máxima en los conductos.....	101
Figura 33: Detalle modelo dual.	102
Figura 34: Perfil del detalle del modelo dual.	103
Figura 35: Hidrogramas obtenidos en los puntos de descarga.	104
Figura 36: Volúmenes obtenidos en los puntos de descarga.....	105
Figura 37: Zonas especiales del sistema de AALL Uleam Manta.	108
Figura 38: Simulación de nueva descarga propuesta, modelo dual.	110
Figura 39: Perfiles desde el pozo P40 a la descarga O-1 sin y con la inclusión de la nueva descarga.	111

11 LISTA DE TABLAS.

Tabla 1: Principales objetos espaciales de la ULEAM Manta.	37
Tabla 2: Intensidad de la lluvia de 24 horas de duración en (mm/h) para diferentes Tr.	62
Tabla 3: Interpretación de perfiles longitudinales con el visor de TUFLOW	85

12 ABREVIATURAS.

AALL	Aguas Lluvias.
ArcGIS	Sistema de Información Geográfica (SIG) de software propietario.
BGI	Blue-Green Infrastructure (Infraestructura Azul-Verde)
CAD	Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora).
CI	Cota Invertida (nivel de la solera interna inferior de una tubería).
CN	Curve Number (Número de Curva).
CT	Cota de Terreno.
DEM	Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital).
DLL	Dynamic Link Library (Librería de Enlace Dinámico). Archivo para comunicación externa con el motor de cálculo de SWMM.
EMAAP-Q	Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito.
EPA	Environmental protection agency. (Agencia de protección del ambiente de los Estados Unidos).
EPA SWMM	Versión del modelo de gestión de aguas pluviales desarrollado por la EPA.
EPP	Equipo de Protección Personal.
Extran	Extended Transport (Motor de cálculo de SWMM para flujo dinámico).
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library. (Biblioteca gratuita y de código abierto que permite a los usuarios acceder, procesar y transformar datos geoespaciales).
Generate Swmm Inp	Complemento de QGIS para generar archivos de entrada *.inp para SWMM.
GIS	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica).
GitHub	Interfaz basada en web que utiliza Git el software de control de versiones de código abierto que permite que varias personas realicen cambios separados en las páginas web al mismo tiempo.

GRASS	Geographic Resources Analysis Support System. (Un paquete de software gratuito y de código abierto para gestionar y analizar datos geoespaciales presente en QGIS).
HTML	HyperText Markup Language (Lenguaje de marcado para visualización de datos).
IFD	Curvas de Intensidad Frecuencia y Duración.
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador.
NIT	National Institute of Technology (Instituto Nacional de Tecnología).
NRCS	Natural Resources Conservation Service. (Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos).
PE	Polietileno.
PVC	Policloruro de Vinilo.
Python	Es uno de los lenguajes de programación más empleados a nivel mundial.
QGIS	Quantum GIS. Sistema de Información Geográfica gratuito y de código abierto.
R	Es uno de los lenguajes de programación estadística más completos disponibles.
Rmarkdown	Procesador de texto que ofrece además la posibilidad de incluir código desde R.
Rstudio	IDE con un conjunto de herramientas para ayudar a ser más productivo con R.
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses. (Es un programa de sistema de información geográfica (SIG) gratuito y de código abierto que permite a los usuarios editar y analizar datos espaciales presentes en QGIS).
SC	Sponge City (Ciudad Esponja).
scripts	Secuencias de comandos para ejecución de tareas automáticas.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.
SUST	Shahjalal University of Science and Technology.
SWMM	Storm Water Management Model.

swmmr	Paquete de R para interactuar con archivos de SWMM.
TUFLOW	Software de simulación hidráulica para visualización de perfiles.
ULEAM	Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.
Virtual Sewer Networks	Redes de Alcantarillado Virtuales. Representación digital y simulada de las infraestructuras de drenaje para el análisis de su comportamiento hidrodinámico.

13 SIMBOLOGÍA.

Símbolo	Definición
Tr	Período de retorno.
$x(m)$	Distancia en la dirección "x".
$t(s)$ o (min)	Intervalo de tiempo.
$A(m^2)$	Área de la sección transversal de un cauce.
$Q(m^3/s)$	Caudal volumétrico.
$y(m)$	Tirante de agua en el canal.
$z(m)$	Cota topográfica del fondo del canal.
S_o	Pendiente longitudinal del fondo del canal.
S_f	Pendiente longitudinal de energía en el canal.
$g(m/s^2)$	Aceleración de la gravedad.
$R(m)$	Radio hidráulico.
$p(m)$	Perímetro mojado.
n	Coefficiente de fricción de Manning.
$U(m/s)$	Velocidad media de circulación.
$V(m^3)$	Volumen ensamblado en cada nodo.
$A_s(m^2)$	Área superficial asignada a cada nodo.
$I_{d_{TR}}(min)$	Intensidad de una lluvia de duración 1 día o 24 horas y un período de retorno determinado.
$I_{TR}(min)$	Intensidad de una lluvia para un tiempo y período de retorno determinado.

14 INTRODUCCIÓN.

Debido a su emplazamiento costero, la ciudad de Manta presenta una alta vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos extremos, particularmente aquellos vinculados al fenómeno de El Niño. En este contexto, la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) se identifica como un enclave estratégico, no solo por su función académica, sino por su potencial rol como infraestructura de refugio ante desastres naturales. Si bien la universidad ha renovado recientemente su infraestructura de drenaje, dicho sistema aún no ha sido sometido a eventos de magnitud extraordinaria que validen su capacidad de respuesta funcional.

La gestión de la escorrentía en entornos urbanos se fundamenta en la interacción de dos subsistemas críticos. El sistema de drenaje menor que comprende la red de alcantarillado subterráneo (tuberías y pozos de inspección) diseñada para caudales ordinarios de precipitación [(Sañudo et al., 2020), y el sistema de drenaje mayor, que, por el contrario, gestiona el flujo superficial por medio de la red vial, cunetas y zonas de almacenamiento natural o artificial [(Sañudo et al., 2020).

El modelado de drenaje dual surge como un enfoque necesario para el análisis concomitante de la escorrentía superficial y el flujo en conductos cerrados. Esta necesidad se acentúa en el campus de la ULEAM, donde la expansión de la infraestructura ha incrementado las superficies impermeables. Este cambio en el uso de suelo intensifica los picos de escorrentía y reduce la capacidad de regulación natural de las microcuencas, elevando el riesgo de inundación (Rodriguez et al., 2025).

El modelado convencional falla al capturar la dinámica real del escurrimiento, esta omisión de detalles topográficos induce errores significativos al calcular cuánto tiempo y con qué profundidad permanecerá el agua en sectores específicos de la zona de estudio, invalidando los mapas de riesgo a escala de detalle. (Guo et al., 2020).

Al implementar un modelado bidimensional acoplado (dual), buscamos capturar fenómenos que el análisis tradicional ignora, el ingreso crítico por rejillas, el comportamiento del agua en superficie tras un desbordamiento por colapso de la red y el retorno del flujo al alcantarillado. Este enfoque es vital para mapear zonas de riesgo real donde el sistema de drenaje actúa como una vía bidireccional. (Sim & Kim, 2024). Dicho análisis es relevante al integrar la comunicación hidráulica entre la superficie y la red subterránea. Estos intercambios de flujo, condicionados por la capacidad de captación en sumideros y la carga de presión en los pozos de revisión, muestran el comportamiento real del sistema ante eventos extremos (Sañudo et al., 2020).

Capturar la interacción dinámica en los puntos de conexión exige una precisión que solo se logra al integrar el análisis geoespacial de QGIS con la capacidad hidráulica de EPA SWMM. En el campus de la ULEAM, la fuerte inclinación del terreno altera drásticamente el tránsito del agua, por ello, esta metodología no solo busca simular el flujo, sino entender cómo la topografía local acelera la esorrentía y condiciona la entrada a la red subterránea. (Cea et al., 2025).

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación institucional de la ULEAM “Tecnologías de software integradoras enfocadas a la comunicación académica y científico – técnica, reproducible, automatizada y reutilizable”, liderado por el Dr. Eric Cabrera Estupiñán y es una continuidad natural de los trabajos realizados por Barreiro Santana (2022) y Campo Arteaga & Zambrano Santander (2024).

Por todo lo dicho, se puede plantear como **problema de investigación** del siguiente trabajo:

Se desconoce la respuesta hidrológica – hidráulica del sistema de drenaje pluvial de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta, ante eventos hidrometeorológicos extremos máximos.

Para abordar este problema se define como **objeto de investigación o de estudio**: Ingeniería hidrosanitaria.

Como **campo de acción**: Red de drenaje pluvial de la ULEAM.

Con el propósito de dar respuesta al problema planteado se define el siguiente **objetivo general**:

Evaluar la respuesta hidrológica – hidráulica del sistema de drenaje pluvial de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta, ante eventos hidrometeorológicos extremos máximos por medio de modelos hidrodinámicos tradicional semidual y dual.

Y se parte de la siguiente **hipótesis de la investigación**:

Con la creación y ejecución de modelos hidrodinámicos de la red de drenaje pluvial de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta, se puede obtener y evaluar el comportamiento hidrodinámico del sistema ante eventos hidrometeorológicos extremos máximos.

Como **variable independiente**: Modelación hidrodinámica de la red de drenaje pluvial de la ULEAM Manta, como variable cuantitativa continua y operacional.

Mientras que la **variable dependiente** sería: Comportamiento hidrodinámico del sistema ante eventos extremos, como variable cuantitativa continua.

Las **tareas de investigación** desarrolladas para cumplir con el objetivo predefinido y demostrar la hipótesis se presentan a continuación:

- Realizar un análisis del estado del arte concerniente al empleo de modelos de simulación de redes de drenaje pluvial con estrategias de esquemas tradicionales y duales, así como su vinculación con sistemas de información geoespacial SIG.
- Obtener y/o generar datos hidrometeorológicos y del sistema de drenaje pluvial existente de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta.
- Desarrollar un proyecto de sistema de información geoespacial SIG del sistema de drenaje pluvial existente de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta.
- Desarrollar un modelo de simulación, hidrodinámico, tradicional, de la red de drenaje pluvial de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta, para eventos hidrometeorológicos extremos máximos.
- Configurar los modelos hidrodinámicos (semidual y dual), integrando los parámetros físicos de la red pluvial de la ULEAM para la evaluación de escenarios hidrometeorológicos extremos.
- Evaluar la respuesta hidrológica - hidráulica del sistema de drenaje pluvial de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM Manta, ante diversos escenarios de eventos extremos máximos con los resultados de las simulaciones de los modelos previamente desarrollados.

Los **métodos de trabajo científico** empleados en la investigación son:

-Métodos generales: El método **hipotético-deductivo** utilizado en la elaboración de la hipótesis y como método orientador a la obtención paulatina de resultados parciales; el método **histórico-lógico** y el **dialéctico**, empleados en el estudio crítico de las contribuciones precedentes en el estado del arte y extraer aspectos interesantes de ellos, así como usar estos trabajos como referencia para constatar la dimensión de los resultados alcanzados.

-Métodos matemáticos: La **modelación matemática** para comprender la esencia de los submodelos matemáticos empleados en el modelo matemático SWMM, comprender las limitaciones de los modelos basados en sus hipótesis.

-Métodos empíricos: El método **coloquial** para la presentación parcial de resultados al director de la tesis, así como la presentación final. El método **experimental** empleado en la definición de alternativas y ajuste de parámetros de los modelos por medio de simulaciones numéricas.

-Método sintético: Por medio del proceso de aprendizaje se es capaz de integrar componentes dispersos de un objeto que se desarrolla a partir de una relación funcional entre los componentes, ejemplo: Modelo hidrodinámico SWMM, herramientas del SIG QGIS para trabajo de pre y post procesamiento de redes y una herramienta para generar los proyectos en diferentes formatos de salida y con capacidad para reutilización de código.

Con relación a la **estructura del documento** se puede decir que consta de cuatro capítulos, de los cuales se brinda un pequeño resumen a continuación.

En el capítulo 1 se realiza una revisión bibliográfica acerca de los sistemas de drenaje pluvial, sus características actuales, criterios de diseño y/o análisis de redes de drenaje pluvial desde una perspectiva moderna y fundamentalmente las herramientas tecnológicas de software que existen

en la actualidad para su modelación hidrodinámica. Una atención especial recibe el empleo de Sistemas de Información Geoespacial en las etapas de preprocesamiento cuando se define la esqueletización de la red (trabajo topológico) y el post procesamiento para la realización de análisis.

El capítulo 2 está dedicado a la presentación y análisis de los principales materiales y métodos que se emplean en el trabajo. Aquí se brinda una perspectiva del arsenal teórico que sustenta los modelos de drenaje pluvial desde el punto de vista matemático y computacional haciendo un especial énfasis en los métodos empleados en el software SWMM. Se explican las características de los modelos tradicional y dual haciendo hincapié en la estrategia definida en los modelos creados y que se abordan en los próximos capítulos. Además, se presenta un resumen de los materiales empleados para la generación y manipulación de datos.

El capítulo 3 describe el desarrollo de los modelos hidrodinámicos y la consolidación del proyecto en el Sistema de Información Geográfica (SIG) de la ULEAM Manta. En esta sección se detalla el procesamiento de datos hidrometeorológicos para la obtención de pluviogramas sintéticos y la construcción de los esquemas de red tradicional, semidual y dual mediante el complemento Generate Swmm Inp en QGIS. Asimismo, se aborda la arquitectura de datos geoespaciales y la integración de activos multimedia para la gestión de la infraestructura pluvial.

El capítulo 4 presenta la ejecución de las simulaciones y el análisis comparativo de los resultados obtenidos para los tres modelos evaluados. Se examina la respuesta del sistema en términos de caudales, velocidades y niveles piezométricos, identificando los puntos críticos vulnerables a inundaciones o funcionamiento a presión. Finalmente, se proponen medidas de mitigación técnica y acciones de mantenimiento preventivo para optimizar el comportamiento hidráulico de la red ante eventos extremos.

Estas herramientas de modelado predictivo son determinantes para la gestión del riesgo de inundación superficial y la toma de decisiones sobre mejoras de infraestructura (Knight et al., 2021). Por medio de esta investigación, se pretende también demostrar la eficacia de las soluciones basadas en software libre para fortalecer la resiliencia de la comunidad universitaria ante las amenazas hidrometeorológicas.

15 CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.

15.1 Sistemas de drenaje pluvial urbanos modernos.

La gestión moderna de escorrentía pluvial ha evolucionado desde el paradigma de la evacuación inmediata (infraestructura gris) hacia la regulación del balance hídrico mediante los sistemas de drenaje sostenible (SUDS), la infraestructura azul y verde (BGI) y el concepto de ciudad esponja (SC). Todas estas estrategias se basan en la reducción de la escorrentía pluvial y el aumento de la capacidad de retención e infiltración y buscan imitar los procesos hidrológicos naturales de infiltración, evaporación y almacenamiento, (Chen & Gaspari, 2023).

Investigaciones recientes en campus universitarios, como los casos del campus NIT Warangal donde se realizó una simulación para un periodo de retorno ($Tr = 2$ años) con una intensidad de diseño de 1 hora, se obtuvo que el 40% de los conductos de la red de drenaje del campus eran insuficientes para manejar el caudal, (Rangari et al., 2018) y en el caso del campus SUST donde el análisis reveló que, bajo condiciones de lluvia extrema ($Tr = 5$ años), el sistema actual colapsaba. Al simular la red, se identificó que el 30% de los drenajes existentes estaban subdimensionados (Swarup et al., 2024), coincidiendo en que la digitalización de redes mediante SWMM y GIS es el primer paso para diagnosticar la infraestructura gris tradicional frente a la urbanización acelerada.

En cuanto a eficiencia, la literatura consultada muestra una directa dependencia entre los sistemas modernos y la intensidad del evento pluvial. Mientras que Monachese et al. (2024) señala que los pavimentos permeables reducen el volumen de escurrimiento en un 50 %, también advierte que el rendimiento de los SUDS es óptimo en tormentas de diseño de baja intensidad,

pero su eficiencia de retención disminuye ante eventos extremos o cuando el suelo alcanza su capacidad de saturación.

La literatura consultada también propone soluciones que optimizan la infraestructura existente. Pochwat (2022) propone la retención en canales empleando particiones de apilamiento dentro de los colectores existentes para maximizar el uso de los espacios gravitacionales en las tuberías, convirtiendo el sistema de alcantarillado en un reservorio de retención temporal. En consecuencia, Pochwat (2022) demuestra mediante modelos que la retención en canales es una alternativa viable para maximizar la capacidad del sistema sin requerir de nuevas áreas superficiales. Este enfoque puede ser relevante en la ULEAM donde la construcción de grandes infraestructuras de retención externas puede ser limitada.

Más allá de las limitaciones en la disponibilidad de datos de alta resolución o la complejidad normativa, el desempeño de estos sistemas está condicionado por la precisión del modelado bidimensional (Monachese et al., 2024). El éxito operativo reside en asegurar una transición fluida del flujo entre la infraestructura BGI y la red gris, evitando cuellos de botella en los nodos de conexión.

15.2 Modelación de la hidrodinámica de los sistemas de drenaje pluvial.

La precisión de la modelación hidrodinámica de los sistemas de drenaje de aguas lluvia está ligada al nivel de discretización espacial. Según estudios de Niazi et al. (2017) la macro-delimitación tiende a simplificar los procesos de transporte y almacenamiento superficial, lo que frecuentemente resulta en una atenuación de los picos de caudal y un aumento en el tiempo de respuesta del sistema. Por el contrario, un enfoque de micro-delimitación permite representar

con mayor detalle la variabilidad de las superficies impermeables, capturando la respuesta rápida y los caudales pico característicos de las zonas urbanas, siempre que se cuente con datos de alta resolución para evitar un incremento en la incertidumbre de los parámetros cinemáticos.

En los modelos tradicionales 1D, se asume que todo el escurrimiento generado en una subcuenca es captado instantáneamente por el nodo de salida, lo que implica una eficiencia de intercepción del 100% que no se ajusta a la realidad (Barreiro et al., 2022). Al incluir sumideros (inlets) como la interfaz real en el modelo es vital debido a que la acumulación de agua en la superficie está relacionada con la ineficiencia de estos dispositivos. Cuando la red de alcantarillado se satura y entra en carga (flujo a presión), el volumen de agua que debería entrar por los sumideros se anula e incluso puede invertirse, dando lugar al desbordamiento desde los pozos de inspección hacia el entorno urbano (Barreiro et al., 2022), obligando al agua a permanecer en la calle.

Bajo el esquema dual 1D-1D, las vías se conceptualizan como una red de canales abiertos y zonas de almacenamiento superficial que interactúan sobre el sistema de tuberías (Barreiro et al., 2022). Esta configuración permite que las cunetas y canales actúen mediante una mitigación hidrodinámica, el almacenamiento en superficie funciona como un amortiguador que desplaza el tiempo de concentración, logrando una reducción del caudal pico que los modelos de depósito único suelen sobreestimar.

El modelo 1D-1D ofrece resultados muy cercanos a la realidad con un tiempo de ejecución significativamente menor que el 1D-2D (siendo entre 10 y 50 veces más rápido), lo que lo hace ideal para pronósticos en tiempo real donde la dirección del flujo es predecible y está confinada a las calles (Schellart et al., 2011). Resulta fundamental considerar la dinámica espacial de las precipitaciones; según lo expuesto por Niazi et al. (2017), el desplazamiento de una tormenta

en la misma dirección del escurrimiento (aguas abajo) tiende a generar caudales pico significativamente superiores en comparación con eventos que se desplazan en sentido opuesto.

15.3 El modelo SWMM y su amplio uso.

SWMM fue desarrollado originalmente por la EPA en 1971, coincidiendo con la firma de la Ley de Agua Limpia en los Estados Unidos (Niazi et al., 2017). A lo largo de las décadas, EPA SWMM, ha incorporado motores de cálculo avanzados como Extran (Extended Transport), siendo considerado como el estándar debido a su capacidad para resolver las ecuaciones de Saint-Venant completas (conservación de masa y cantidad de movimiento). Esto le permite simular condiciones hidráulicas que modelos más simples (como la onda cinemática) no pueden manejar, tales como la presurización de tuberías y el refluo (flujo inverso) (Niazi et al., 2017).

La naturaleza de código abierto de SWMM y la existencia de su Librería de Enlace Dinámico (DLL) permiten a los investigadores recuperar y configurar variables hidráulicas durante la simulación sin usar la interfaz gráfica (Montalvo et al., 2024). Esto ha facilitado la creación de paquetes como SWMMR en R para automatizar ejecuciones y procesar datos, así como el uso de consolas de Python (como en QGIS) para generar automáticamente redes de alcantarillado virtuales (Virtual Sewer Networks) basadas en la topografía de las calles (Sañudo et al., 2020; Montalvo et al., 2024).

Zuo et al. (2025) establecen que SWMM es un software ampliamente accesible, lo que le ha otorgado reconocimiento internacional, siendo aplicado con éxito en China e India para examinar los impactos del cambio climático en el drenaje urbano y evaluar riesgos de inundación en áreas altamente vulnerables. En este contexto, Niazi et al. (2017) concluyen que SWMM mantiene un equilibrio óptimo entre el detalle conceptual y la parquedad

computacional, lo cual facilita que los procesos de parametrización y calibración sean manejables, lo que reduce el riesgo de mal uso y mantiene la carga computacional en niveles razonables para aplicaciones de mediana y gran escala (Niazi et al., 2017).

15.4 Empleo de los SIG en la modelación de las redes de AALL.

La integración de DEM de alta resolución en plataformas GIS resulta determinante cuando la información de base es limitada (Swarup et al., 2024). Más allá de una simple visualización, estas herramientas permiten realizar una partición detallada del área basada en la forma del suelo y la disposición de la red, al considerar la pendiente real, el modelo captura con mayor rigor las direcciones de flujo (Zuo et al., 2025).

El uso de polígonos permite delimitar áreas de aporte basadas en la infraestructura existente y el uso de suelo real (edificios, carreteras, áreas verdes) (Swarup et al., 2024). Esto garantiza que el área de drenaje calculada en el SIG sea exacta para ser utilizada, evita errores de estimación que según Montalvo et al. (2024) suelen comprometer entre el 25% y el 50% de la información de la red por inconsistencia en la entrada de datos.

La extracción de datos críticos como la pendiente de la subcuenca (mediante la intersección de líneas de flujo con curvas de nivel) y cálculo de la longitud del flujo máximo para derivar el ancho característico se simplifican con el uso de estas herramientas (Saleh et al., 2024).

Este enfoque garantiza la consistencia entre la pendiente del terreno y el nodo de red más cercano, optimizando la asignación de áreas tributarias (Zuo et al., 2025). Al procesar las rutas de drenaje mediante herramientas geoespaciales, se rectifican las trayectorias del agua para que la red digital sea un espejo fiel del drenaje superficial de la ULEAM, evitando errores de dirección comunes en modelos automatizados (Xie et al., 2025).

Los complementos de integración permiten convertir capas vectoriales (polilíneas y puntos) directamente al formato .inp de SWMM (Sañudo et al., 2020). Lo que asegura la integridad de los datos al evitar la transcripción manual de información relevante como coordenadas, elevaciones de solera y dimensiones de tuberías, proceso que (Montalvo et al., 2024) identifica como fuentes críticas de error.

El análisis de capas en QGIS, apoyado en ortofotos de alta resolución, permite clasificar el terreno en categorías precisas como edificios, pavimentos, pastizales y suelos desnudos (Siswanto et al., 2025). A cada categoría se le asigna un coeficiente de escurrimiento específico según su permeabilidad, y el SIG realiza un cálculo ponderado para obtener el porcentaje de impermeabilidad exacto de cada subcuenca, un dato vital para la precisión del modelo en eventos de lluvia extrema (Swarup et al., 2024).

Uno de los complementos que más se emplean en la actualidad para vincular el SIG con el modelo SWMM es el llamado **Generate Swmm Inp**, originalmente publicado en (Schilling & Tränckner, 2022) y que forma parte del flujo de trabajo propuesto en (Campo Arteaga & Zambrano Santander, 2024).

15.5 Descripción espacial de la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí” en Manta.

La Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí (ULEAM), con 40 años de trayectoria, se ubica en la zona central de la ciudad de Manta y abarca una superficie aproximada de 21 ha. En los últimos años, el campus ha atravesado por diversas modificaciones en su infraestructura vial, edificaciones y espacios públicos. Destacando entre ellos el sistema de drenaje pluvial (AALL), el cual constituye el objeto de estudio de la presente investigación.

En la figura **1** se muestran los principales objetos de servicios de la ULEAM Manta los cuales son vitales para poder elaborar modelos detallados de drenaje pluvial. En esta imagen también se muestra una ortoimagen producida como parte del presente trabajo de investigación. Seguidamente se presenta la tabla **1** que sirve de apoyo para comprender los objetos espaciales de la figura anterior.



- Categorías**
- | | | | | |
|---------|-------------|---------------|---------|---------|
| ■ FCS | ■ FIAA | ■ FCVT | ■ FETAH | ■ FCACC |
| ■ FCSDB | ■ Auditorio | ■ Gastronomía | ■ ADMON | ■ UE |
| ■ ED | ■ Cultural | ■ Parqueos | | |

Figura 1: Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Tabla 1: Principales objetos espaciales de la ULEAM Manta.

Nro	Categoría	Objetos
1		BO-4 Edificio carrera de Odontología.
2		B-18 Edificio carrera de Enfermería.
3		B-19 Edificio carrera de Medicina y Laboratorio Clínico.
4	FCS Facultad de Ciencias de la salud.	B-20 Edificio carrera de Psicología.
5		B-21 Edificio carreras Fisioterapia, Terapia ocupacional, Fonoaudiología, Nutrición y dietéticas.
6		B-24 Instituto de Neurociencias.
7		B-25 Instituto Postgrado e Investigación en Ciencias de la salud.
8		I-09 Decanato de Ciencias de la Salud.
9	FIIA Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura.	BO-7 Edificio carreras de Arquitectura, Tecnología Construcción Sismorresistente y Tecnología Metalmecánica.
10		BO-8 Edificio carreras de Ingeniería Civil y Eléctrica.
11		B-09 Edificio carrera Ingeniería Industrial.
12		B-11 Edificio carrera de Ingeniería Marítima.
13		B-10 Edificio carrera de Biología.
14	FCVT Facultad de Ciencias de la vida y tecnología.	B-15 Edificio carreras Agropecuaria, Agronegocios, Agroindustria, Alimentos, Ingeniería Ambiental.
15		B-16 Edificio carreras Tecnologías de la Información, Software.
16		B-01 Edificio carreras de Educación.
17		B-05 Carreras de Turismo, Gestión hotelera, gastronomía.
18	FETAH Facultad de Educación, Turismo, Artes y Humanidades.	B-06 Carreras de Turismo, Gestión hotelera, gastronomía.
19		B-22 Edificio carrera Pedagogía de la Actividad Física y el Deporte.
20		B-23 Edificio carreras Artes Plásticas, Escénicas, Arqueología, Sociología, Diseño Textil e Indumentaria.

Nro	Categoría	Objetos
21		B-26 Edificio carreras Artes Plásticas, Escénicas, Arqueología, Sociología, Diseño Textil e Indumentaria.
22		N-16 Edificio carrera de Artes.
23		BO-3 Edificio carreras de Comercio Exterior, Gestión de la Información Gerencial y Bienes Raíces.
24	FCACC	B-12 Edificio carreras de Administración de Empresas y Gestión del Talento Humano.
25	Facultad de Ciencias Administrativas, Contables y Comercio.	B-13 Edificio carreras de Contabilidad y Auditoría, Finanzas, Mercadotecnia, Auditoría y Control de Gestión.
26		B-02 Edificio carrera de Economía.
27	FCSDB	BO-6 Edificio carreras de Derecho, Criminología y Ciencias Forenses.
28	Facultad de Ciencias Sociales, Derecho y Bienestar.	B-14 Edificio carrera de Trabajo Social.
29		B-17 Edificio carrera de Comunicación.
30		C-03 Paraninfo y futura biblioteca de la ULEAM.
31	Auditorio	CIEC Centro de Convenciones.
32	Espacios de auditorio.	D-04 Auditorio Horacio Hidrovo.
33		N-15 Auditorio de Comunicación.
34		J10 Laboratorio Gastronómico
35		T-1 Tasty Food 1
36	Gastronomía	T-2 Tasty Food 2
37	Espacios gastronómicos.	T-3 Tasty Food 3
38		T-4 Tasty Food 4
39		E-05 Dirección de Bienestar, Admisión y Nivelación Universitaria DBANU.
40		A-01 Rectorado y Secretaría General.
41	ADMON	I-09 Decanato de Ciencias de la Salud.
42	Administración	L-12 Vicerrectorado de Investigación.
43		EP-ULEAM Empresa Pública de la ULEAM.

Nro	Categoría		Objetos
44			M-13 Dirección de Infraestructura, Obras, Patrimonio y Medioambiente DIOPM.
45			N-14 Edificio Centro de Idiomas.
46			K-11 Dirección de Postgrado, Cooperación y Relaciones Internacionales.
47			G-07 Bodega - Control de Bienes.
48			H-08 Transporte.
49			O-16 Dirección de Informática e Innovación Tecnológica DIIT.
50			EP-EC Empresa Pública de Estudios y Construcciones.
51			EP-EC Empresa Pública de Estudios y Construcciones.
52	UE	Unidad Educativa.	JM-BN Juan Montalvo, Bloque Nuevo.
53			JM-BA Juan Montalvo, Bloque Antiguo.
54			F-06 Coliseo
55			CM-1 Canchas Múltiples 1.
56			CM-2 Canchas Múltiples 2.
57	ED	Espacios deportivos.	CM-3 Canchas Múltiples 3.
58			GT-EU Gradadas techadas del Estadio Universitario.
59			GS-EU Gradadas de sol del Estadio Universitario.
60			EU Estadio Universitario.
61	Cultural	Espacios culturales.	PC Plaza cultural.
62			CINE Cine de la ULEAM.
63			P-1 Parqueo #1.
64			P-2 Parqueo #2.
65			P-3 Parqueo #3.
66	Parqueos	Espacios para parqueos.	P-4 Parqueo #4.
67			P-5 Parqueo #5.
68			P-6 Parqueo #6.
69			P-7 Parqueo #7.

Nro	Categoría	Objetos
70	P-8	Parqueo #8.
71	P-9	Parqueo #9.
72	P-10	Parqueo #10.

15.6 Información existente del sistema AALL de la ULEAM Manta.

A partir de la revisión de informes técnicos internos y diseños definitivos de los sistemas hidrosanitarios del campus, se documenta una transición estructural desde una red obsoleta que se desarrolló de manera desordenada. El diagnóstico de la red preexistente reveló severas patologías en la red como raíces en las cajas de revisión en zonas con árboles bloqueando tuberías, la fusión de redes de aguas lluvias con aguas servidas en diversas cajas de revisión, las cuales, en su mayoría (unas 400 contabilizadas), ya han cumplido su vida útil al ser de mampostería o ladrillo.

Más allá de la eficiencia operativa, el diseño de sistemas independientes busca resolver el conflicto técnico que supone la mezcla de aguas residuales y pluviales, al evitar esta convergencia no solo previene colapsos por materiales pétreos o desechos, sino que asegura una carga menos contaminante y constante para el tratamiento, para una ciudad costera como Manta, esta separación es el mecanismo principal para evitar que las escorrentías urbanas transporten contaminantes hacia el océano, preservando la calidad del agua en las zonas de descarga.

Para el diseño de esta nueva red se adoptó un periodo de retorno $Tr = 10$ años para el diseño de colectores principales y secundarios. Ante eventos que superen esta capacidad, el diseño contempla un sistema de derrame superficial, donde las cunetas de las calles trabajarán al

máximo de su capacidad, existiendo flujo en calzada momentáneamente durante el pico de la lluvia y evacuando el exceso conforme disminuye la intensidad.

Con respecto a parametrización hidráulica, se establece un valor de Fricción de Manning (n) de 0.013 para tuberías de PE/PVC, aunque el material permite el uso de valores inferiores (0.010), el uso de 0.013 como valor de diseño conservador prevé sedimentos o falta de mantenimiento. Coeficiente de escorrentía (C) un valor de 0.70 para un área de drenaje del proyecto de 10.05 hectáreas, no obstante, esta investigación se propone refinar dicho valor mediante una discretización espacial detallada en SIG.

La red pluvial tiene varios puntos de descarga que incluyen pozos existentes de la red de AALL de la ciudad, así como descarga directamente en la quebrada existente más cercana dentro de los predios de la universidad mediante una tubería de 450 mm. El sistema está conformado por sumideros de rejilla colocados paralelos o diagonales al sentido del flujo para facilitar el tránsito, La tipología de los sumideros se selecciona en función del gradiente longitudinal de la vía para optimizar la captura del flujo, en tramos con pendientes moderadas, menores al 5%, se priorizan las estructuras laterales con apertura en el bordillo (ventana), sin embargo, al superar este umbral de inclinación, la inercia del agua exige el uso de sumideros con rejilla en la rasante, los cuales garantizan una mayor eficiencia de intercepción al cortar directamente la trayectoria de la lámina de agua.

15.7 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.

A partir de la revisión bibliográfica y el diagnóstico preliminar del sitio, se concluye que el enfoque de modelación tradicional (1D), el cual asume una captación inmediata y total de la escorrentía, resulta insuficiente para representar la realidad hidráulica de entornos urbanos

complejos como el campus de la ULEAM. La evidencia de problemas de flujo a presión y desbordamientos en la red existente hace imperativo adoptar un enfoque de Drenaje Dual (1D-1D), permite simular tanto el flujo en tuberías como el comportamiento del “sistema mayor” (vías y cunetas) cuando la capacidad subterránea es superada, alineándose así con las tendencias modernas de gestión de inundaciones. Asimismo, se valida que la integración de SWMM 5.2 con herramientas SIG (QGIS) constituye el estándar técnico idóneo, donde la resolución de las ecuaciones completas de Saint-Venant mediante la Onda Dinámica resulta indispensable para modelar los fenómenos de reflujos y presurización detectados.

En lo referente al caso de estudio, la descripción espacial e infraestructura de la ULEAM revela un sistema en transición donde conviven redes obsoletas con nuevos diseños, presentando patologías como conexiones erróneas y sedimentación que justifican la necesidad de un modelo hidrodinámico calibrado. Este modelo no solo servirá para evaluar el diseño de la nueva red separada bajo el periodo de retorno de diseño $T_r = 10$ años, sino que permitirá identificar puntos críticos de inundación superficial ante eventos extremos, proporcionando una herramienta técnica robusta para la toma de decisiones futuras sobre infraestructura complementaria.

Finalmente, el análisis del estado del arte respalda la decisión metodológica de priorizar la precisión en la entrada de datos. La implementación de un levantamiento topográfico de alta precisión y una discretización espacial detallada es fundamental para superar las barreras de “falta de datos de resolución” y minimizar la incertidumbre en parámetros hidrológicos clave como pendientes y anchos de flujo. De esta manera, esta metodología garantiza que el modelo resultante supere las limitaciones de las estimaciones manuales y permita una evaluación precisa y confiable de la resiliencia del sistema de drenaje universitario.

16 CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.

16.1 Materiales.

16.1.1 Normativas técnicas.

Un aspecto fundamental para la realización de los proyectos de alcantarillado pluvial son las normas técnicas que rigen su desarrollo. En tal sentido, en Ecuador se cuenta primeramente con el documento: **Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes** (INEN, 1992). Este es, sin dudas, el documento normativo nacional más empleado por los ingenieros para el análisis y diseño de sistemas de drenaje pluvial. También se cuenta con el documento: **Normas de Diseño de sistema de alcantarillado para la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable EMAAP-Q**, ver EMAAP-Q (2009).

16.1.2 Materiales relacionados con topografía y teledetección.

Los materiales y equipos que aquí se describen han sido imprescindibles para la generación de datos de alta calidad y en un corto período de tiempo, con los que se ha podido generar el proyecto SIG y los modelos de flujo del Sistema de drenaje pluvial de la ULEAM Manta.

16.1.2.1 Topografía.

Debido a que la fotogrametría no permite capturar información subterránea, se ejecutó un levantamiento topográfico convencional para mapear la ubicación exacta de sumideros, descargas y niveles de fondo de pozo, esta fase de campo actuó como un control de calidad

sobre el modelo digital de superficie, validando los niveles verticales necesarios para el posterior cálculo de las pendientes de la red.

Los equipos y herramientas principales utilizados, facilitados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la ULEAM, se muestran en la figura 2 y se detallan a continuación detallan.

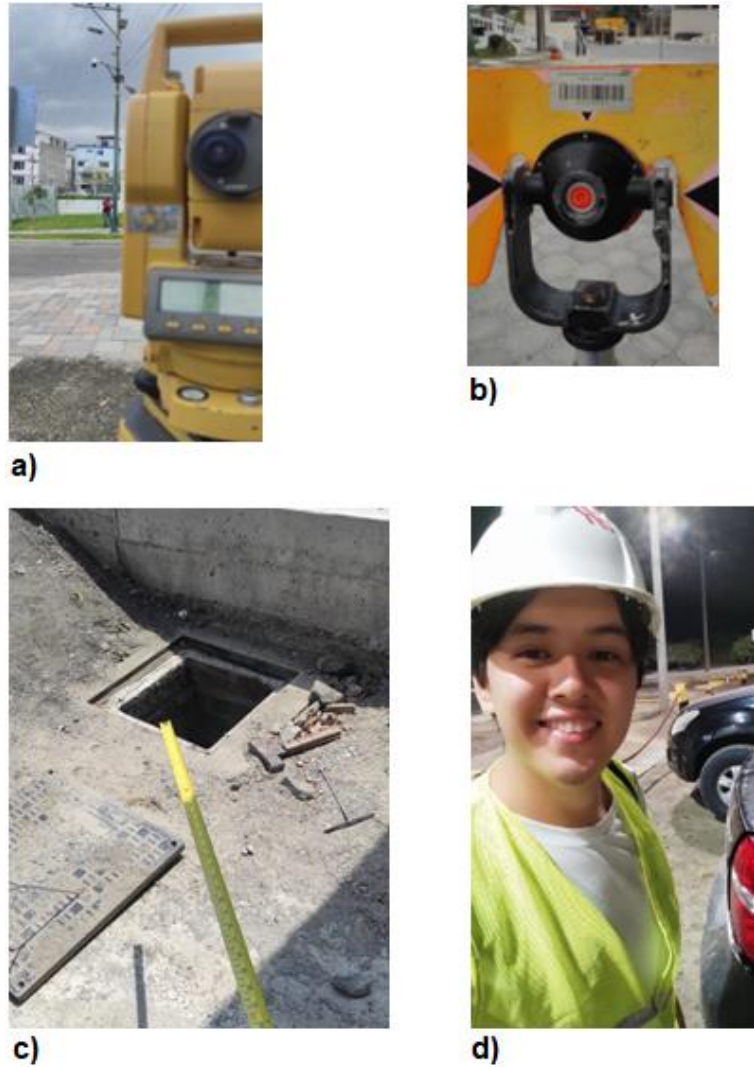


Figura 2: Materiales empleados para el levantamiento topográfico.

Estación Total: Se utilizó una estación total **Stonex R1 Plus** de alta precisión angular y medición de distancia por láser, fundamental para georreferenciar los pozos existentes y las

estructuras de descarga que se encontraban bajo la vegetación o fuera del alcance visual del dron, ver figura 2 a).

Accesorios de Estación:

-**Trípode de aluminio**: Para la estabilización y nivelación del equipo en los puntos de control.

-**Prisma reflector y Bastón (Jalón)**: Empleados para la toma de puntos sobre las tapas de los pozos y bordillos. El prisma permitió la medición precisa de coordenadas (Norte, Este) y elevación (Z) mediante el rebote de la señal infrarroja emitida por la estación, ver figura 2 b).

Herramientas de medición directa:

-**Flexómetro (Cinta métrica metálica)**: Se utilizó un flexómetro de 8 metros, esta herramienta fue indispensable para determinar la diferencia de altura entre la cota de la tapa (medida con la estación) y el fondo del conducto, dato crítico para el modelado hidráulico, ver figura 2 c).

Herramientas auxiliares:

-**Barretas y ganchos de acero**: Herramientas de maniobra empleadas para la apertura de los pozos de revisión, facilitando el acceso en aquellos puntos donde la acumulación de sedimentos o el recubrimiento por pavimentación antigua dificultaban la inspección.

-**Equipo de Protección Personal (EPP)**: Chalecos reflectivos y cascos de seguridad para garantizar la visibilidad y protección del equipo de trabajo durante las mediciones en vías de circulación vehicular, ver figura 2 d).

16.1.2.2 Teledetección o percepción remota.

Esta técnica se usó para la obtención de un modelo de elevación digital del terreno y una ortoimagen de la ULEAM Manta, productos claves para el desarrollo de un proyecto SIG

relacionado con el sistema de drenaje pluvial de la universidad donde se ubicará la infraestructura de datos de este importante sistema y eventualmente se podrán incluir de otros como drenaje sanitario, abastecimiento de agua, sistemas contra incendio, electricidad, fibra óptica, etc. En tal sentido se empleó un dron del tipo **DJI Mavic Air 2** que usa un sensor óptico **CMOS de 1/2 pulgadas** para la obtención de ortoimágenes y modelos de elevación digital del terreno DEM por medio de fotogrametría. Para revisar las características técnicas del equipo el lector puede visitar el siguiente sitio web <https://share.google/iB1MF5d1B9aEbzeqj>.

Para la obtención de estos productos se realizó un vuelo del dron el viernes 18 de abril de 2025, día feriado con lo cual se garantizó un mínimo de movilidad peatonal y de autos en la universidad y se realizó en horas de la mañana garantizándose una buena iluminación. Para esta actividad se tramitaron y obtuvieron los permisos institucionales del caso.

El DEM es obtenido con una resolución de 7.77 cm y con un error en la cota de $\pm 30\text{cm}$, siendo un error tolerable para determinar la pendiente media de cada subcuenca. A continuación, se muestra la figura 3 con el modelo de elevaciones del terreno DEM donde se pueden observar con colores verdes las zonas más bajas y hacia donde se generan los escurrimientos superficiales y con colores rojos las zonas con elevaciones mayores, en el modelo también quedan muy bien representados los techos de los edificios y se perfilan muy bien las principales calles.



Figura 3: Modelo de elevación digital del terreno ULEAM.

16.1.3 Materiales relacionados con Softwares.

-**Software SWMM:** Storm Water Management Model SWMM versión 5.2, es decir, modelo de gestión de aguas pluviales que es un software libre desarrollado por la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos EPA. Con SWMM 5.2 se realiza la simulación del movimiento del agua en el suelo producto de una precipitación intensa, puede ser empleado para el escurrimiento superficial y para la infiltración de agua en el suelo, aunque su mayor empleo es en el campo de la simulación de redes de drenaje pluvial y sanitaria ([Gironás et al., 2009](#)).

-**Software QGIS:** Más conocido como QGIS, es uno de los Sistema de Información Geográfica de uso libre más empleado en el mundo. QGIS presenta librerías de funciones propias de él y de otros SIG libres muy potentes como GRASS, SAGA, GDAL, además de contar con capacidades para incluir scripts de Python, R etc. Todo esto lo hace verdaderamente muy potente, sobre todo para estudios hidrológicos donde se han desarrollado un amplio grupo de herramientas, ([Kwast et al., 2019](#)). Para este proceso se utiliza el componente **Generate Swmm Inp**, encargado de crear el archivo de extensión .inp requerido por el software SWMM. El componente integra elementos físicos de la red —como pozos, tuberías, subcuencas y descargas— a partir de archivos vectoriales (.shp o .gpkg). Complementariamente, gestiona datos operativos y no físicos, tales como series temporales, curvas características (bombas, vertederos o almacenamiento) y parámetros de calidad del agua, procesados mediante archivos .xlsx. También se emplea QGIS para todo el trabajo de transferencia de ficheros espaciales entre los ficheros CAD con extensión dwg y el SIG.

-**Generate Swmm Inp:** Este es un complemento gratuito y de código abierto para QGIS que permite generar modelos SWMM a partir de geodatos e importar archivos de entrada SWMM existentes en QGIS, en [Schilling & Tränckner \(2022\)](#) se pueden consultar las características de

dicha herramienta, así como encontrar un estudio del estado del arte de herramientas que realizan funciones similares. También se sugiere la revisión del trabajo realizado por Campo Arteaga & Zambrano Santander (2024) donde se realiza un análisis minucioso de equivalencia de las variables de los objetos: Pluviómetros (Rain gages), Uniones (Junctions), Depósitos (Storage units), Divisores de flujo (Dividers), Descargas (Outfalls), Conductos (Conduits), Bombas (Pumps), Vertedores (Weirs), Orificios (Orifices), Salidas (Outlets) y Subcuencas (Subcatchment), entre el software SWMM y el complemento Generate Swmm Inp de QGIS. El resultado de este trabajo se encuentra en tablas en los anexos del 1 al 11 lo que constituye una guía muy importante para facilitar el trabajo eficaz y eficiente de los usuarios de Generate Swmm Inp.

-R y Rstudio: Es un entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico, nació como una reimplementación de software libre del lenguaje S. Se trata de uno de los lenguajes de programación más utilizados en investigación científica, cuenta con una gran comunidad de personas que desarrollan paquetes en una amplia gama de ramas de la ciencia y la técnica, en tal sentido se destacan los campos del análisis espacial, estadístico, hidrológico y la visualización. Para la elaboración del informe de tesis se crea un proyecto en Rstudio basado en RMarkdown con el cual se logra la automatización y reproducibilidad de dicho informe, en (Campo Arteaga & Zambrano Santander, 2024) se brinda la información básica de los paquetes de R que se emplean para lograr este objetivo.

16.2 Métodos y modelos empleados.

16.2.1 Principales métodos y modelos de SWMM 5.2.

-Modelo hidrológico de SWMM 5.2.

La escorrentía superficial que se produce en cada Subcatchment es calculada por SWMM 5.2 al asumir que cada subcuenca se comporta como un depósito no lineal. El modelo de depósito no lineal es un modelo “agregado” que aplica la ecuación de Conservación de la Masa y una ecuación tipo Onda Cinemática para calcular el caudal de escorrentía superficial a la salida de cada subcuenca, ver figura 4. En este modelo de depósito se requieren diferentes datos dentro de los que destacan: el área en planta de la subcuenca, su ancho característico y la rugosidad superficial (Gironás et al., 2009).

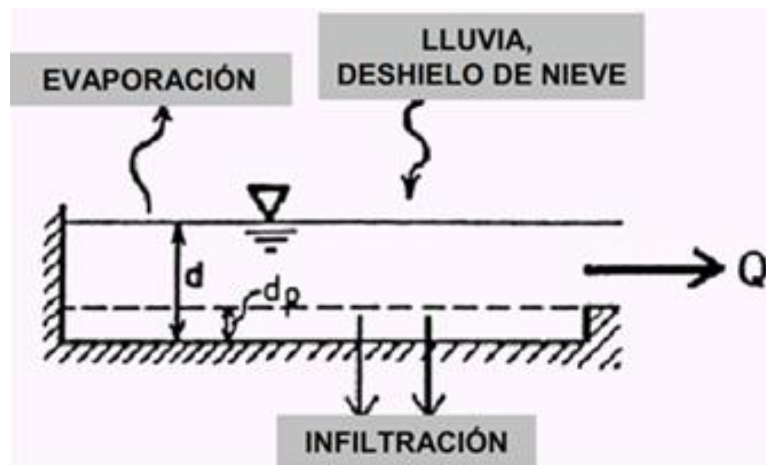


Figura 4: Esquema de modelo de tanque para balance hídrico en SWMM 5.2.

-Modelos de infiltración de SWMM 5.2.

Para el cálculo de la infiltración SWMM 5.2 tiene varios métodos, estos son: 1- Método de Horton, 2- Método de Horton modificado, 3- Método de Green-Ampt, 4- Método de Green-Ampt modificado y 5- Método del Número de Curva del NRCS (Gironás et al., 2009).

En el trabajo se emplea el Método del Número de Curva o CN del NRCS, por lo cual se asume que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una tabla de Números de Curva tabulados. Los parámetros de entrada para este método son el número de la curva, y el

tiempo (en días) que tarda el suelo en secarse completamente partiendo de su estado de total saturación, este es un método que está ampliamente difundido en gran parte de la literatura técnica especializada en temas de hidrología ([Cronshey, 1986](#)).

-Modelos hidráulicos de transporte de SWMM 5.2.

EPA SWMM 5.2 permite elegir entre tres diferentes metodologías de cálculo del flujo en la red de drenaje. La primera, denominada Steady Flow Routing, consiste en asumir que en cada intervalo de tiempo de cálculo las condiciones del flujo no cambian; es decir, se tiene flujo permanente. La segunda metodología es denominada Kinematic Wave (onda cinemática), y en esta se considera la variabilidad temporal del flujo. Este método resuelve la ecuación de Conservación de la Masa y una aproximación de la ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento. El tercero de estos métodos consiste en la resolución de las ecuaciones completas de Saint Venant (Conservación de la Masa y Cantidad de Movimiento), denominado como método de la Onda Dinámica (Dynamic Wave). Este método es el físicamente más correcto, aunque demanda un mayor tiempo de proceso computacional ([Gironás et al., 2009](#)), justamente es el método que se empleará en las simulaciones en período extendido, sobre todo por los modelos semidual y dual.

-Modelo de la onda dinámica.

El modelo de transporte de la Onda Dinámica (Dynamic Wave Routing) resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nudos ([Gironás et al., 2009](#)).

Con este tipo de modelo de transporte es posible representar el flujo presurizado cuando una conducción cerrada se encuentra completamente llena, de forma que el caudal que circula por la misma puede exceder del valor de caudal a tubería completamente llena obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad (nivel o tirante) del agua en los nudos excede el valor máximo disponible en los mismos. Este exceso de caudal bien puede perderse o bien puede generar un estancamiento en la parte superior del nudo y volver a entrar al sistema de saneamiento posteriormente, (Gironás et al., 2009).

El modelo de transporte de la Onda Dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, el flujo inverso y el flujo presurizado.

Las siguientes ecuaciones son las de conservación de la masa o continuidad y la de conservación de momentum a una masa fluida, también conocidas como ecuaciones de Saint Venant, en este caso obtenidas para flujo unidireccional, distribución de presiones hidrostáticas y flujo uniforme para la determinación de la rasante energética.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f \right) = 0$$

Donde:

x : Distancia en la dirección x , unidades (m).

t : Intervalo de tiempo, unidades (s).

A : Área de la sección transversal, unidades (m^2).

Q : Caudal, unidades (m^3/s).

y : Tirante de agua en el canal, unidades (m).

z : Cota topográfica del fondo del canal, unidades (m).

S_o : Pendiente longitudinal del fondo del canal, unidades (adim).

S_f : Pendiente longitudinal de energía en el canal, unidades (adim).

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

En la ecuación anterior, la pendiente de energía se calcula por medio de la ecuación de Manning como se muestra a continuación.

$$S_f = \frac{nQ|Q|}{A^2 R^{4/3}}$$

Donde:

R : Radio hidráulico $R = A/p$, unidades (m).

p : Perímetro mojado de la sección transversal, unidades (m).

n : Coeficiente de fricción de Manning, unidades (adim).

Las ecuaciones de Continuidad y de momentum anteriores se combinan y después de varias transformaciones se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f \right)$$

Donde:

U : Velocidad media de circulación, Q/A , unidades (m/s).

Esta sería la ecuación para modelar el perfil de flujo dentro de los conductos en SWMM 5.2, sin embargo, para conectar las tuberías y permitir el flujo en la red se necesita de la ecuación de continuidad en los nodos que puede ser escrita como sigue:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial(z+y)} \frac{\partial(z+y)}{\partial t} = A_s \frac{\partial(z+y)}{\partial t} = \Sigma Q$$

Donde:

V : Volumen ensamblado en cada nodo, unidades (m^3).

A_s : Área superficial asignada a cada nodo, unidades (m^2).

ΣQ : Sumatoria de flujos que entran y salen a cada nodo (m^3/s).

En SWMM 5.2, estas ecuaciones diferenciales son resueltas con el empleo del método de diferencias finitas, para más información ver Gironás et al. (2009).

16.2.2 Método para definir los pluviogramas para SWMM.

Para el caso del tratamiento de la precipitación se emplea el método de bloques alternos, (Chow et al., 1994), con el que se obtiene un pluviograma sintético para un determinado período de retorno, por ejemplo (10 años) y una duración del evento de lluvia (2 horas), a partir de Curvas IFD. Este pluviograma se ingresará como dato en SWMM 5.2 por medio de una serie temporal.

16.3 Modelos tradicional, semidual y dual.

La literatura especializada clasifica las estrategias de modelación hidrodinámica urbana en función de la dimensionalidad espacial y la complejidad de la interacción entre el drenaje subterráneo y el flujo superficial.

Modelo Tradicional (1D: Minor System)

El enfoque tradicional unidimensional (1D) se limita a simular el flujo dentro de la red de alcantarillado (minor system).

- **Elementos Modelados:** En este esquema, el modelo se compone exclusivamente de pozos de revisión (Junctions), tuberías (Conduits) y puntos de descarga (Outfalls). Los sumideros no se modelan físicamente; se asume simplificada que el agua de la subcuenca entra directa al pozo.
- **Resultados y Limitaciones:** Este modelo entrega resultados de caudal dentro de las tuberías y niveles piezométricos en los pozos. Sin embargo, su limitación crítica surge cuando la red se satura. El modelo conceptualiza el exceso de agua como un volumen estancado en un “depósito virtual” infinitamente alto sobre el pozo, asumiendo que el agua se queda allí hasta que puede reingresar ([Montalvo et al., 2024](#)). En consecuencia, este modelo no permite visualizar zonas de inundación ni determinar hacia dónde corre el agua una vez que sale a la superficie.

Modelo Semidual Acoplado (1D-1D: Dual Drainage)

El modelo semidual o 1D-1D supera las deficiencias del enfoque tradicional al integrar explícitamente el sistema mayor (major system), compuesto por calles y canales superficiales, con el sistema menor (minor system) de tuberías. En este enfoque, la superficie se discretiza como una red de canales abiertos interconectados que corren paralelos o sobre la red de tuberías ([Oberauer & Lehmann, 2024](#)).

La comunicación entre ambos dominios ocurre de forma dinámica en los puntos de conexión, este enfoque es vital para caracterizar:

- **Captura Limitada:** Un proceso donde los sumideros actúan como el primer regulador de flujo.
- **Interacción de Exfiltración:** Cuando la red alcanza su capacidad máxima y entra en carga (surcharge), el modelo simula el resurgimiento del flujo hacia la superficie. A partir de este punto, la escorrentía excedente se transporta dinámicamente aguas abajo utilizando las calles como canales abiertos (Oberauer & Lehmann, 2024).

Elementos Modelados: Mediante la discretización de las calles como redes de canales y el modelado de sumideros como dispositivos de control hidráulico, se logra una simulación bidireccional fiel a la física del escurrimiento.

Resultados y Ventajas:

La interacción bidireccional permite simular dos fenómenos físicos cruciales que son vitales para el diagnóstico.

Captura Limitada: calcula si el sumidero tiene la capacidad hidráulica suficiente para tragar el agua que llega por la cuneta.

Exfiltración (Regurgitación): Identifica claramente los puntos donde la red está en presión y el agua brota desde los pozos hacia la calle. Este modelo permite visualizar el tránsito superficial del agua, identificando corredores hidráulicos de emergencia y zonas de acumulación crítica dentro de la ULEAM, optimizando así el diagnóstico de zonas vulnerables a inundación.

Se evaluó la viabilidad del enfoque totalmente acoplado (1D-2D), el cual integra el modelo unidimensional de la red con un modelo bidimensional de superficie que resuelve las Ecuaciones de Aguas Someras (Shallow Water Equations) (Schellart et al., 2011). Aunque esta metodología permite simular la propagación multidireccional del flujo alrededor de obstáculos y edificaciones, conlleva un incremento sustancial en el costo computacional. Mientras que los modelos 1D-2D con mallas finas ($< 5\text{m}$) (Schellart et al., 2011) requieren tiempos de ejecución que oscilan entre horas y días, el esquema 1D-1D presenta una alta eficiencia operativa, al reducir los tiempos de cálculo a rangos de minutos (Oberauer & Lehmann, 2024).

Tras analizar la morfología del campus ULEAM, se seleccionó el esquema 1D-1D por que ofrece una relación técnica favorable entre precisión y tiempo de procesamiento, las pendientes pronunciadas de las vías internas fuerzan un confinamiento del flujo en las cunetas, lo que permite una representación fiel mediante canales abiertos sin necesidad de la carga computacional que exige una malla bidimensional (2D), esta agilidad operativa resulta estratégica para ejecutar las múltiples iteraciones necesarias en el diseño de los sistemas de alerta temprana propuestos.

16.4 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.

En el capítulo se presentan los principales materiales y métodos que se emplean en el trabajo.

En el caso de los materiales, estos se subdividen en materiales asociados con temas de información topográfica y materiales de software, en el primer caso cabe destacar el levantamiento topográfico realizado con lo cual se obtuvo la información planimétrica y altimétrica de los elementos de la red, de igual manera se realizó el vuelo de un dron para la obtención de un DEM de la universidad y una ortoimagen. Con relación a los softwares, destaca

el uso de Rstudio con una amplia variedad de paquetes, QGIS con el complemento *Generate Swmm Inp* y el modelo SWMM 5.2.

En el caso de los métodos se realiza una concisa explicación de los principales métodos implementados en el software de simulación SWMM.

17 CAPÍTULO III: MODELOS HIDRODINÁMICOS Y PROYECTO SIG DEL SISTEMA DE AALL DE LA ULEAM MANTA.

17.1 Estudio de precipitaciones máximas.

Con este estudio de precipitaciones máximas se pretende obtener los pluviogramas que se deben asignar a cada subcuenca de los modelos a crear en SWMM 5.2. Estos pluviogramas se pasan a los modelos como series temporales.

Para la obtención de estos pluviogramas se parte de las curvas de Intensidad frecuencia y duración (en lo adelante IFD) que se tengan de estaciones climatológicas en la zona de estudio. Una vez con estas curvas se aplica el método de bloques alternos, ver Chow et al. (1994) pudiéndose obtener pluviogramas sintéticos de aguaceros que responden a intensidades acorde a sus probabilidades de ocurrencia.

17.1.1 Estaciones climáticas empleadas.

En el Ecuador la mayor red de estaciones climatológicas es gestionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, durante varios años esta institución publicó los anuarios meteorológicos e hidrológicos que aglutinaban gran parte de los datos que recolectaba esta institución. Esta, sin lugar a dudas es una fuente de datos imprescindible para estudios como el que aquí se realiza y en tal sentido, de estos anuarios se obtienen los valores de lluvia acumulada mensual desde el año 1990 hasta el 2012 de las estaciones cercanas al área de estudio.

En INAMHI (2015) (versión actualizada 2019) se realiza un estudio riguroso de los datos de lluvia, tanto de las estaciones pluviográficas como de las pluviométricas, y se llega a definir zonas de influencia de cada estación pluviográfica a nivel de país (basadas en la estrategia de polígonos de Thiessen) y se plantean ecuaciones de curvas IFD para las estaciones pluviométricas que se encuentren en cada zona de influencia que dependen de lo que en ese estudio le llaman Intensidad de la lluvia para 24 horas $I_{d_{TR}}$ (mm/h).

En el mapa de la figura 5 se puede apreciar la zona de influencia “4” perteneciente a la estación pluviográfica (Principal) con código: M0005 conocida como “PORTOVIEJO-UTM”, que como puede verse se encuentra en el cantón Portoviejo, relativamente cerca de la zona de estudio en Manta. Por otra parte, en el mismo mapa se observa que la estación pluviométrica (Secundaria) con código: M0074 conocida como “MANTA AEROPUERTO” es, por mucho, la más cercana a la ULEAM y que presenta una amplia serie histórica de datos, en tal sentido se decide trabajar con la curva IFD de esta estación para el cálculo de pluviogramas de diferentes períodos de retorno para las subcuencas que conforman el sistema de drenaje de la ULEAM Manta. Se trabaja entonces con lluvias intensas de una duración de dos horas ya que se entiende que esta es una duración bastante lógica para eventos lluviosos de este tipo en la zona y se emplean los períodos de retorno de $Tr= 2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años, aunque para evaluar en principio el funcionamiento hidrodinámico de las redes de AALL se empleó solo el pluviograma del período de retorno $Tr=10$ años ya que es el normado para un sistema de drenaje como el que aquí se analiza.

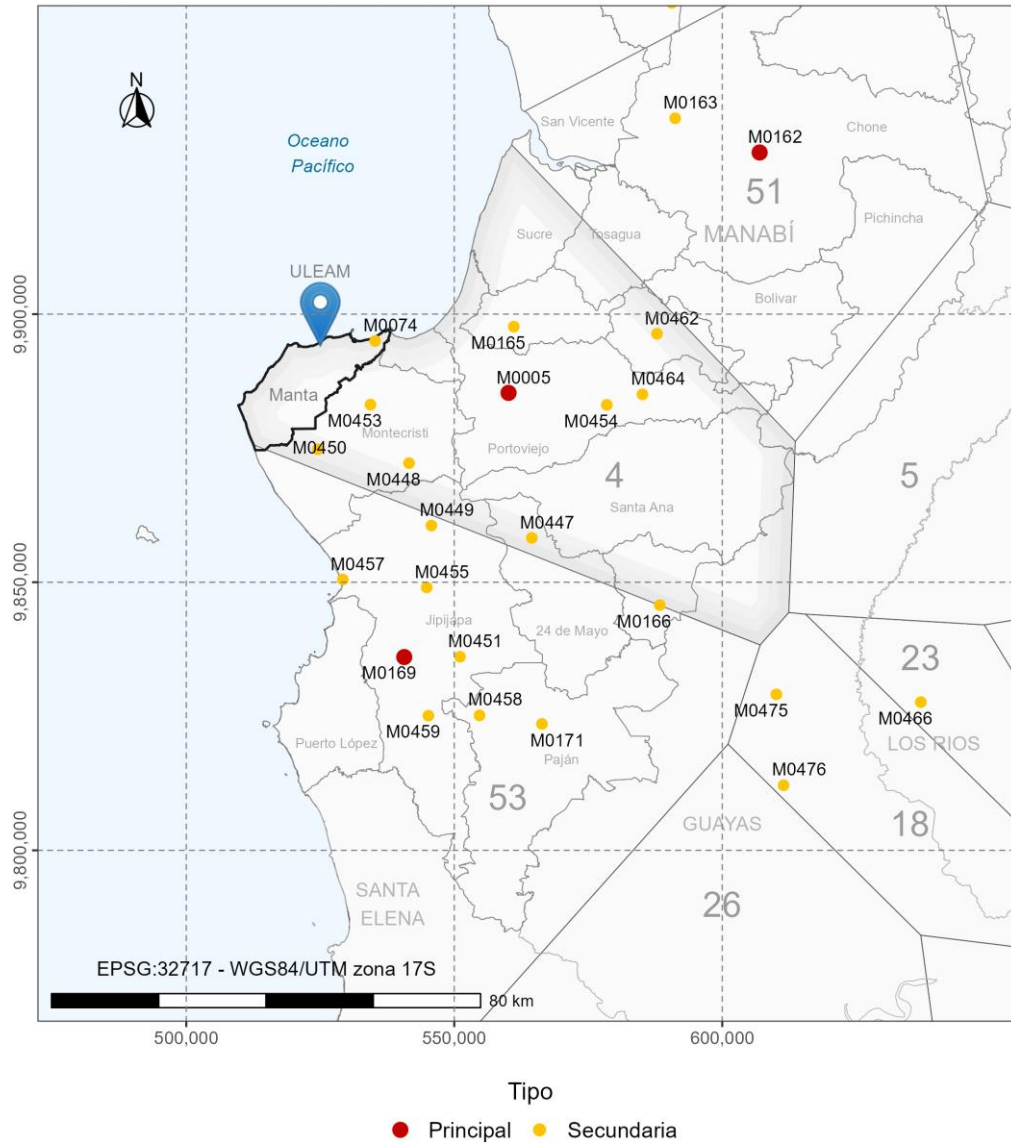


Figura 5: Estaciones climatológicas principales y secundarias del INAMHI.

17.1.2 Obtención de pluviogramas para los modelos.

A continuación, se presentan las ecuaciones de las curvas IFD para la **Zona: #4, Estación: M0005, Nombre: PORTOVIEJO-UTM.**

Para: $5min \leq t \leq 79.03min$

$$I_{TR} = 88.905I_{d_{TR}}t^{-0.465}$$

Para: $79.03min \leq t \leq 1440min$

$$I_{TR} = 461.74I_{d_{TR}}t^{-0.842}$$

Donde:

$I_{d_{TR}}$ (mm/h): Es la intensidad de la lluvia en 24 horas y un período de retorno determinado.

t (min): Tiempo en minutos. I_{TR} (mm/h): Intensidad de la lluvia para un tiempo determinado.

En la tabla 2 se presentan los valores de intensidad de la lluvia de duración 24 horas para la estación M0074, información publicada en INAMHI (2015) (versión actualizada 2019).

Tabla 2: Intensidad de la lluvia de 24 horas de duración en (mm/h) para diferentes Tr.

Nro	Código de estación	Período de retorno Tr(años)					
		2	5	10	25	50	100
1	M0074	1.86	2.57	3.04	3.63	4.07	4.5

Con los datos de la tabla y las ecuaciones anteriores se aplica el método de bloques alternos para la obtención de los pluviogramas para una lluvia de dos horas de duración y períodos de retorno de Tr= 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, ver el proceso en el anexo 1. A continuación se presenta la figura 6 que muestra los pluviogramas obtenidos por el método de bloques alternos para cada uno de los períodos de retorno, esta es la representación gráfica de los valores de las tablas del anexo 1.

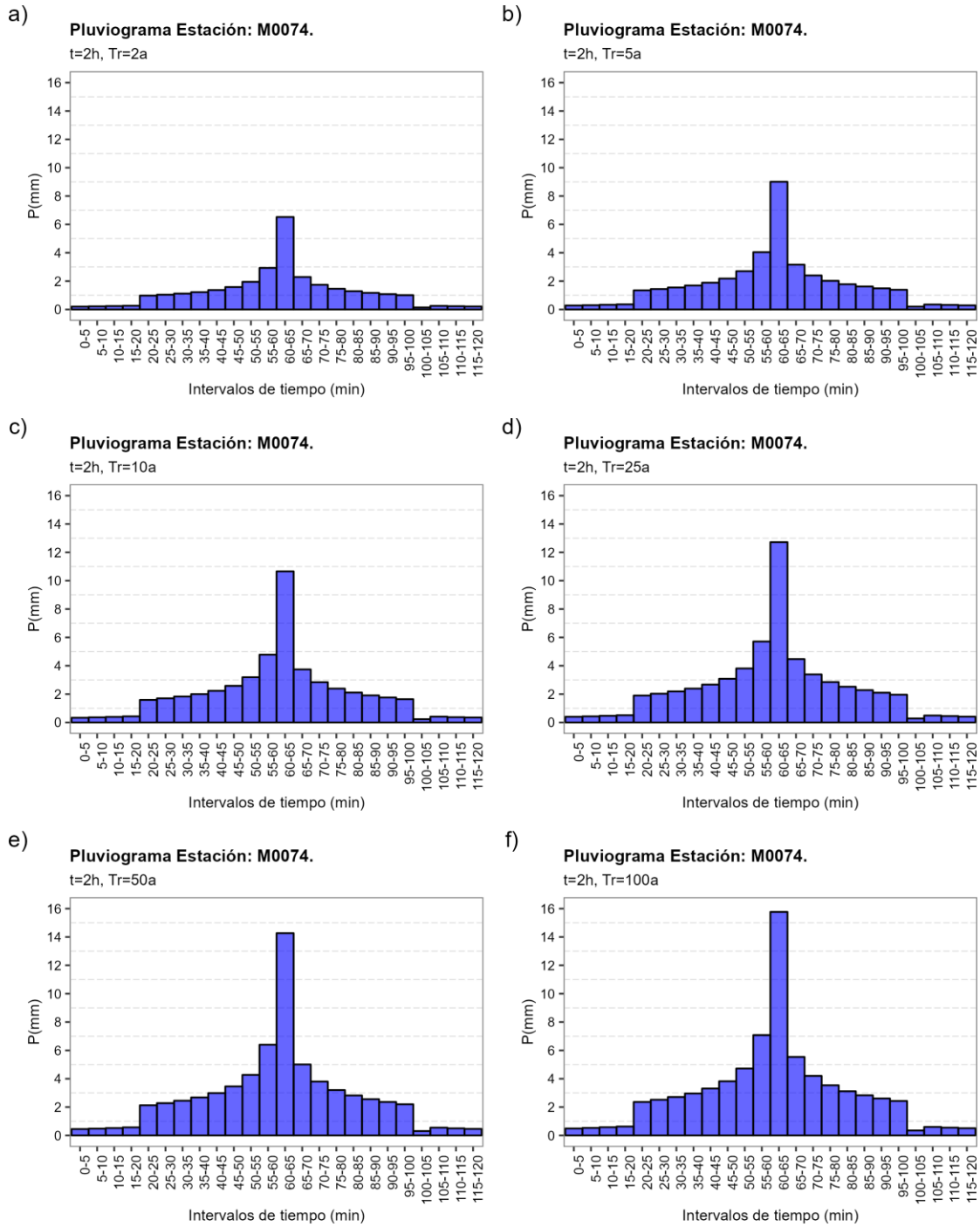


Figura 6: Pluviogramas de la estación M0074 para Tr= 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

17.2 Elaboración de modelos de las redes en QGIS con Generate Swmm Inp.

En la figura 7 se presenta el proyecto en QGIS llamado Uleam_pluvial donde se emplea el complemento *Generate Swmm Inp*. Desde el punto de vista organizativo se puede ver que se crean grupos de capas para cada uno de los modelos, estos son: 1- Modelo_AALL_ULEAM_Tradicional, 2- Modelo_AALL_ULEAM_SemiDual y 3- Modelo_AALL_ULEAM_Dual. En cada uno de ellos se encuentran ficheros *.shp de cada uno de los objetos de las redes AALL que maneja SWMM con los campos correspondientes, ejemplo: áreas de drenaje, pozos, conductos, descargas, etc.

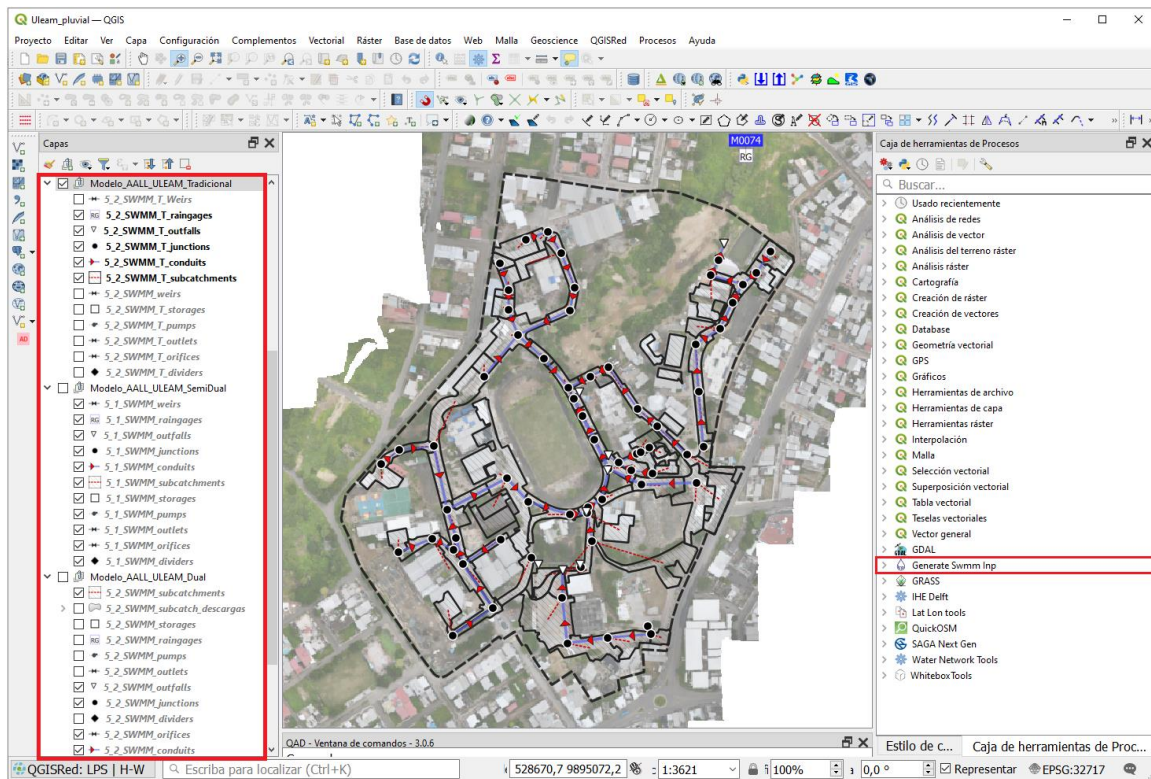


Figura 7: Proyecto en QGIS con el complemento Generate Swmm Inp.

En la figura 8 se muestran las tablas con algunas de las variables de estos objetos nodos, conductos y subcuencas del modelo tradicional. Es importante mencionar que debido a la

cantidad de datos con los que cuentan los modelos semidual y dual, por ejemplo 1131 áreas de drenaje, estos datos no se presentan en el trabajo, pudiéndose acceder a ellos en formatos *.shp*, *.csv*, etc.

The figure displays three screenshots of software tables, each with a toolbar and a 'Mostrar todos los objetos espaciales' button at the bottom.

5_2_SWMM_T_junctions—Objetos Totales: 65, Filtrados: 65, Seleccionados: 0

fid	Name	Elevation	MaxDepth	InitDepth	SurDepth	Aponded	Annotation	CT
1	11 P49	52.55599999999...	1.5600000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL	54.11600000000...
2	12 P48	52.82039999999...	1.2300000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL	54.04999999999...
3	13 P50	52.32730000000...	1.9300000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL	54.25730000000...
4	14 P51	52.05619999999...	1.9100000000000...	NULL	NULL	NULL	NULL	53.96620000000...

5_2_SWMM_T_conduits—Objetos Totales: 64, Filtrados: 64, Seleccionados: 0

fid	ID	Name	FromNode	ToNode	Length	Roughness	InOffset	OutOffset	InitFlow
1	11	42 C-42	P48	P49	28.1452865737...	0.011	0	0	/
2	12	43 C-43	P49	P50	30.7819887830...	0.011	0	0	/
3	13	44 C-44	P50	P51	45.4251920932...	0.011	0	0	/
4	14	45 C-45	P51	P52	28.5808032954...	0.011	0	0	/

5_2_SWMM_T_subcatchments—Objetos Totales: 76, Filtrados: 76, Seleccionados: 0

fid	Name	RainGage	Outlet	Area	Imperv	Width	Slope	CurbLen	SnowPac
1	1 S-1	M0074	P43	0.046820368512...	45.00000000000...	18.72814740490...	8.8200000000000...	NULL	NULL
2	2 S-2	M0074	P44	0.214376777016...	45.00000000000...	57.93966946403...	10.69999999999...	NULL	NULL
3	3 S-3	M0074	P45	0.063030224868...	45.00000000000...	37.07660286356...	8.4200000000000...	NULL	NULL
4	4 S-4	M0074	P46	0.076200900108...	45.00000000000...	28.22255559569...	7.9200000000000...	NULL	NULL

Figura 8: Tablas de atributos de capas según Generate Swmm Inp.

En la tabla de atributos de *5_2_SWMM_T_junctions* (capa de pozos) la columna *Name*: representa el nombre del pozo, *Elevation*: La cota del fondo del pozo (cota de la solera), *MaxDepth*: Altura desde la cota de terreno y la cota de solera del pozo. *InitDepth*: Nivel inicial de agua en el pozo. *SurDepth*: Profundidad superior a la profundidad máxima antes de que se produzca la inundación (m). *Aponded*: Área de agua estancada en la superficie, (asociada al pozo) cuando ocurre una inundación por desbordamiento del pozo (m^2). *CT*: Cota de terreno, esta última no la necesita SWMM, se ubica para otros propósitos gráficos.

En la tabla de atributos de 5_2_SWMM_T_conduits (capa de conductos) la columna *Name*: representa el nombre del conducto. *FromNode*: Nombre del nodo de partida del conducto, *ToNode*: Nombre del nodo de llegada del conducto, *Length*: Longitud (m) del conducto, *Roughness*: Coeficiente de fricción de Manning de los conductos, *InOffset*: Desnivel entre la cota invertida de la tubería que sale del pozo y la cota de la solera del pozo (cuando es 0 significa que la cota invertida de la tubería que sale coincide con la cota de solera o de fondo del pozo, *InOffset*: Desnivel entre la cota invertida de la tubería que llega a un pozo y la cota de la solera de ese pozo (cuando es 0 significa que la cota invertida de la tubería que llega coincide con la cota de solera o de fondo del pozo, *InitFlow*: Caudal inicial en el conducto, *MaxFlow*: Caudal máximo permitido a circular en el conducto (para no tenerlo en cuenta se coloca 0).

En la tabla de atributos de 5_2_SWMM_T_subcatchments (capa de subcuencas) la columna *Name*: representa el nombre asignado a la subcuenca. *RainGage*: Puviograma asignado a la subcuenca, *Outlet*: Nombre del nodo (pozo) u otra subcuenca que recibe el escurrimiento de dicha subcuenca, *Area*: Área de la subcuenca (*ha*), *Imperv*: Porcentaje de área impermeable, *Width*: Ancho de la ruta de flujo sobre la superficie, *Slope*: Pendiente promedio de la superficie. *CurbLen*: Variable asociada al transporte de contaminantes (no se emplea aquí), *Snowpack*: Variable asociada al aporte de caudal producto del derretimiento de hielo (no se emplea aquí), *N_Imperv*: Valor de la n de Manning para el área impermeable (valor recomendable y empleado en el proyecto 0.01).

En resto de variables puede ser consultado en los ficheros del proyecto en QGIS o en los ficheros Inp de SWMM de cada modelo. En el siguiente gráfico se puede ver el funcionamiento del complemento Generate Swmm Inp con el cual se convierte todos los elementos de las redes en

formato SIG a ficheros Inp de SWMM para posteriormente hacer las simulaciones hidráulicas en este software.

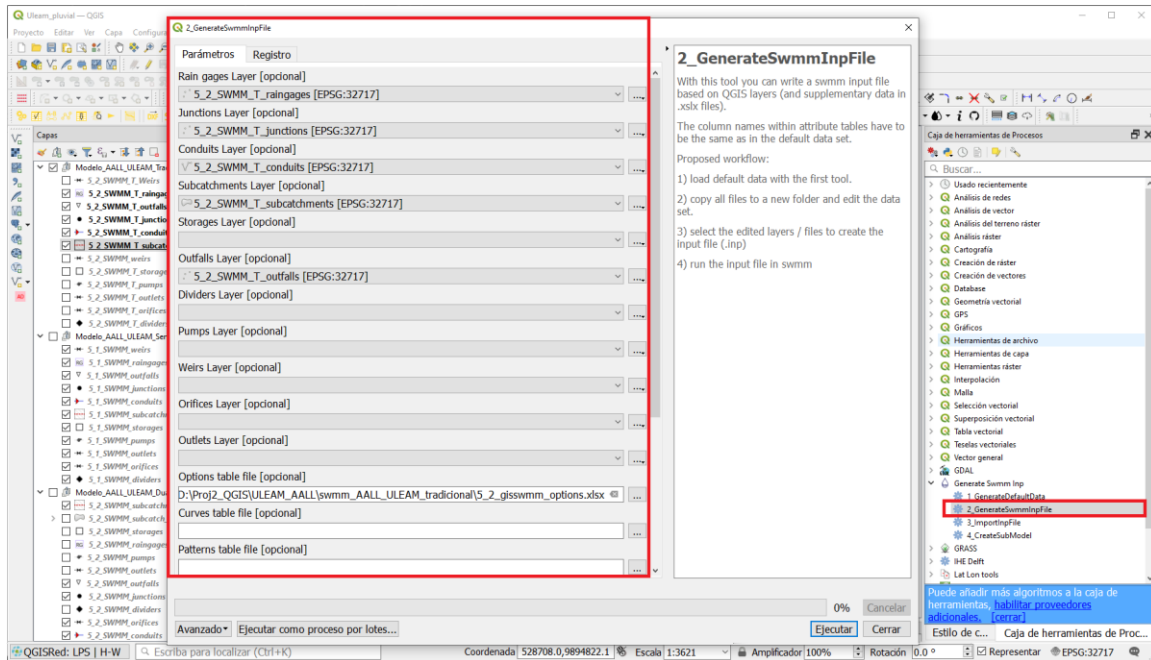


Figura 9: Exportación de modelo de red del SIG a SWMM.

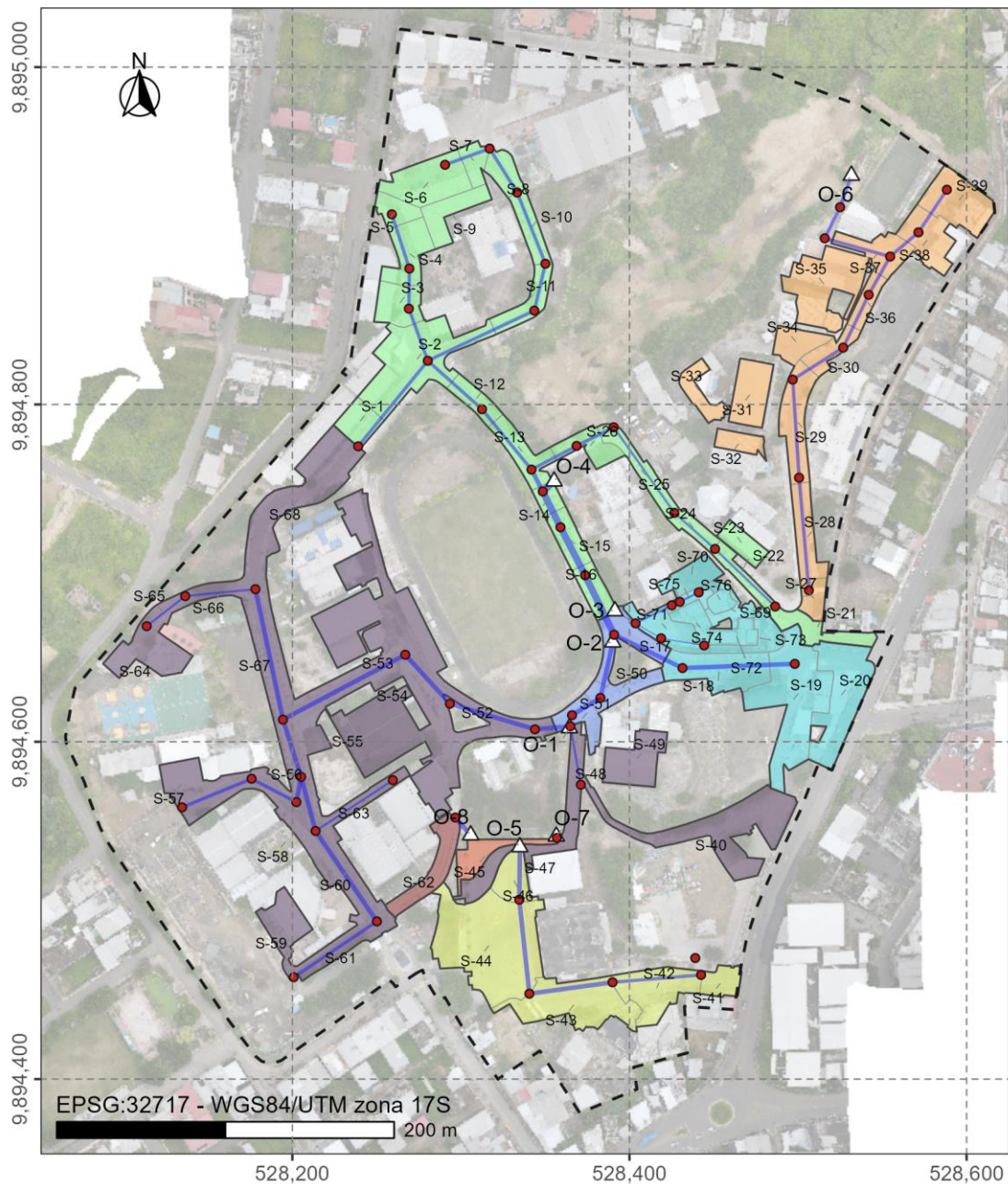
17.2.1 Modelo hidrodinámico en SWMM (Tradicional).

Este modelo fue construido definiendo grandes áreas de drenaje para cada pozo de la red, de tal forma que todo el escurrimiento que se genera en cada área de drenaje se asigna directamente a un pozo. Es sin lugar a dudas un modelo simple del sistema de AALL.

17.2.1.1 Subcuencas de drenaje.

En el mapa de la figura 10 se muestran las áreas de drenaje definidas en este modelo tradicional, los polígonos que comparten un mismo color tienen en cuenta las áreas de drenaje que drenan hacia un punto de descarga, de tal manera que por ejemplo las áreas de drenaje de color verde drenan hacia la descarga O-4, ver la leyenda. De igual forma se definen los 8 puntos de descarga

y los pozos con forma y colores diferentes. Finalmente se brida el código de cada subcuenca o área de drenaje.



Áreas asociadas a cada descargas

■ O-1	■ O-2	■ O-3	■ O-4
■ O-5	■ O-6	■ O-7	■ O-8

Conductos D(mm)

— 150	— 200
— 250	— 300
— 400	

Nodos

△ Descargas
● Pozos

Figura 10: Superficie de drenaje para cada descarga, modelo tradicional.

En la figura 11 se muestra el mapa del número de la curva CN de las áreas de drenaje.

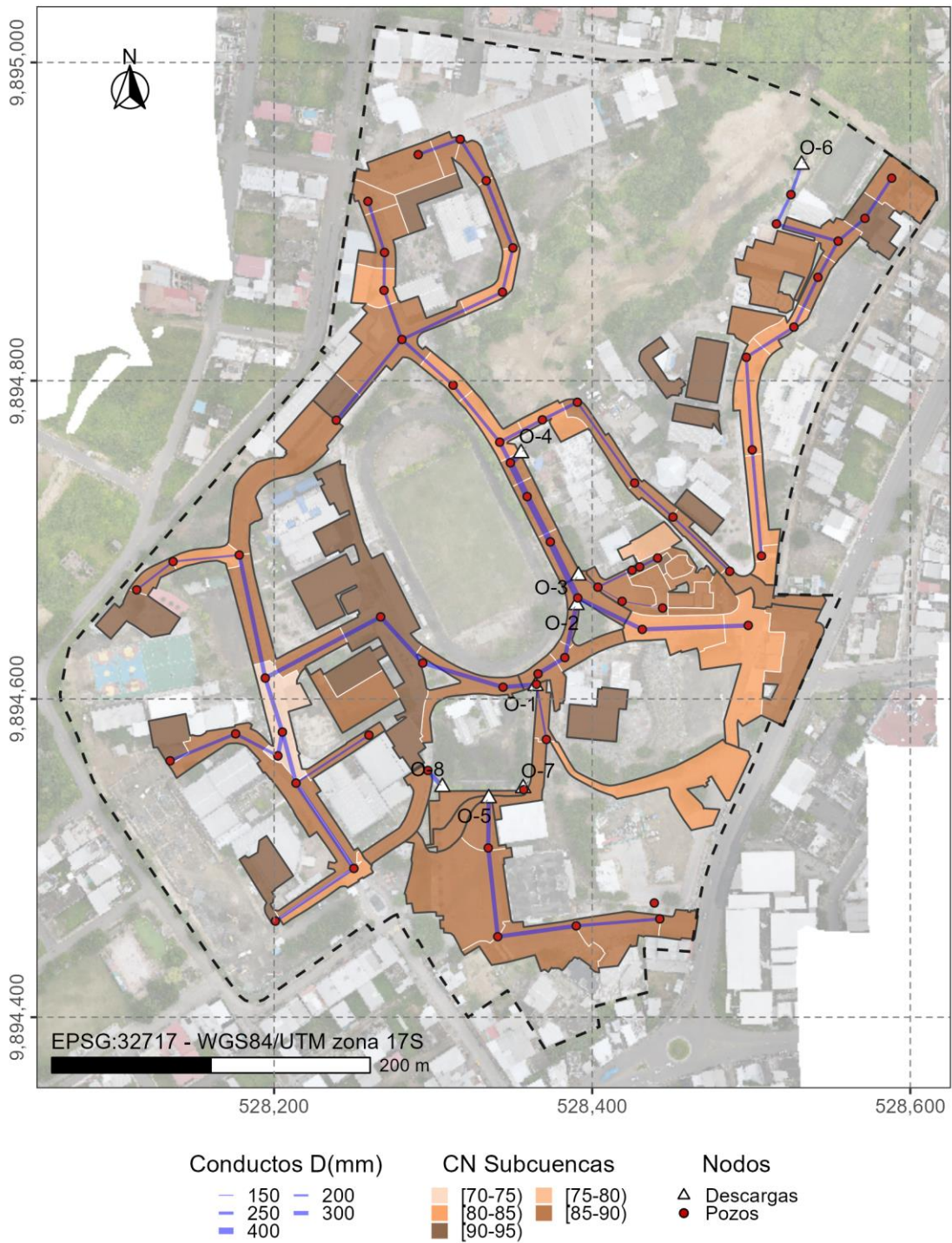


Figura 11: Valores de CN, modelo tradicional.

El número de la curva CN es uno de los parámetros más importantes de las áreas de drenaje ya que define la parte del pluviograma que generará escurrimiento superficial (lluvia neta).

17.2.1.2 Pozos de revisión.

En la tabla del anexo 3 se pueden observar los datos principales (desde el punto de vista hidráulico) de los pozos de revisión y en el mapa de la figura **12** se puede ver la ubicación, nombre de los pozos y especialmente su profundidad, véase que el diámetro de los elementos que simulan a los pozos indica la profundidad de los mismos, de tal manera que, por ejemplo, el pozo P39 tiene una profundidad que se encuentra entre los 4 y 5.5 m para precisar su valor se puede consultar la tabla del anexo 3. Por otra parte, en el mapa de la figura **12** también se puede visualizar las pendientes de las tuberías expresadas en % y representadas con el espesor de las tuberías, de tal forma que se puede observar que las pendientes oscilan desde los 0.2% a 16%, este mapa se puede ver en unión al modelo de elevaciones del terreno para corroborar las zonas con alta pendiente del terreno.

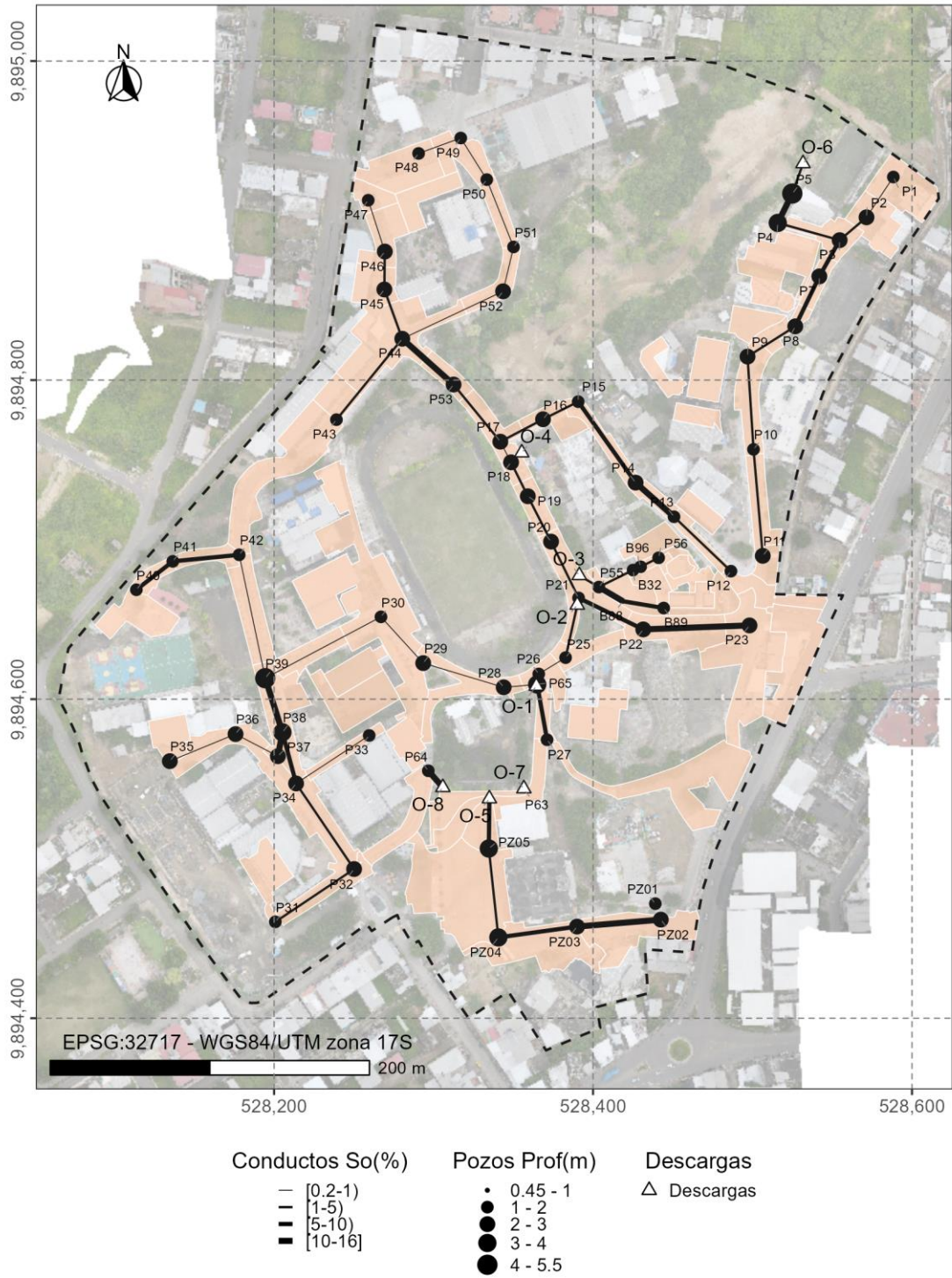


Figura 12: Profundidades de pozos y pendientes de conductos.

17.2.1.3 Conductos.

En los mapas de las figuras **10**, **11**, **12** ya se han venido mostrando los conductos con sus diámetros y pendientes, por tal motivo en este apartado solo se muestra la tabla ubicada en el anexo 4 donde se pueden constatar los principales datos desde el punto de vista hidráulico de los conductos. Con relación al coeficiente de fricción, para todos los conductos se emplea un valor n de Manning = 0.011.

17.2.1.4 Descargas.

Al igual que en el caso de los conductos, en los mapas de las figuras **10**, **11** y **12** ya se han ubicado los 8 puntos de descarga del sistema de AALL de la ULEAM Manta, por tal motivo en este apartado solo se muestra la tabla ubicada en el anexo 5 donde se pueden constatar los principales datos desde el punto de vista hidráulico de las descargas.

17.2.2 Modelo hidrodinámico en SWMM (semiDual).

La esencia de este modelo es la realización de áreas de drenaje más refinadas, que asuman de mejor manera el escurrimiento superficial. En este modelo se incluyen algunos conductos y pozos que permiten el transporte de flujo desde los techos de algunas edificaciones al sistema de drenaje principal (el tradicional), lo que no se tiene en cuenta en este modelo semidual es el tránsito de flujo por las calles y su eventual captación por sumideros que se conecten a los pozos.

17.2.2.1 Subcuencas de drenaje.

En el mapa de la figura **13** se muestran las áreas de drenaje definidas en este modelo semidual que por demás coinciden con las del modelo dual, al igual que como se explicó en la figura **10**, los polígonos que comparten un mismo color tienen en cuenta las áreas de drenaje que drenan hacia un punto de descarga. Si se hace una comparación entre el mapa de la figura **10** y el actual

pueden notarse algunas diferencias, la primera es que hay variación en las áreas de aporte ya que al realizar un modelo semidual o dual se genera una mayor y más precisa cantidad de áreas de drenaje y la segunda es la cantidad de áreas de drenaje entre los modelos, en el caso del modelo tradicional se tiene una cantidad de 76 mientras que en los modelos semidual y dual se tienen 1131, por tal motivo en el mapa de la figura **13** no se muestran los códigos de las áreas de drenaje.

A continuación, se presenta el mapa de CN de los modelos semidual y dual, ver la figura **14**. Este mapa se puede contrastar con su similar del modelo tradicional, ver figura **11** y se podrán detectar algunos cambios en los valores de CN debido a que en estos modelos semidual y dual se realiza una mejor discretización de las áreas de drenaje atendiendo a su uso de suelo.

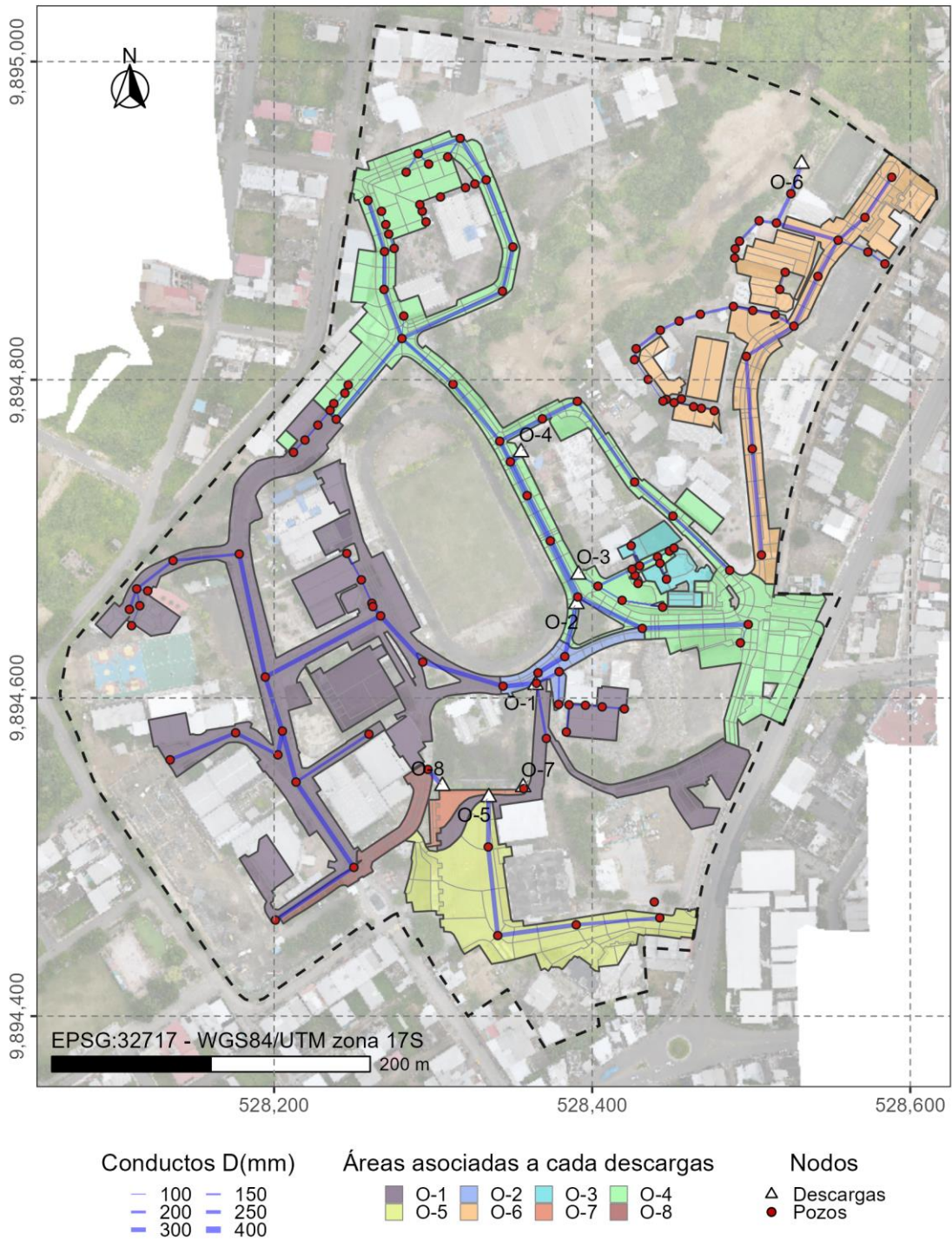


Figura 13: Superficie de drenaje para cada descarga, modelos semidual y dual.

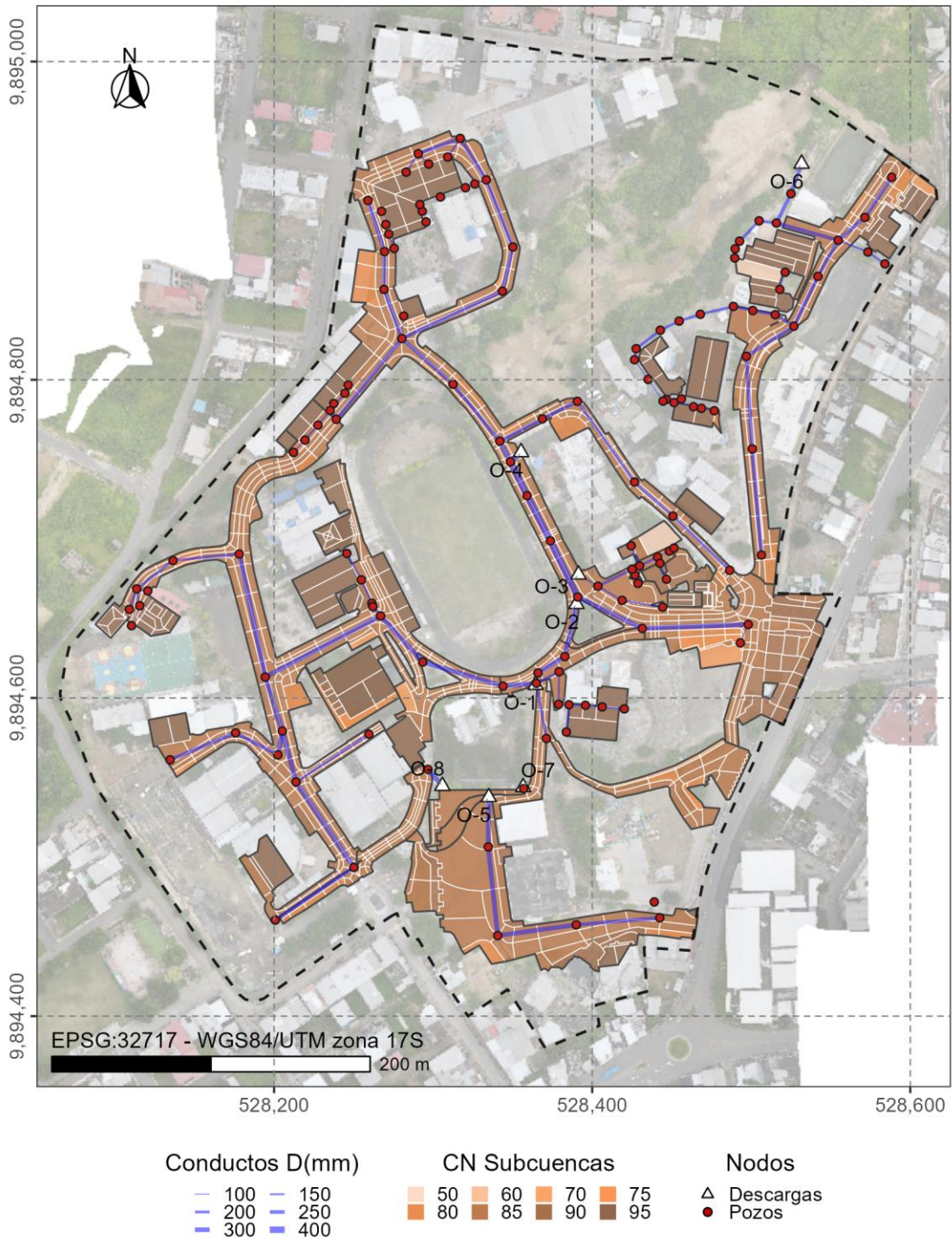


Figura 14: Valores de CN, modelos semidual y dual.

17.2.2.2 Pozos de revisión, conductos y descargas.

Para este modelo los pozos de revisión y conductos son prácticamente los mismos, solo se agregan unos pocos que permiten el transporte de flujo desde los techos de algunas edificaciones al sistema de drenaje principal (el tradicional). Con relación a las descargas estas son las mismas para todos los modelos.

17.2.3 Modelo hidrodinámico en SWMM (Dual).

El modelo dual se construye con las mismas áreas de drenaje que el modelo semidual, sin embargo, se crea una red de pozos y conductos a ambos lados de las calles que simulan el flujo por las calles, esto se logra gracias a las posibilidades que brinda SWMM para definir la sección transversal de las conducciones. Adicionalmente se modela la entrada del agua que circula por las calles a sumideros por medio de objetos de tipo orificios.

17.2.3.1 Modelación de sumidero para el modelo dual.

La modelación del efecto de los sumideros se realiza por medio de un objeto orificio, en la figura 15 a) se puede observar el tipo de sumidero que predomina en la red, en este caso es un sumidero combinado que vincula rejilla (en la calle) + ventana (hueco en la pared de la acera). En la figura 15 b) se muestra la rejilla típica existente en la red en la que cada uno de los 12 orificios tiene un área de 34.07 cm^2 , luego el área efectiva sería de 408.84 cm^2 . En el caso de la ventana, su longitud coincide con el largo del sumidero 45 cm y su alto de abertura es aproximadamente 9 cm , luego el área sería: 405.00 cm^2

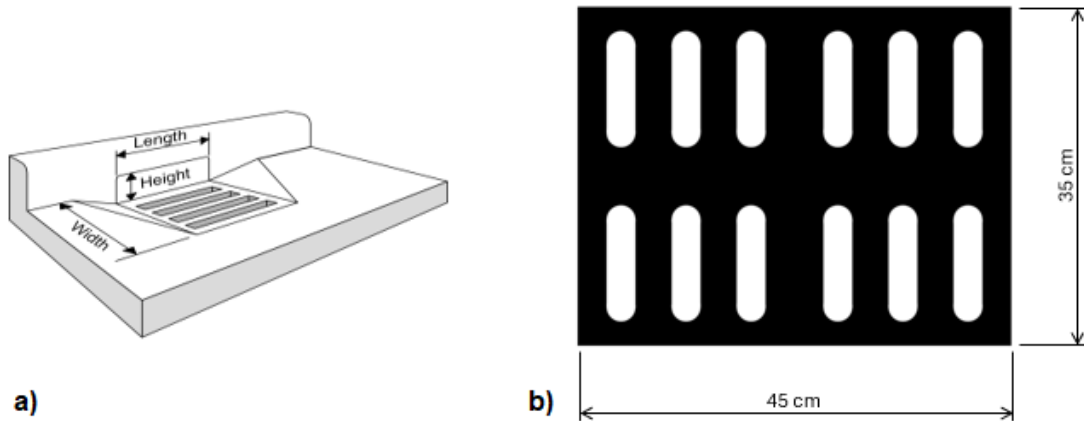


Figura 15: Sumideros existentes en el sistema de AALL de la ULEAM.

Para los efectos del modelo se decide emplear un orificio tipo de fondo *Bottom* y en tal sentido se debe definir un área neta por la cual pasaría el agua y decidiendo una geometría rectangular se definirían las dimensiones alto y ancho o *height* y *width* y se define un coeficiente de descarga que para estos orificios la literatura consultada plantea que varía entre 0.60 y 0.67, para el proyecto se decide emplear $C_d = 0.62$.

El área total efectiva del sumidero sería 408.84 cm^2 (rejilla) + 405.00 cm^2 (ventana) = 813.84 cm^2 .

El hecho de que las rejillas operen al 100% es solo teórico, lo natural es que se reduzca la capacidad de captación debido a basura y sedimento, en este caso se afectará esta área en un 50% quedando definitivamente un área efectiva de 408.84 cm^2 y al considerar rectangular esta área (una de las dos opciones que brinda el software) se fija un alto de 25 cm y como resultado se tiene un ancho de 16.354 cm .

En la figura 16 se muestra la inclusión de orificios para considerar la entrada de agua de las calles a los sumideros, en el modelo dual se definieron 106 orificios. La figura 16 es una captura

del proyecto realizado en QGIS para el empleo del complemento *Generate Swmm Inp*, véase que se toma como ejemplo el orificio con código **OR-7** este está definido entre los pozos *PD-33* y el *PD-33A*, en el anexo 3 se presentan los pozos existentes de la red y véase que su código solo tiene la letra *P*, en el caso de los pozos que unen a los orificios comienzan por *PD* que significan Pozos de drenaje Dual, son en efecto pozos ficticios que su única función es permitir que se puedan definir los objetos orificios, lo mismo ocurre con los conductos, los que tiene el código del tipo *C-35* por ejemplo, son conductos de la red existente, mientras que los que tienen código del tipo *CD-45* como el que se muestra en la figura **16**, esos son conductos del sistema Dual, es decir son los que se emplean para simular la mitad de las calles, también se definen los llamados tirantes que son las tuberías que conectan el sumidero con el pozos, en el caso de la figura **16** se muestra el tirante *T-5*. finalmente, véase en la tabla de atributos de la figura **16** los valores del coeficiente de descarga que *Generate Swmm Inp* lo maneja con la variable *Qcoeff*, la forma definida como rectangular cerrada *RECT_CLOSED* en la variable *XsectShape* y las dimensiones de alto y ancho.

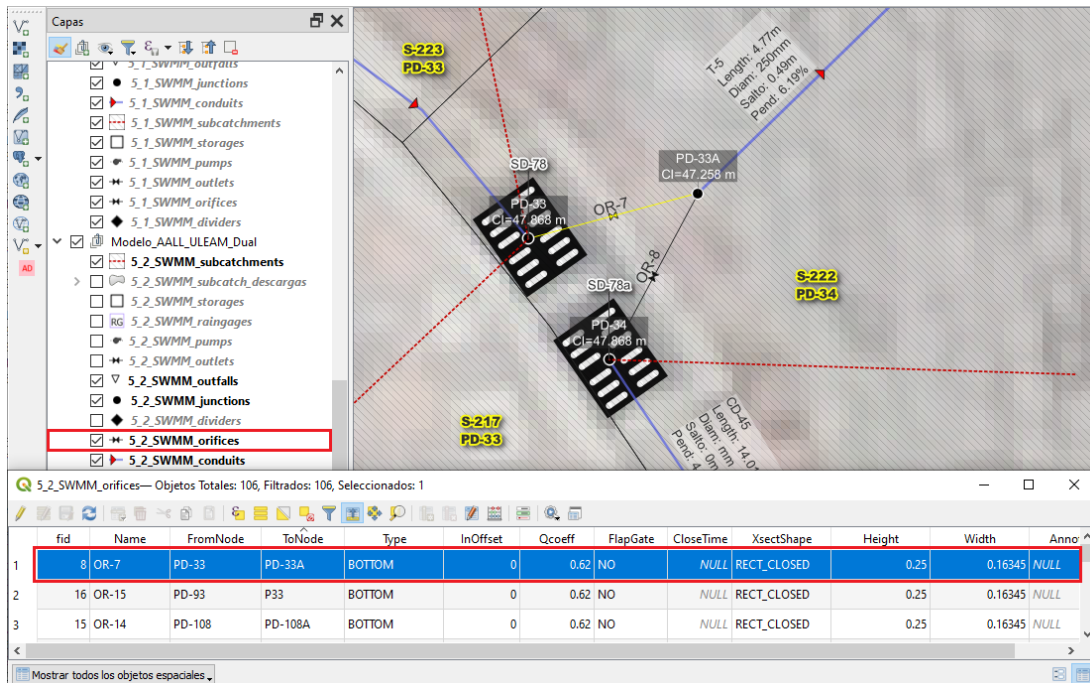


Figura 16: Definición de orificios para considerar sumideros en el modelo dual.

17.2.3.2 Modelación de las calles para el modelo dual.

Este es un punto fundamental para la definición del modelo dual, en la figura 17 se muestra los perfiles a ambos lados de una de las calles de la ULEAM que tiene un ancho de 3.6 m luego la mitad de la calle tiene un ancho de 1.8 m, también se muestra debajo las tablas con las cuales se realiza el perfil, así como los datos de los coeficientes de fricción de Manning. Esta figura 17 pertenece a el software SWMM, sin embargo, en el flujo de trabajo considerado en *Generate Swmm Inp* toda esta información se puede entrar en un fichero de extensión *.xlsx y esto cobra más relevancia cuando en el caso de la ULEAM existen calles con diversos anchos, ver esta información en el anexo 6.

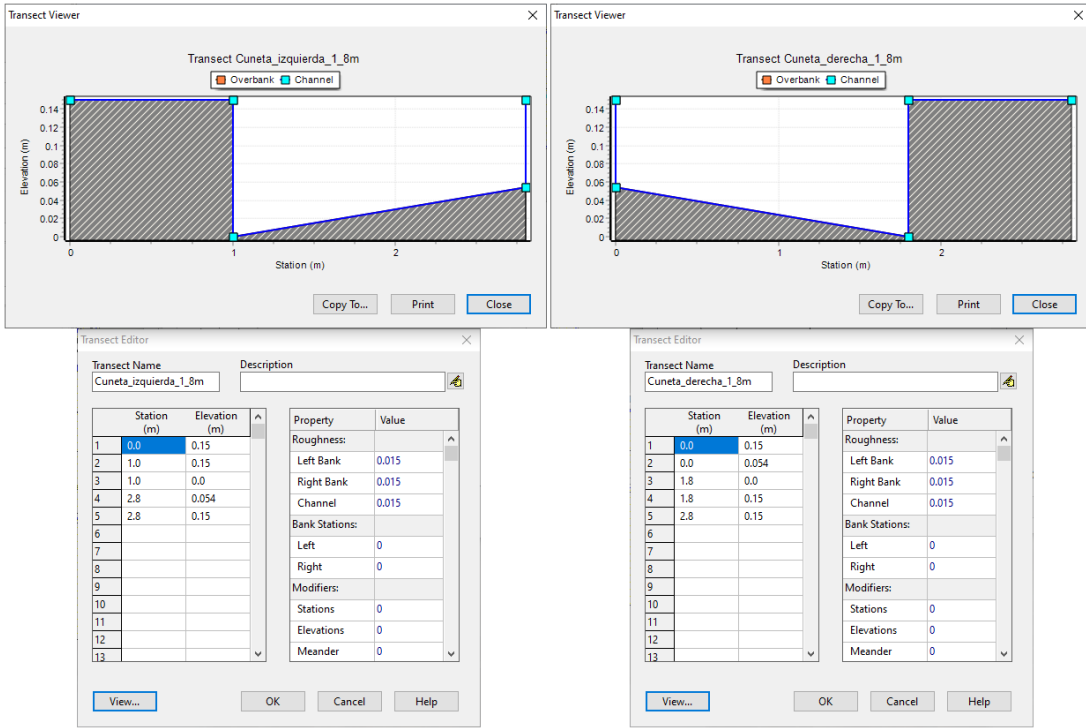


Figura 17: Definición de calles en el modelo dual.

En el mapa de la figura 18 se muestra con líneas de color rojo objetos de tipo *conductos* que representan las mitades de las calles y que se incorporan al modelo dual.

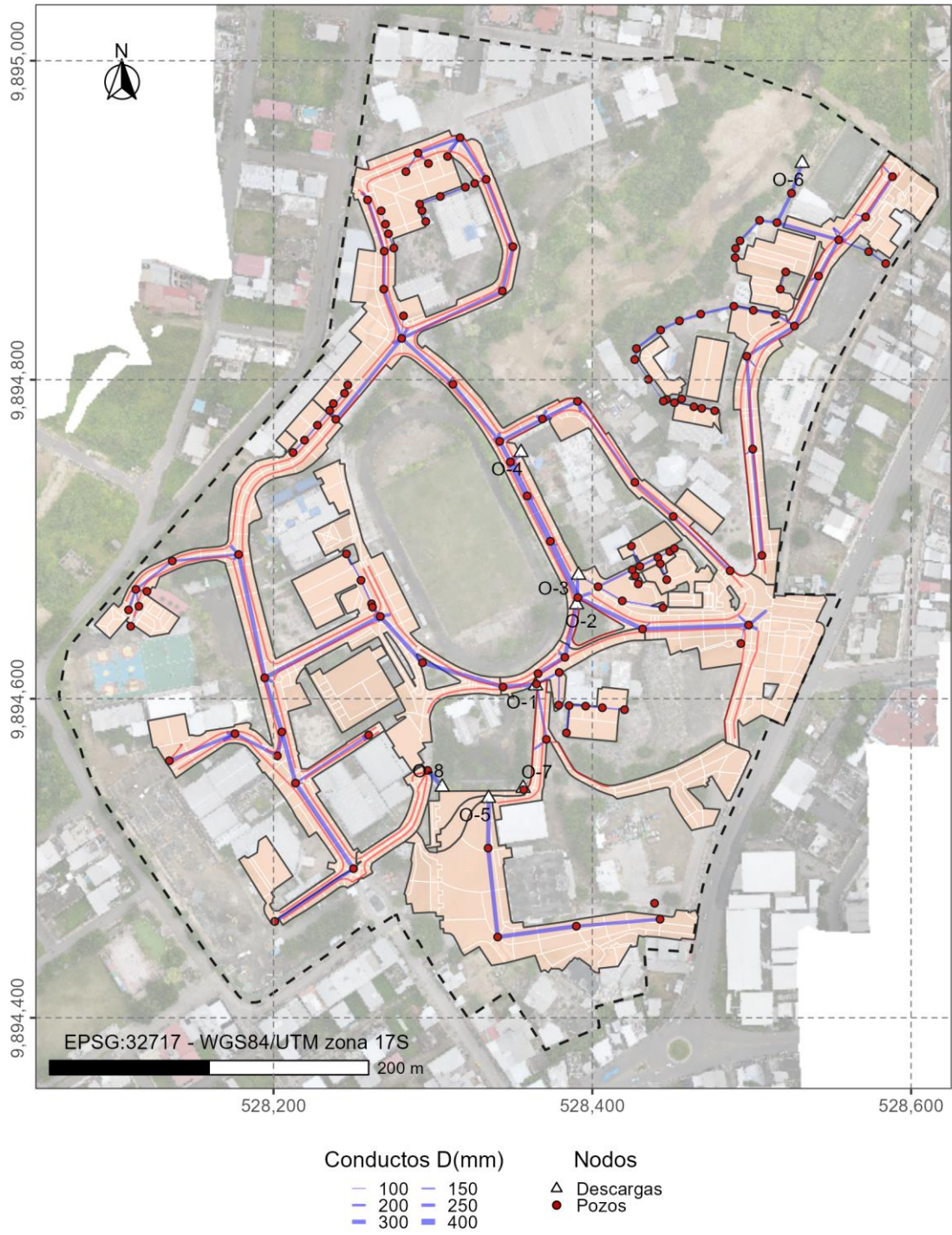


Figura 18: Modelo de red del sistema dual creado en el GIS.

17.2.4 Proyecto SIG del sistema de AALL de la ULEAM Manta.

La fase culminante de la metodología consistió en la consolidación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) bajo el entorno QGIS, diseñado para actuar como la interfaz de gestión, visualización y auditoría de los resultados hidrodinámicos. Este proyecto centraliza la cartografía del campus y establece un protocolo de gestión de activos basado en la integridad topológica y la transparencia de datos multimedia, es en otras palabras una base para manipular la infraestructura de datos espaciales de la ULEAM.

17.2.4.1 Arquitectura de Datos y Estandarización Cartográfica.

La base de datos geoespacial se estructuró mediante archivos vectoriales de formato Shapefile (.shp) y los complementos de post-procesamiento. Para la transferencia de esta información hacia los niveles de planificación institucional, se diseñó una infraestructura de salida gráfica organizada bajo la siguiente jerarquía, al cumplir con las escalas de detalle requeridas para este tipo de planos:

- **Formatos A1 y A2:** Escalas 1:1000 y 1:200 orientadas a la visualización de la red primaria y delimitación de subcuencas.
- **Formatos A3:** Escala 1:100, enfocada en el mantenimiento e inventario, esta lámina presenta datos críticos como la Cota Invertida (CI), profundidad de cámara (h), longitudes, diámetros y salto hidráulico, para planos de plantas, perfiles y detalles.

En la figura **19** se muestra un ejemplo de estos planos donde se integran parámetros dinámicos para la estandarización de planos de la red de AALL.

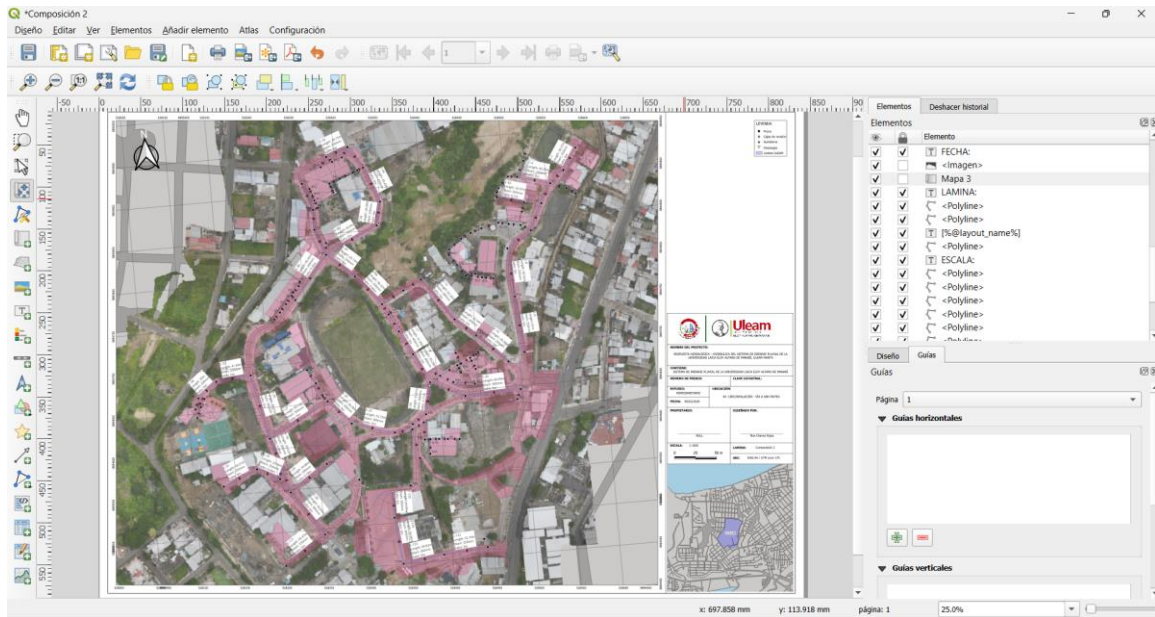


Figura 19: Configuración de láminas técnicas en el Layout de QGIS.

17.2.4.2 Visualización de perfiles longitudinales con TUFLOW.

Posterior al procesamiento de datos en el motor de cálculo EPA SWMM, se implementó el complemento TUFLOW en QGIS como plataforma de post-procesamiento para gestionar, manipular y presentar datos, con el fin de potenciar la interpretación de resultados del modelo de la red de drenaje dentro de QGIS. El núcleo de esta fase es la aplicación de la herramienta 1D Integrity Tool. Esta herramienta transforma resultados tabulares del modelo en una representación gráfica de alta precisión que facilita el análisis y control de integridad de los modelos 1D.

La integración en QGIS permite ejecutar una auditoría topográfica de la red, asegurando la continuidad hidráulica y la consistencia geométrica de los colectores, al automatizar la generación de perfiles longitudinales, el software superpone la rasante del terreno con la cota solera de la tubería, facilitando la verificación inmediata de que las pendientes de diseño cumplan con los límites normativos de velocidad y autolimpieza.

Por medio de la generación automática de Banderas de Continuidad (Continuity Flags), el sistema identifica y alerta visualmente sobre transiciones abruptas entre elementos. Un caso fue el nodo P44, donde la herramienta permitió cuantificar y visualizar una transición crítica en la sección hidráulica. El análisis gráfico mostró la adaptación de la trayectoria del flujo a una reducción significativa del área (de $0.16 m^2$ a $0.05 m^2$), dicha variación se modelaba sin comprometer la integridad numérica ni la continuidad física del flujo. Lo que puede generar un cuello de botella que generaría restricción al flujo.

La interfaz interactiva del perfil permite consultar parámetros hidráulicos y geométricos de cada elemento (tipo, ID, diámetro, cota de entrada/salida), al convertir a la plataforma en una herramienta de inspección técnica, lo que permite a equipos de supervisión, como la Dirección de Infraestructura, Obras, Patrimonio y Medioambiente - ULEAM, realizar revisiones rápidas e identificar anomalías geométricas, ver la figura **20**, donde se observa en acción la herramienta 1D Integrity Tool - Flow Trace, véase la relación entre la planta de la red y el perfil longitudinal pudiéndose inspeccionar cotas de solera, pendientes y la validación de la continuidad hidráulica mediante banderas de alerta técnica.

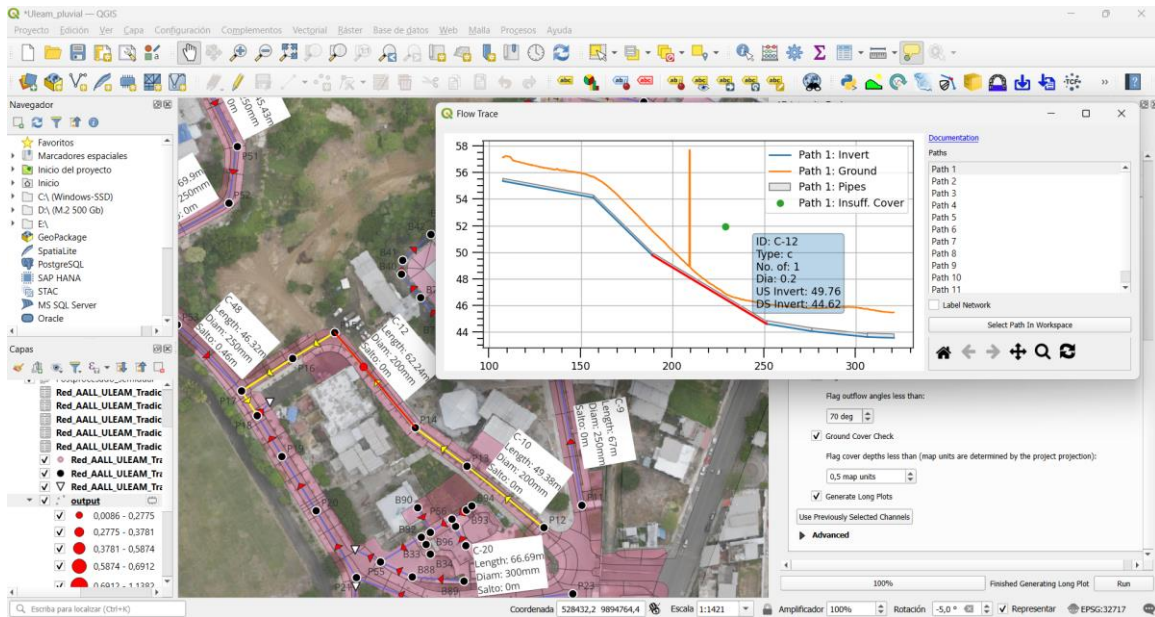


Figura 20: Interfaz de visualización dinámica 1D Integrity Tool-Flow Trace.

A continuación, se muestra la tabla 3

Tabla 3: Interpretación de perfiles longitudinales con el visor de TUFLOW .

Nro	Elemento en el gráfico	Representa	Información que proporciona
1	Líneas Horizontales	Los conductos o canales 1D (tuberías, cunetas).	La longitud y pendiente del conducto. Su posición vertical puede indicar la elevación.
2	Símbolos de Color	Banderas de Continuidad (Continuity Flags).	Punto Naranja: Advertencia de área (Area Check). Otros colores: Otros tipos de error.
3	Etiquetas de Texto	Identificadores de los elementos.	Muestran el ID del canal (se activan con "Label Network").
4	Leyenda (Legend)	Explicación de los símbolos usados.	Define el significado de cada color, forma de bandera y estilo de línea.
5	Múltiples Líneas/Ramas	Diferentes trazados de flujo.	Cada ruta de flujo única aguas arriba se dibuja como una "rama" (Path) en colores distintos.

17.2.4.3 Vinculación de activos multimedia.

La tabla de atributos del SIG se enriqueció mediante la vinculación de hipervínculos con rutas relativas hacia el registro técnico de cada nodo, al integrar cotas , profundidades y el respaldo fotográfico en el lugar, se consolidó un inventario geoespacial que permite la inspección técnica remota, esta sistematización documental optimiza la toma de decisiones, permitiendo evaluar el estado de los pozos de revisión y planificar mantenimientos preventivos sin requerir desplazamientos adicionales al campus.

Mediante la gestión de rutas relativas y utilizando la variable (*project_folder?*), se integraron los esquemas técnicos (digitalizados en CAD). Garantizando la portabilidad del paquete de datos, ya que si la jerarquía de carpetas del proyecto (.qgz) y la carpeta del repositorio de documentos permanecen sin cambios, los enlaces permanecerán funcionales.

La visualización de estos activos se optimizó mediante la función nativa de Avisos del Mapa y sintaxis HTML para automatizar la visualización de la información. Al desplazar el cursor sobre un sobre un nodo, el sistema interpreta la ruta almacenada y muestra una interfaz que permite el acceso directo al esquema técnico de ese elemento en formato *.pdf.

En la figura 21 se muestra la ventana emergente con el identificador ID del nodo sobre el cual se encuentra el cursor y en color rojo el botón de acceso a la ficha técnica de dicho elemento que se muestra a continuación.

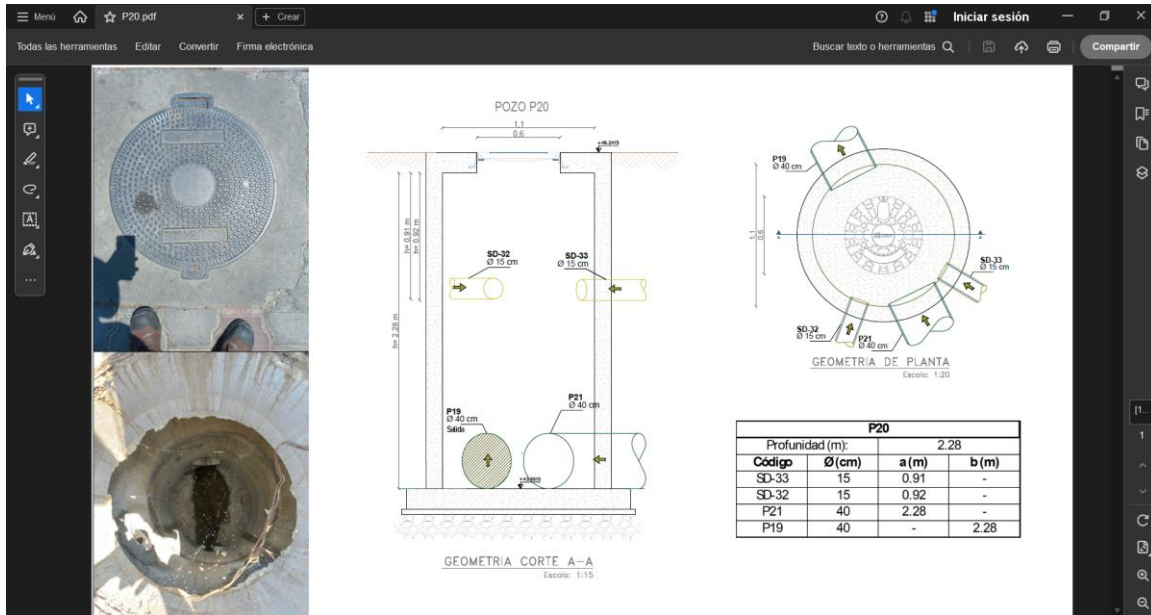


Figura 22: Ficha técnica de los objetos del sistema AALL de la ULEAM Manta.

17.3 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.

La arquitectura hidrodinámica desarrollada en este apartado valida la efectividad de integrar QGIS con el complemento Generate Swmm Inp. Más que una simple digitalización, este flujo de trabajo permitió una discretización espacial rigurosa donde la asignación del Número de Curva (CN) responde a la heterogeneidad real del suelo en la ULEAM, este enfoque supera la visión del modelo 1D convencional, el cual ignora la física de la interfaz superficie-alcantarillado al asumir una entrada de flujo instantánea, sin considerar las restricciones hidráulicas de los sumideros.

Se concluye que la modelación del sistema mayor (calles y cunetas) y el sistema menor (tuberías y pozos) de forma acoplada bajo el esquema dual representa con mayor fidelidad la realidad operativa de la ULEAM. La inclusión de objetos tipo “orificio” para simular sumideros y la definición de secciones transversales específicas para las calzadas permiten capturar fenómenos

complejos, como el flujo por calzada cuando la capacidad de los conductos es superada. Este nivel de detalle técnico es indispensable para identificar no solo si la red fallará, sino también la dinámica de propagación de los excesos de agua sobre la superficie del campus.

La integración de perfiles longitudinales dinámicos y el inventario multimedia dentro del SIG convierte a esta base de datos en una plataforma real para la gestión de activos, el uso de funciones como Map Tips en QGIS agiliza la supervisión técnica, permitiendo consultar el estado de pozos y colectores de forma instantánea, más allá de los alcances de esta investigación, la arquitectura geoespacial aquí planteada queda como un inventario escalable y listo para auditorías o futuras expansiones de la red pluvial en el campus universitario.

18 CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

18.1 Opciones de simulación.

Todas las simulaciones se realizaron en período extendido para lo cual se consideró la asignación del pluviograma de lluvia de 2 horas de duración y período de retorno $T_r = 10$ años que en principio está obtenido para intervalos de 5 min, sin embargo, en SWMM se define como paso de tiempo 1 min. En el anexo 7 se muestran las diversas pestañas de la ventana de Opciones de Simulación donde se pueden constatar todas las opciones seleccionadas.

18.2 Simulación del modelo hidrodinámico (tradicional).

18.2.1 Análisis de los conductos.

En el anexo 8 se presenta una tabla con los resultados de la simulación para los conductos, aquí se podrán constatar los caudales y velocidades máximas que se producen en los conductos $Q_{m\acute{a}x}$ (l/s) y $V_{m\acute{a}x}$ (l/s), el instante en que se obtienen estos caudales máximos que generalmente es 1 hora y 10 min de iniciada la lluvia, $TQ_{m\acute{a}x}$ (H:M), así como la relación entre el caudal máximo y el caudal a tubería llena $Q_{m\acute{a}x}/Q_o$ y finalmente la relación entre el tirante obtenido en la tubería cuando circula el caudal máximo y el diámetro de la tubería $y_{m\acute{a}x}/D$.

En la figura 23 se pueden observar los caudales obtenidos en cada conducto de la red para el instante de máximo caudal, obsérvese que varios de los conductos tienen caudales que superan los 100 l/s, véase el tramo definido por los pozos P30 al O-1, así como del P23 al O-4, del P44 al O-4 y del P8 al O6.

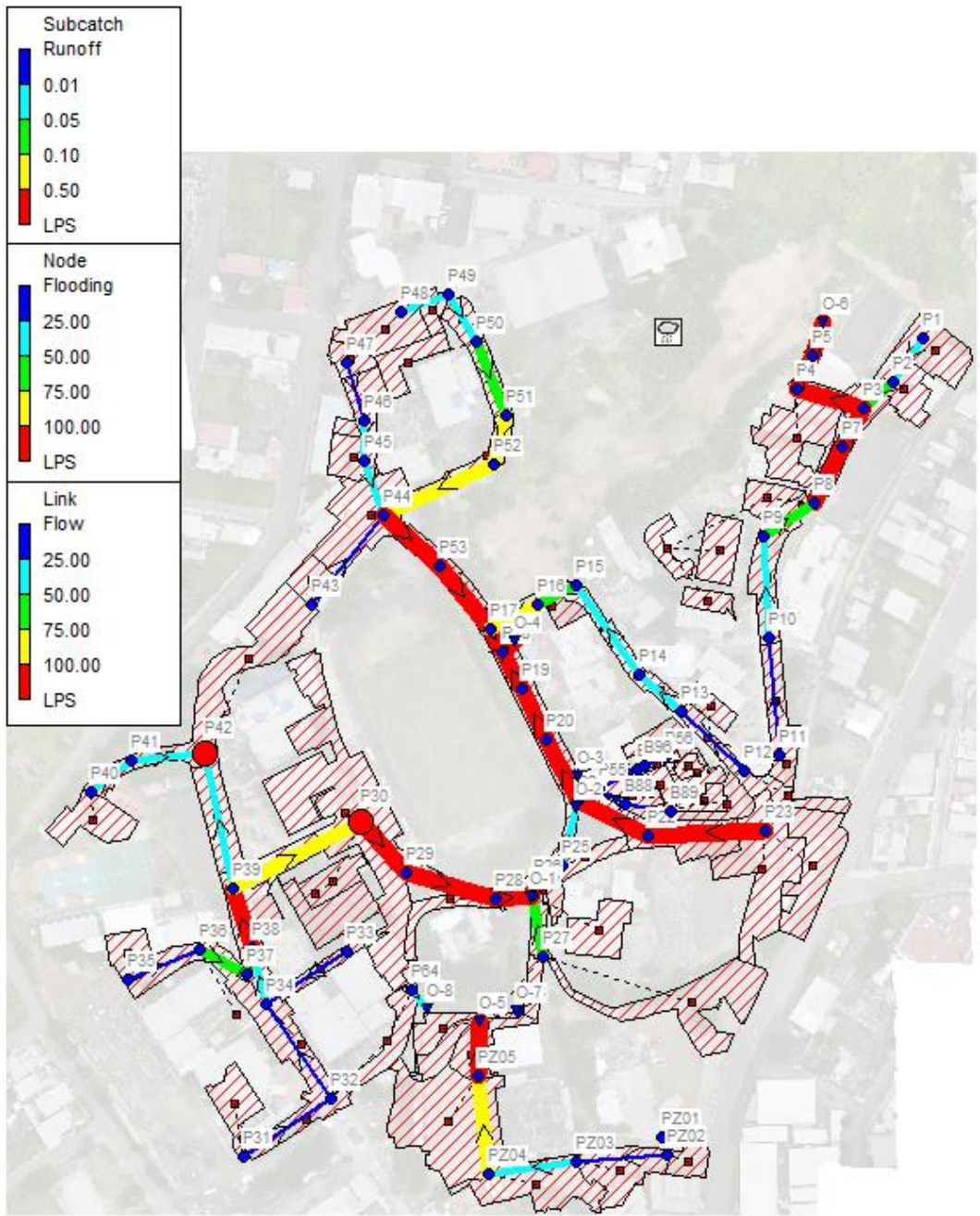


Figura 23: Simulación modelo tradicional, caudal máximo en los conductos.

En la figura 24 se observan los valores de la variable *Capacity* que no es más que la relación entre el nivel de agua en el conducto y su diámetro, es decir y/D , en este caso $y_{\text{máx}}/D$. Véase que los tramos definidos por los pozos P42 al O-1, del P48 al O-4, del P20 al O-4, del P15 al O-4 y del P-1 al O-6 entran en presión en el instante de máximo caudal.

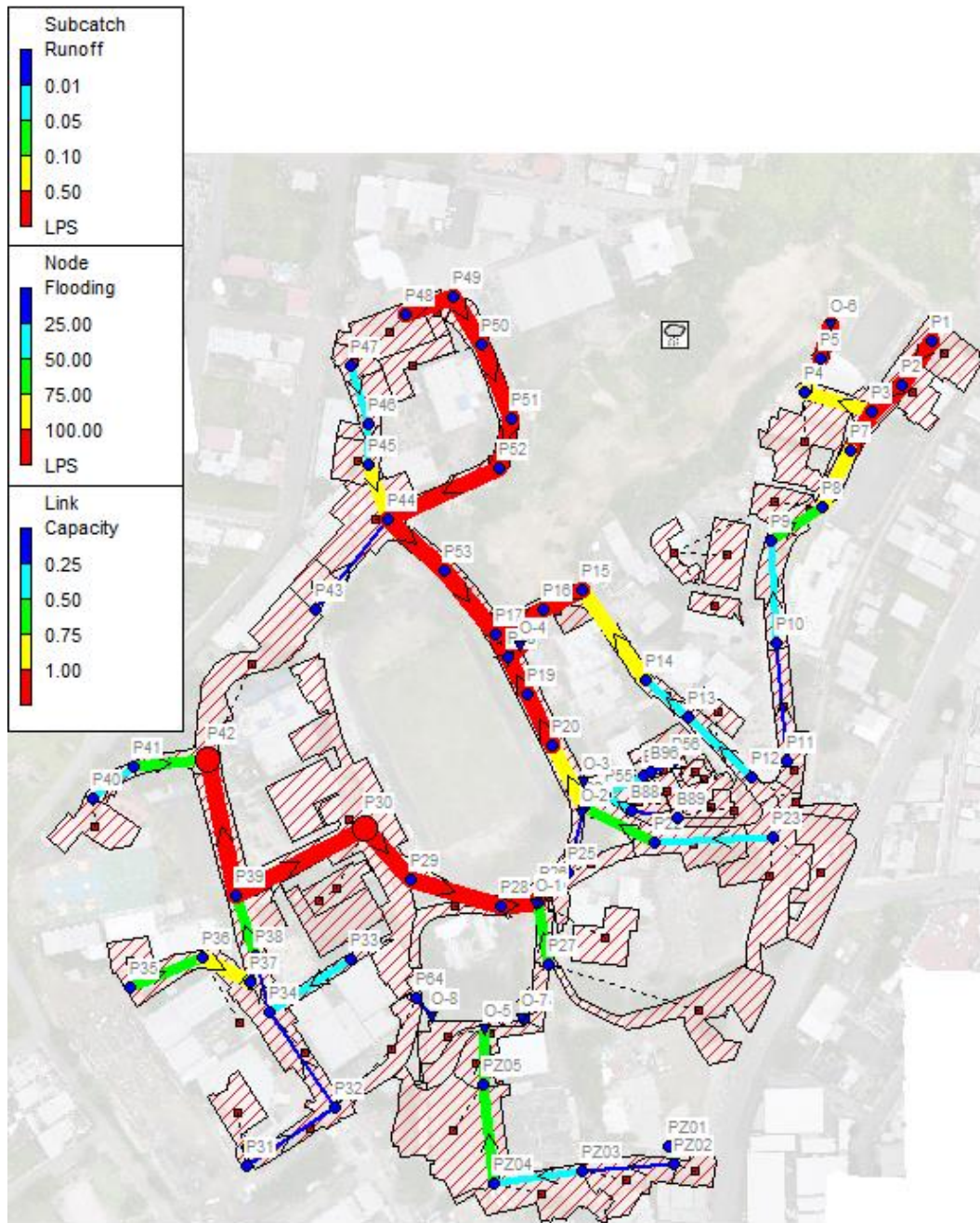


Figura 24: Simulación modelo tradicional, capacidad de llenado máxima en los conductos.

Esto ocurre porque en todos estos tramos las pendientes son pequeñas y el diámetro no puede asumir los caudales pronosticados, véase esta figura 24 con la figura 12.

En la figura 25 se muestran las velocidades máximas en las tuberías.

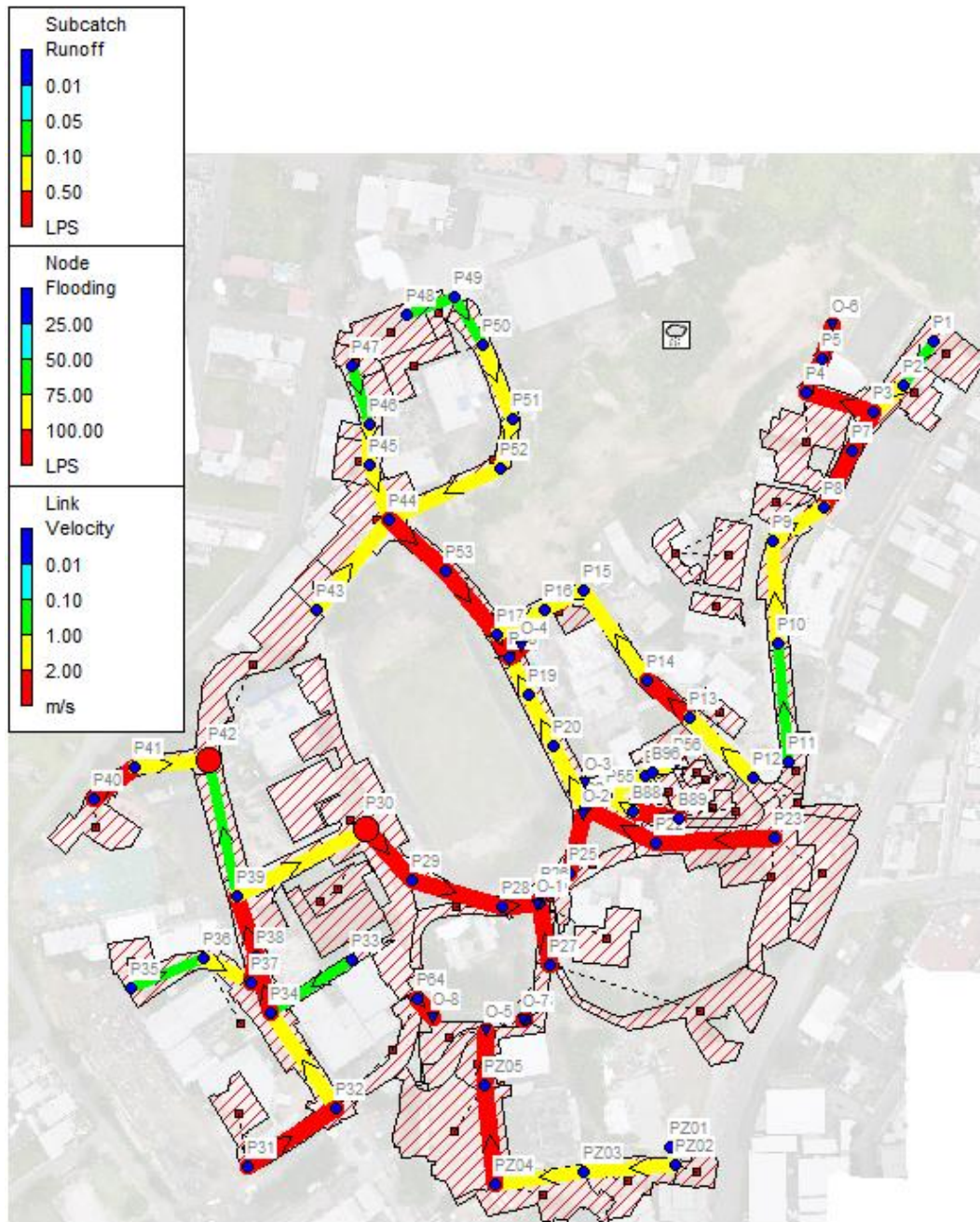


Figura 25: Simulación modelo tradicional, velocidad máxima en los conductos.

Véase que los conductos en los que las velocidades exceden los 2 m/s coinciden con los tramos de mayor caudal y/o mayor pendiente.

18.2.2 Análisis de los pozos.

Con relación a los pozos, en las figuras **23**, **24** y **25** se ubica la variable *Flooding* que representa la cantidad de agua que sale del pozo hacia la superficie cuando este entra en presión, en este caso se vincula el tamaño de los nodos que representan a los pozos con este caudal, en tal sentido sobresalen los pozos P30 y P42 con caudales de 140.51 l/s y 157.20 l/s, debido a su ubicación y a la cantidad de caudal que reciben estos son los pozos más proclives a sufrir de este fenómeno, aunque también existen reportes en esta simulación para los siguientes pozos, P1 = 18.24 l/s, P2 = 0.62 l/s, P15 = 13.62 l/s, P39 = 66.53 l/s, P48 = 13.32 l/s, P49 = 9.88 l/s, P53 = 13.37 l/s. Una característica que se ha definido en este modelo tradicional es la de no permitir que el agua que sale por los pozos vuelva a entrar a los mismos

En la figura **26** se muestran dos perfiles de tramos importantes de la red el primero desde el pozo P40 a la descarga O-1 y el segundo del pozo P48 a la descarga O-4. Aquí se puede corroborar los pozos que entran en presión como se había mencionado con anterioridad.

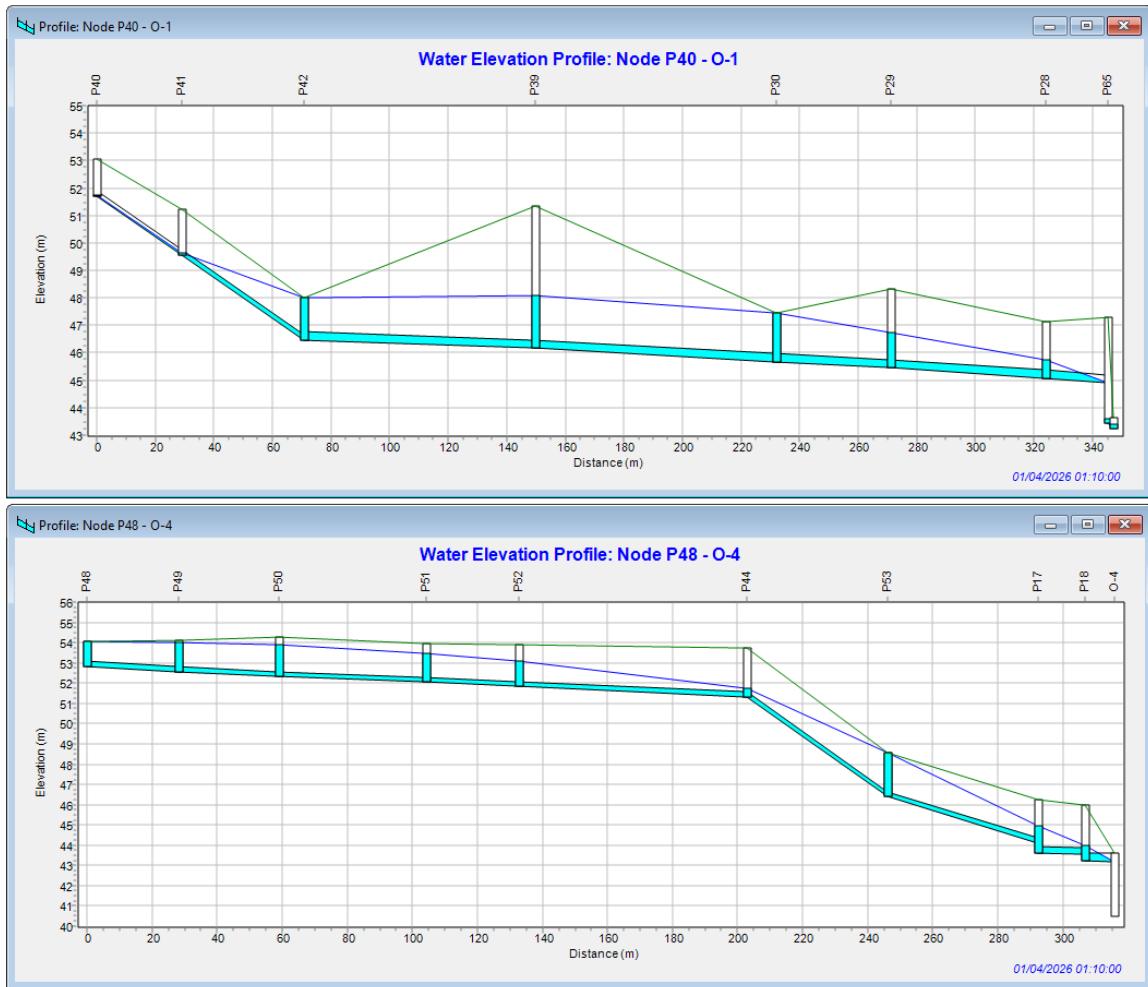


Figura 26: Perfiles de tramos importantes de la red, modelo tradicional.

18.3 Simulación del modelo hidrodinámico (semidual).

18.3.1 Análisis de los conductos.

En la figura 27 se puede observar los caudales obtenidos en cada conducto de la red para el instante de máximo caudal, obsérvese que como sucedía en el modelo tradicional aquí también varios de los conductos tienen caudales que superan los 100 l/s y la mayoría son los mismos que en el modelo tradicional, véase los tramos definidos por los pozos P44 al O-4, P30 al O-1, el conducto que sale del pozo P23 y e que le sigue ya no tienen un caudal tan elevado y esto ocurre

porque la distribución de áreas de drenaje en los modelos semidual y dual se realiza de una manera más discretizada, más precisa.

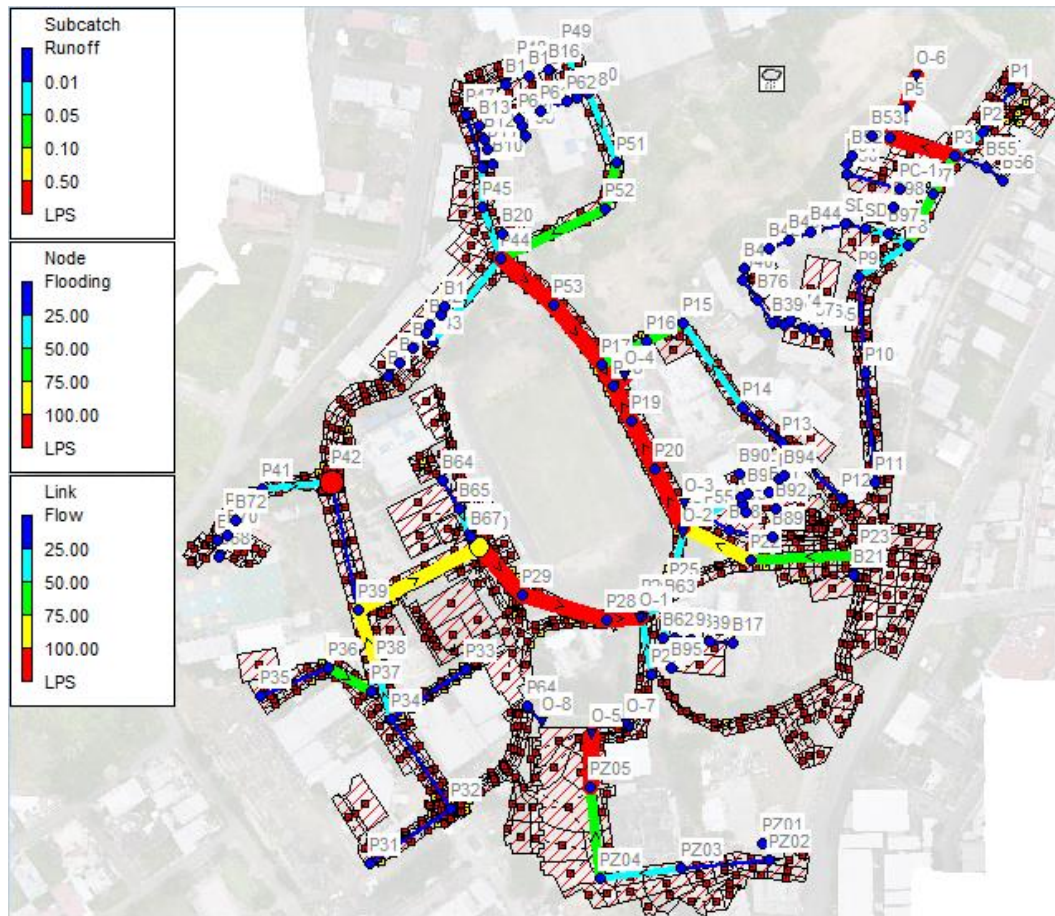


Figura 27: Simulación modelo semidual, caudal máximo en los conductos.

En la figura 28 por otra parte se observan los valores de la variable *Capacity*, es decir y/D , en este caso $y_{m\acute{a}x}/D$. Si se compara con su similar del modelo tradicional a simple vista no hay mucha diferencia, aunque aqu\u00ed hay una cierta disminuci\u00f3n de las tuber\u00edas que trabajan a presi\u00f3n.

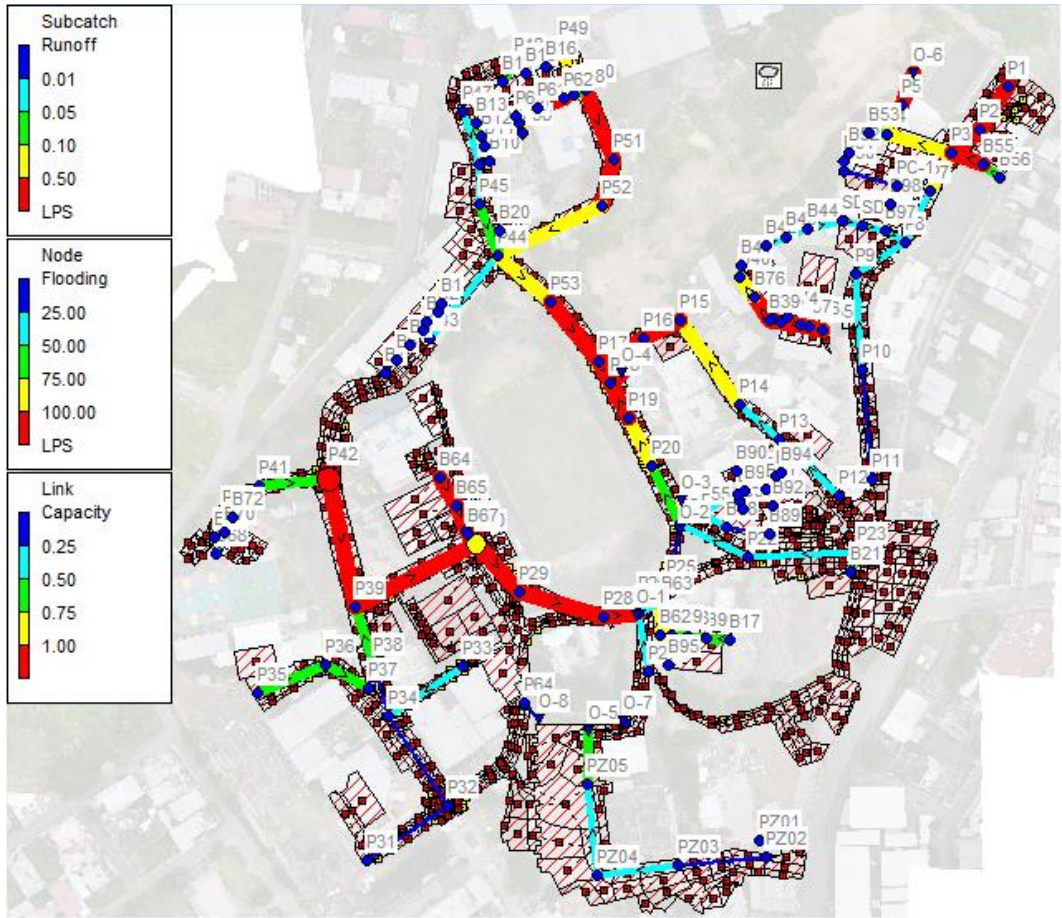


Figura 28: Simulación modelo semidual, capacidad de llenado máxima en los conductos.

En la figura 29 se muestran las velocidades máximas en las tuberías, véase que los conductos en los que las velocidades exceden los 2 m/s coinciden con los tramos de mayor caudal y/o mayor pendiente.

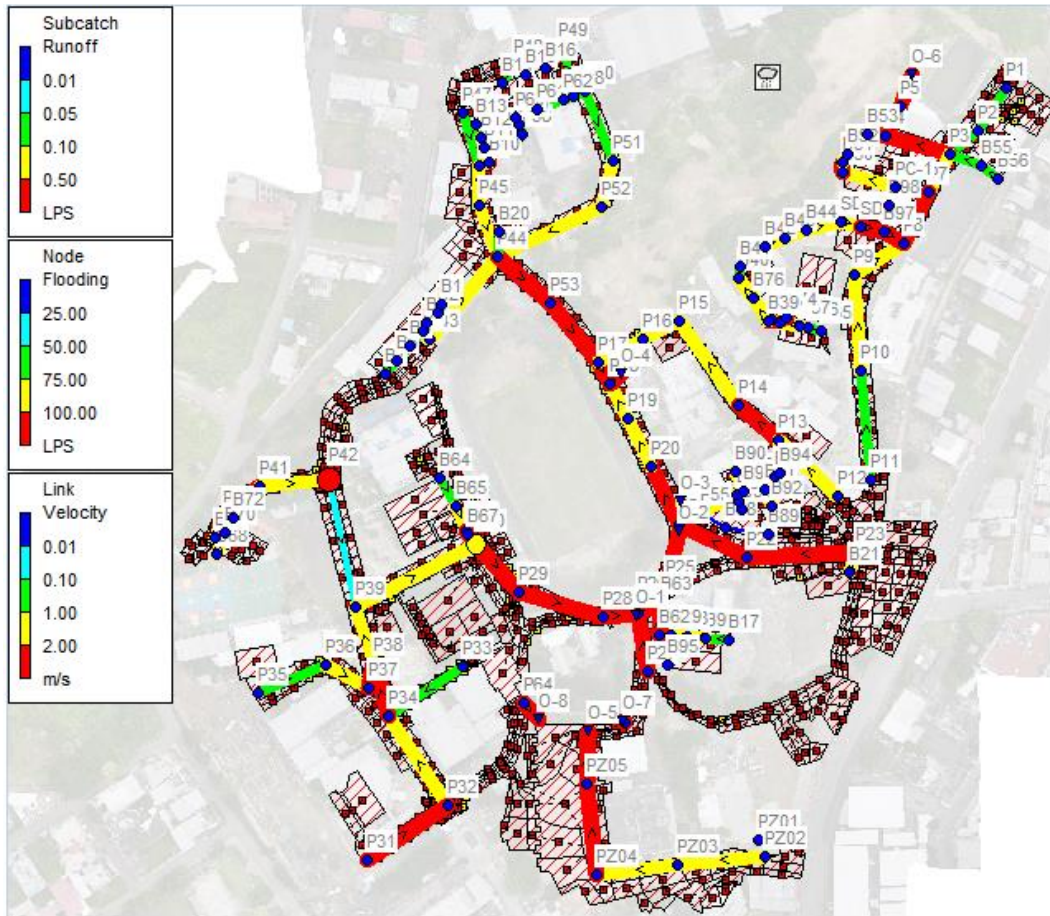


Figura 29: Simulación modelo semidual, velocidad máxima en los conductos.

18.3.2 Análisis de los pozos.

Con relación a los pozos, en las figuras 27, 28 y 29 se ubica la variable *Flooding* que representa la cantidad de agua que sale del pozo hacia la superficie cuando este entra en presión, aquí también se vincula el tamaño de los nodos que representan a los pozos con este caudal, en este caso los pozo P30 y P42 sin dudas por los que sale más caudal bajaron a 94.46 l/s y a 118.59 l/s respectivamente, de ahí también aparecen los siguientes pozos, P1 = 15.97 l/s, P2 = 10.28 l/s, P15 = 13.93 l/s, P16 = 9.88 l/s, P30 = 94.46 l/s, P39 = 69.07 l/s, P53= 18.25 l/s, B39 = 24.24 l/s. En este modelo también se decide no permitir que el agua que sale por los pozos vuelva a entrar a los mismos ya que no se están considerando los sumideros.

Los perfiles en los mismos tramos que se mostraron en el modelo tradicional son prácticamente iguales, lo cual mejora bastante las presiones en el tramo de P48 a O-4.

18.4 Simulación del modelo hidrodinámico (dual).

18.4.1 Análisis de los conductos.

En la figura 30 se puede observar los caudales obtenidos en cada conducto de la red para el instante de máximo caudal, obsérvese que como sucedía en los modelos anteriores, aquí también varios de los conductos tienen caudales que superan los 100 l/s y la mayoría son los mismos, en estas figuras no aparecen las etiquetas de los pozos porque existe una cantidad elevada de pozos artificiales para poder definir los cauces de las calles.

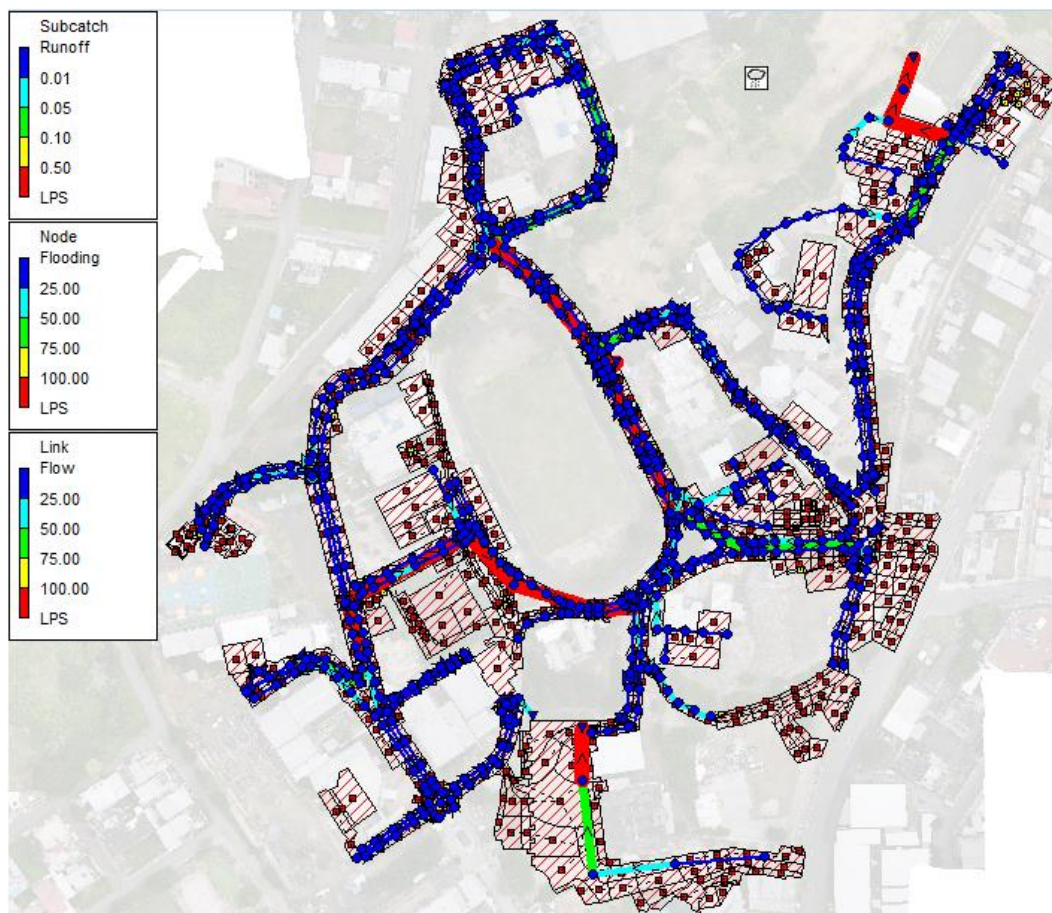


Figura 30: Simulación modelo dual, caudal máximo en los conductos.

En la figura 31 por otra parte se observan los valores de la variable *Capacity*, es decir y/D , en este caso y_{\max}/D . En este caso persisten las zonas en las que las tuberías trabajan a presión en los modelos anteriores, sin embargo, en este modelo se aprecia una disminución de las tuberías que están en este estado, la causa es que parte del caudal se encuentra circulando por las calles.

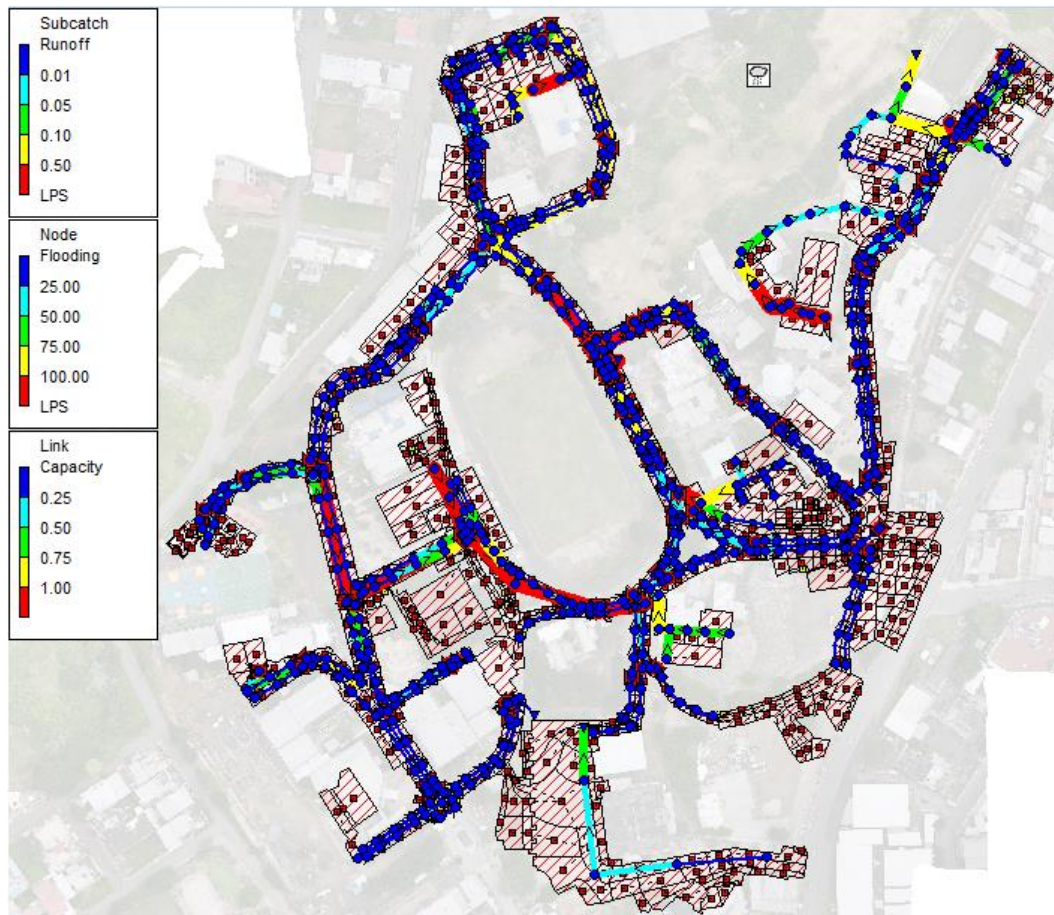


Figura 31: Simulación modelo dual, capacidad de llenado máxima en los conductos.

En la figura 32 se muestran las velocidades máximas en las tuberías, véase que como ocurre en los modelos anteriores, los conductos en los que las velocidades exceden los 2 m/s coinciden con los tramos de mayor caudal y/o mayor pendiente.

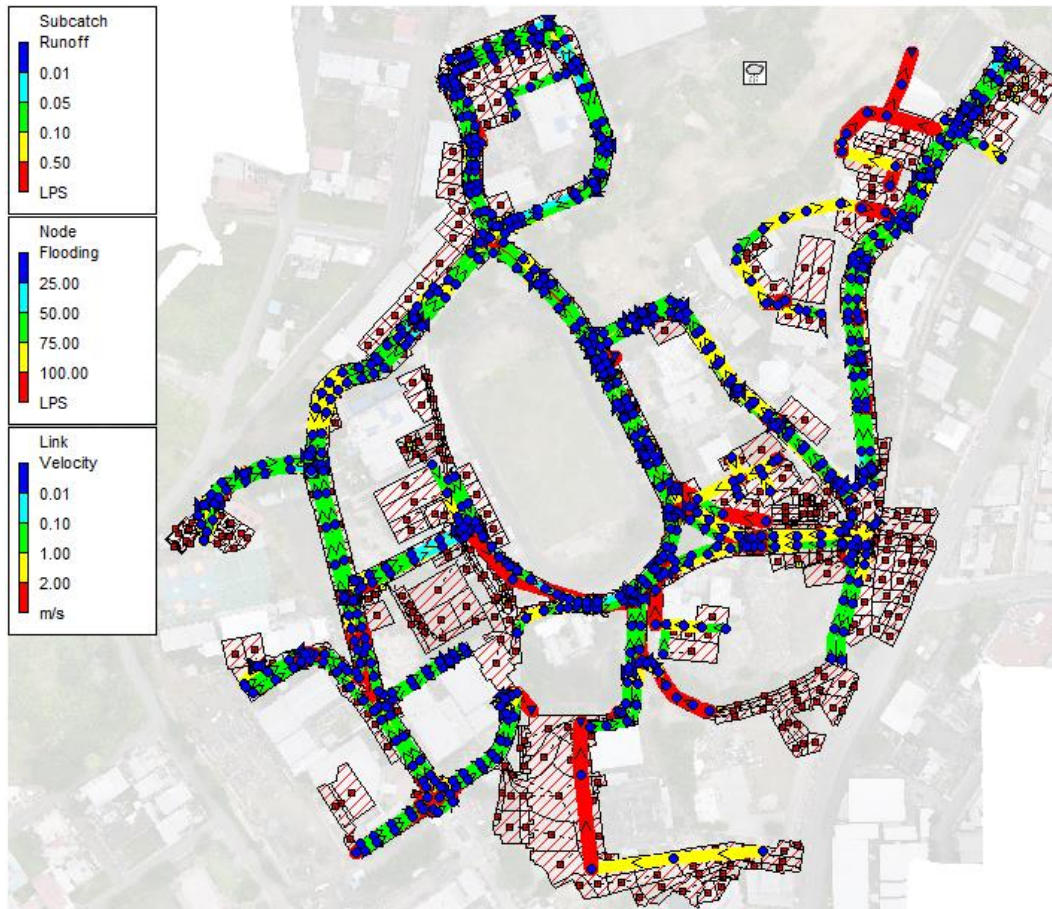


Figura 32: Simulación modelo semidual, velocidad máxima en los conductos.

18.4.2 Análisis de los pozos.

Para este modelo, se considera que, en los nodos donde exista salida de caudal producto de una sobrepresión se permita la posterior entrada del agua que se encuentra en la calle, esto se hace por medio de la variable *Ponded Area* que representa un área en m^2 ocupada por el agua que sale a la superficie, en esta simulación a estos nodos se les asignó un área de $5 m^2$.

Para este modelo la salida de caudal se distribuye mucho más en diversos nodos y el caudal total es menor, el nodo por el que más caudal sale es justamente el PD-29A con un caudal de 47.20 l/s.

18.4.3 Visualización de modelo dual 1D - 1D propuesto.

En la figura 33 se muestra un detalle de la zona de la red donde se ubica el pozo P42 que en los modelos anteriores ha sido crítico por su entrada en carga a presión, aquí se detalla su conexión con los sumideros PD-29A, PD-30A y PD-33A, además se pueden observar los orificios para simular estos sumideros. Seguidamente se presenta la figura 34 que es un perfil longitudinal del sistema de drenaje que abarca, calles, sumideros, tirantes y pozo, este perfil es el compuesto por los objetos lineales entre PD-48 ~ PD-33 ~ PD-33A ~ P42 ~ PD-30A ~ PD-30 ~ PD-28 y PD-26.

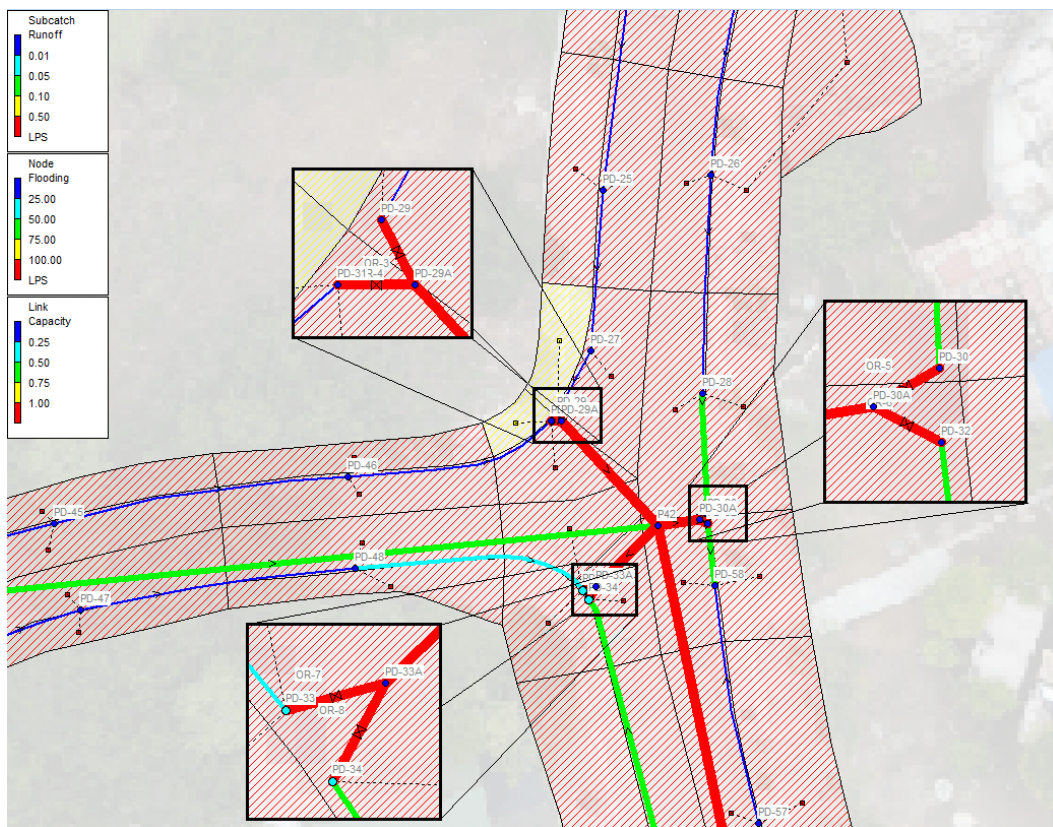


Figura 33: Detalle modelo dual.

En el perfil de la figura 34 se puede ver que los nodos que representan los sumideros, así como el pozo entran en presión, ver la línea a azul que representa la rasante piezométrica.

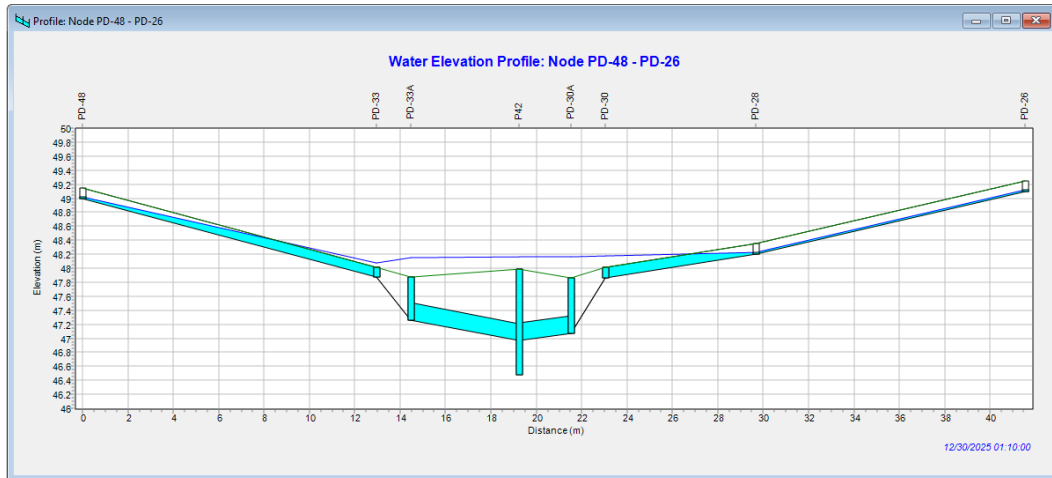


Figura 34: Perfil del detalle del modelo dual.

18.4.4 Caudales y volúmenes evacuados en los puntos de descarga.

En la figura 35 se presentan los hidrogramas obtenidos por cada uno de los modelos **Trad:** Tradicional, **SD:** Semidual y **Dual:** Dual en cada un de los puntos de descarga.

De igual manera en la figura 36 se presentan los volúmenes acumulados en cada una de las descargas.

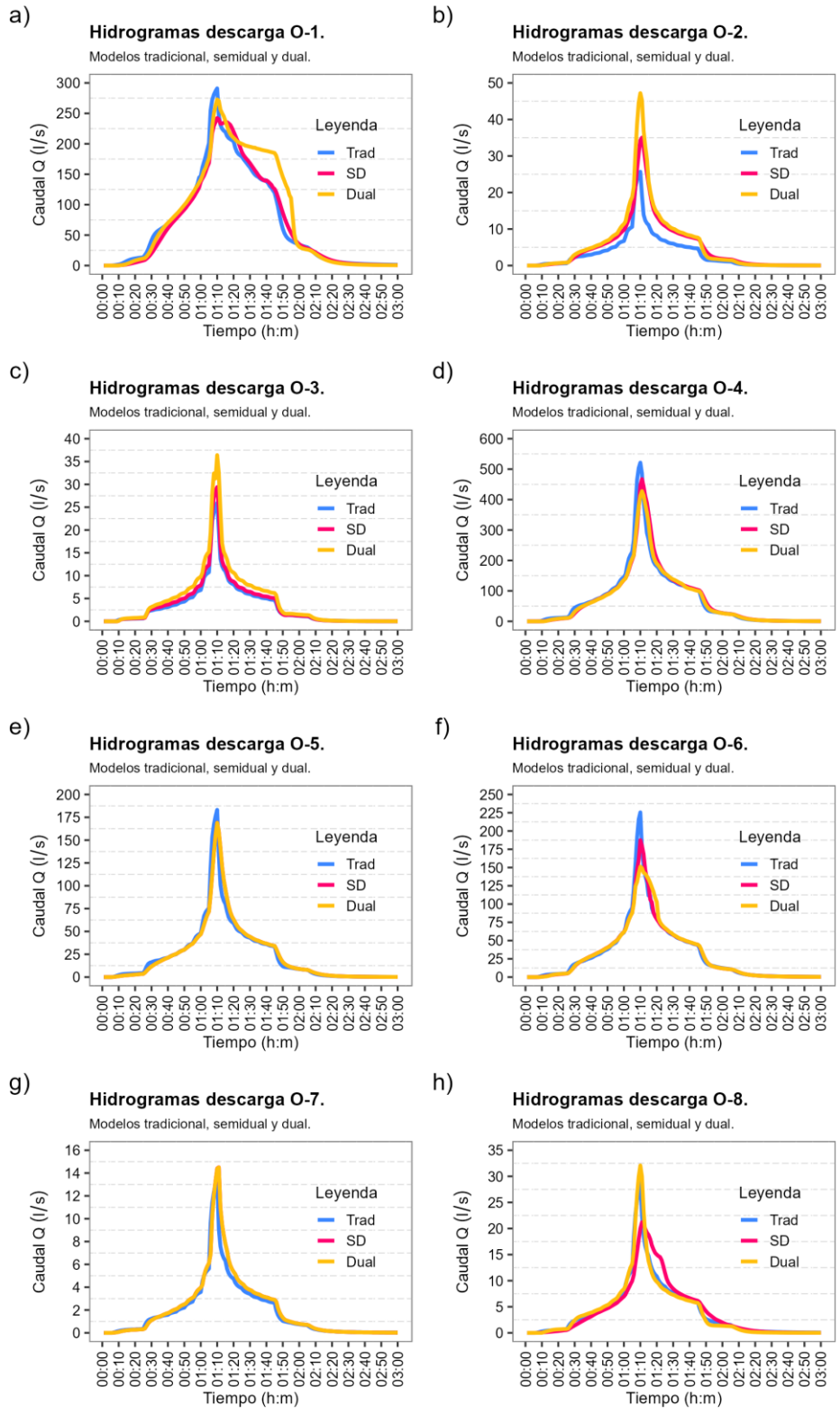


Figura 35: Hidrogramas obtenidos en los puntos de descarga.

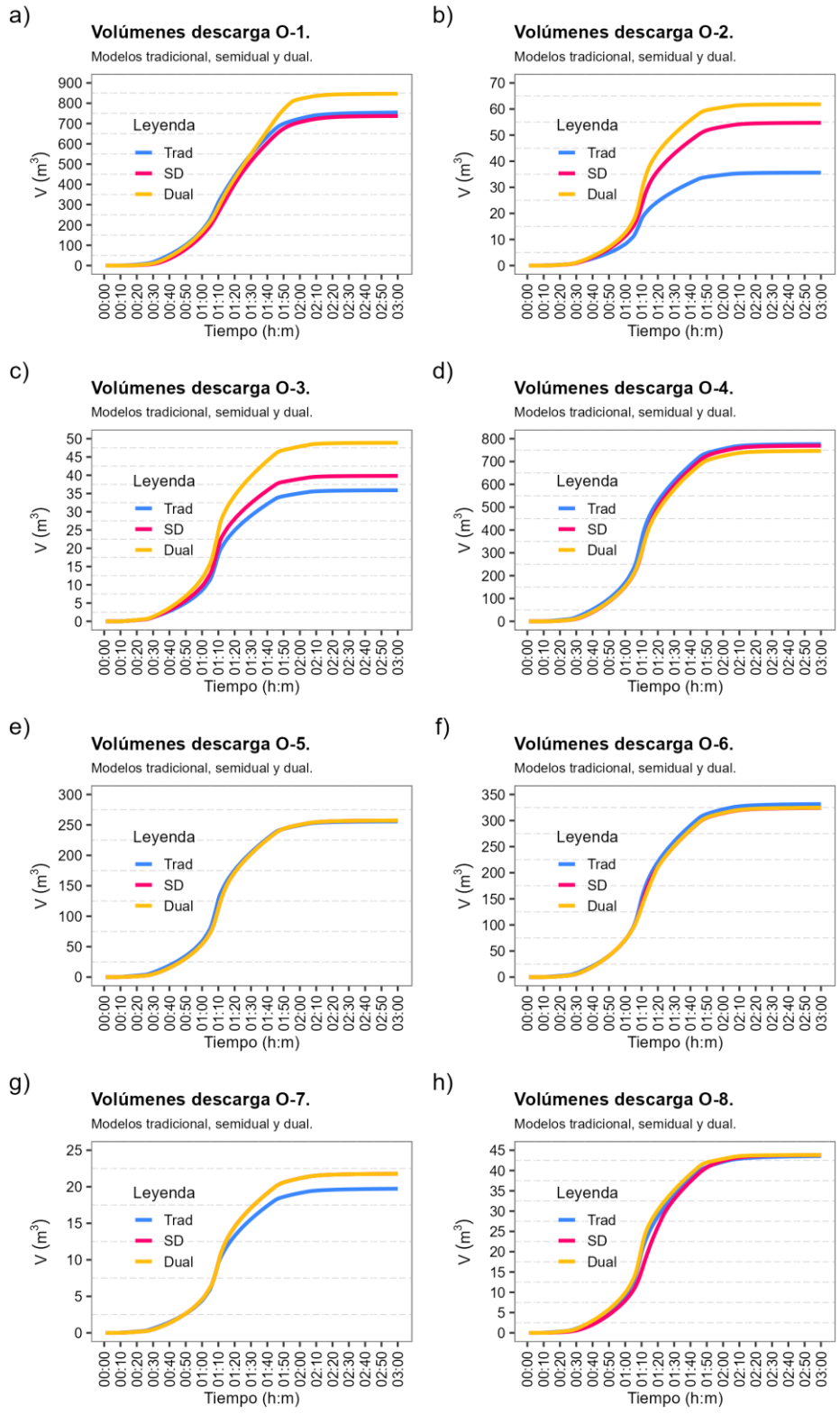


Figura 36: Volúmenes obtenidos en los puntos de descarga.

Análisis descarga **O-1**: Véase en la figura **35 a)** que el pico de los modelos semidual y dual es inferior al tradicional, por otra parte la diferencia en caudal que presenta el Dual después del pico responde a que en esa zona es donde se encuentra la mayor cantidad de pozos que se desbordan y ese incremento de caudal es debido a la entrada al sistema de drenaje de esa agua que salió y solo puede comenzar a entrar una vez que disminuya el nivel en los pozos y tuberías. Esto mismo explica el incremento de volumen de agua del modelo dual con respecto al tradicional y al semidual, ver la figura **36 a)**.

Análisis descarga **O-2**: Véase en la figura **35 b)** que el pico de caudal con el modelo dual es mayor que el resto de los modelos y la explicación es que el área de aporte a la descarga O-2 en el modelo tradicional es mucho menor que en los modelos semidual y dual y en el caso del modelo dual se incorpora agua adicional de los pozos que se desbordan, este mismo efecto se tiene en los volúmenes, ver la figura **36 b)**.

Análisis descarga **O-3**: Ocurre exactamente lo mismo que en el caso anterior, la diferencia se basa en la diferencia de área de drenaje entre los modelos.

Análisis descarga **O-4**: En este caso el modelo dual presenta un menor caudal pico que los otros modelos, unos 50 l/s menos que el tradicional, sin embargo, en el caso de los volúmenes estos coinciden bastante para los tres modelos, ver las figuras **35 d)** y **36 d)**

Análisis descarga **O-5**: En este caso hay una fuerte coincidencia entre todos los modelos.

Análisis descarga **O-6**: En este caso el modelo dual presenta un menor caudal pico que los otros modelos, unos 50 l/s menos que el tradicional, sin embargo, en el caso de los volúmenes estos coinciden bastante para los tres modelos, ver las figuras **35 f)** y **36 f)**.

Análisis descarga **O-7**: Esta es una descarga muy pequeña y hay una buena coincidencia entre todos los modelos en cuanto a los caudales, sin embargo, el modelo dual tiene un mayor volumen.

Análisis descarga **O-8**: En esta descarga el mayor caudal pico lo tiene el modelo dual debido al área de aporte que es mayor y en el caso del volumen acumulado, este se mantiene prácticamente igual en todos los modelos.

18.4.5 Zonas especiales del sistema de AALL en la ULEAM Manta.

Como parte del trabajo realizado se presenta el mapa de la figura **37** donde se pueden distinguir algunas zonas que a futuro se deben incluir en los modelos de drenaje pluvial semidual y dual, aquí no se incluyeron por falta de información, ejemplo el Centro de Convenciones CIEC, también se destacan zonas muy proclives a quedar encharcadas debido a que no se pudo constatar que tengan una solución de drenaje, por otra parte se detalla una zona en la que el drenaje existente se concibe hacia afuera de la universidad, esto es en la zona de los edificios B-10 y B-11 de Biología e Ingeniería Marítima y finalmente se define el área de descarga superficial natural o vaguada de la universidad.

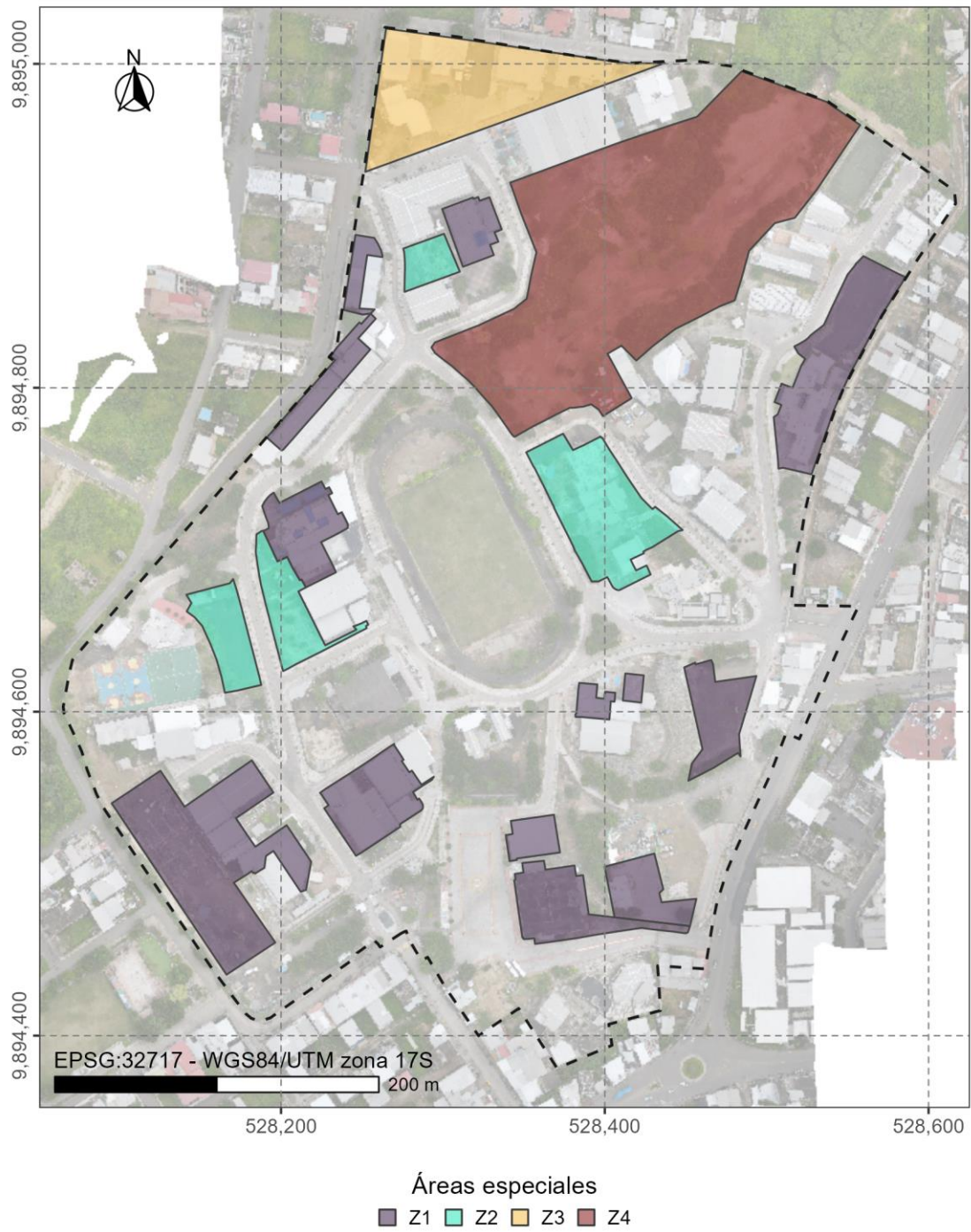


Figura 37: Zonas especiales del sistema de AALL Uleam Manta.

En la figura anterior:

Z1: Zona a considerar a futuro para incluir en los modelos de drenaje semidual y dual.

Z2: Zona proclive a encharcamiento debido a que no cuentan con una solución de drenaje.

Z3: Zona que tiene concebido su drenaje hacia afuera de la universidad, (vertido directo a la calle).

Z4: Zona de descarga natural (vaguada) de la universidad

18.4.6 Propuestas de acciones para mitigación de inundaciones.

- Conservar limpias las calles, libres de hojas y otros elementos que puedan bloquear los sumideros.
- Hacer limpieza periódica de sumideros y pozos en la etapa de comienzo de las lluvias.
- Con el asentamiento diferencial ocurrido en las calles, en varios puntos donde se ubican los sumideros, estos quedan en un nivel topográfico superior a la calle lo que provoca que el escurrimiento superficial sobre las calles no llegue a los sumideros, en ta sentido, eventualmente se le debe dar mantenimiento a este sistema.
- Evaluar la colocación de una nueva descarga conectada al pozo P42, esta nueva descarga quedaría ubicada fuera de la universidad aprovechando los nuevos viales que se han realizado en la vecindad de la universidad. Esto permitiría que no hubiera un desbordamiento de agua en los sumideros conectaos al pozo P42 ante una lluvia intensa con período de retorno de 10 años.

En la figura **38** se presenta la inclusión de esta nueva descarga a las afueras de la universidad a la cual se le llama O-9 (delimitada en rectángulo rojo), en este caso se incluyó solo en el modelo dual, la tubería ubicada tiene un diámetro interior de 400 mm y la longitud es de 75 m. Para el

intervalo de tiempo de mayor caudal en el sistema, por esta descarga se evacuan 219.15 l/s con una capacidad de llenado de 0.79.

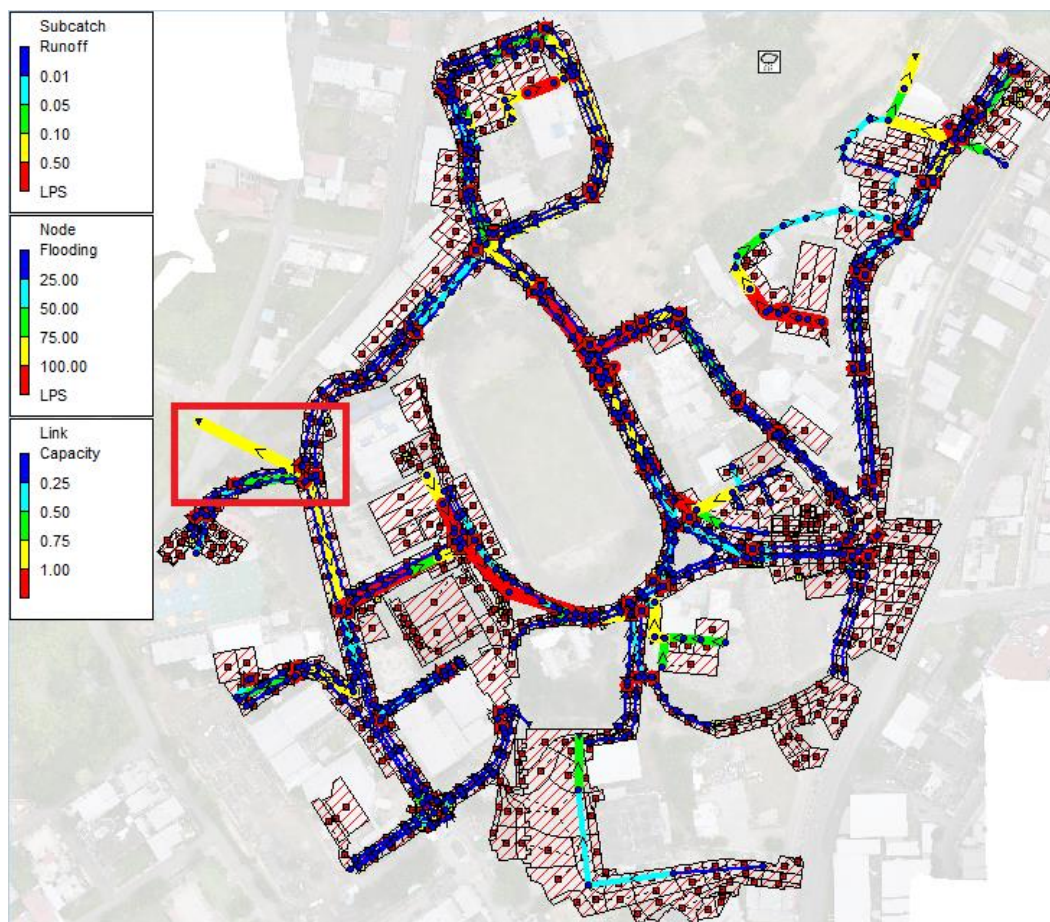


Figura 38: Simulación de nueva descarga propuesta, modelo dual.

Para evaluar el impacto de esta nueva descarga en el sistema de drenaje se presentan los perfiles de la figura 39. El primer perfil es sin la inclusión de la nueva descarga O-9 y el segundo es tomándola en cuenta. En ambos casos las tuberías entran a trabajar a presión, sin embargo, en el segundo caso la línea piezométrica baja considerablemente propiciando que no salga agua en la zona de los pozos P42 y P30, con lo cual mejora el funcionamiento del sistema.

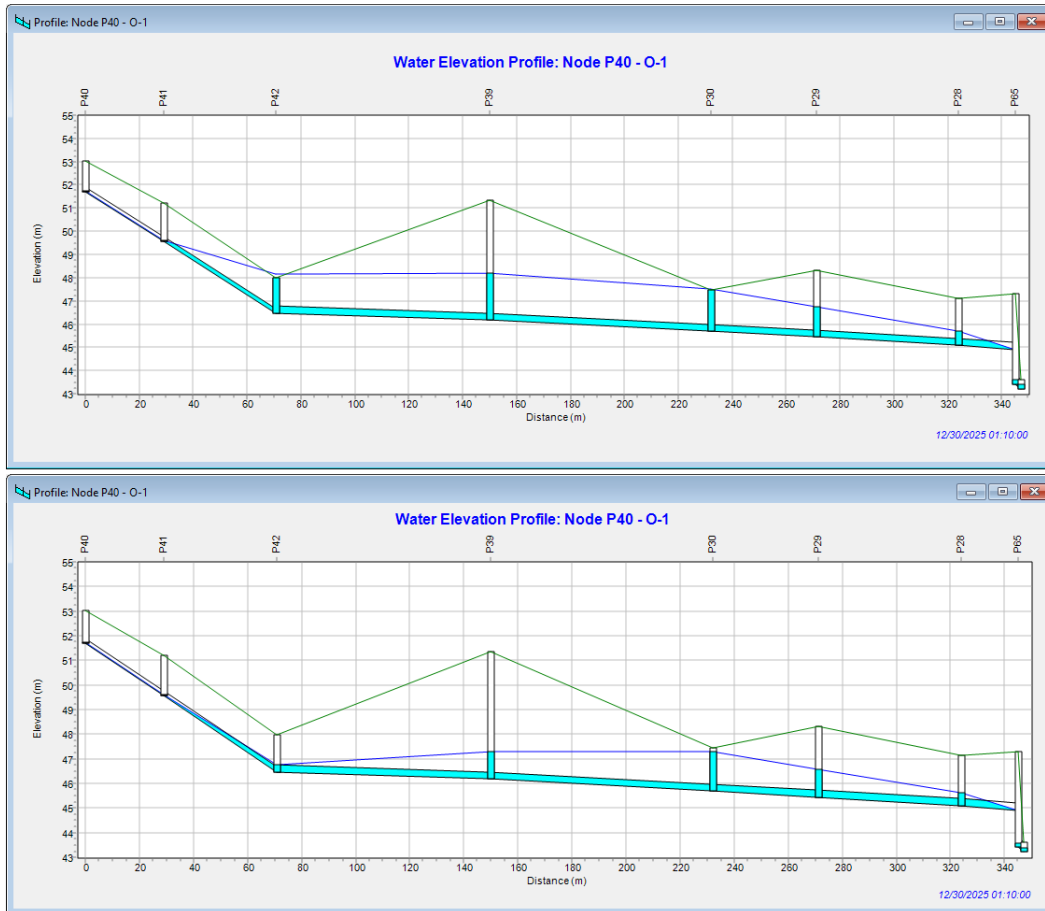


Figura 39: Perfiles desde el pozo P40 a la descarga O-1 sin y con la inclusión de la nueva descarga.

18.5 Análisis, comentarios y conclusiones parciales del capítulo.

Los resultados de las simulaciones en período prolongado para un evento con $Tr = 10$ años revelan vulnerabilidades críticas en sectores específicos de la red, donde varios tramos operan a sección llena y bajo presión, el modelo tradicional identificó caudales superiores a los 100 l/s en colectores principales, como el tramo P30 al O-1, lo que evidencia que las pendientes reducidas y diámetros actuales no son suficientes para evacuar el volumen pronosticado sin generar inundaciones. Por lo tanto, se requieren medidas de mitigación para evitar desbordamientos en puntos estratégicos como los pozos P42 y P30.

El contraste entre ambos modelos confirma que el enfoque dual ofrece una representación más fiel de la realidad al considerar la mitigación en la red vial y una delimitación de subcuencas más rigurosa, mientras el modelo tradicional genera inundaciones ficticias por acumulación estática en los nodos, el esquema dual permite trazar el recorrido de la lámina de agua y su interacción con los sumideros, este análisis valida la implementación de la nueva descarga O-9, la cual actúa como un alivio hidráulico crítico, la comparación de perfiles evidencia un descenso en la línea piezométrica de los pozos P42 y P30, garantizando que el sistema opere sin entrar en carga, incluso ante eventos de diseño extremos.

19 CONCLUSIONES.

La evidencia técnica demuestra que la simplificación del modelado 1D al asumir una captación total e inmediata no muestra la realidad hidráulica del campus, para subsanar esta limitación, se optó por un ecosistema de software libre integrando EPA SWMM 5.2 y QGIS, este marco analítico permite pasar hacia el método de la Onda Dinámica, el cual resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para capturar con rigor fenómenos de flujo en carga y el comportamiento de reflujos, variables que el enfoque tradicional suele desestimar.

Con el QGIS, se estructuró una red de drenaje digital que replica la conectividad física del campus, este modelo geoespacial trasciende el modelado hidráulico convencional al incorporar un repositorio multimedia para cada nodo, lo que permite la consulta directa de esquemas en PDF y registros fotográficos desde la tabla de atributos, de este modo, la gestión de aguas lluvias (AALL) gana validez, permitiendo programar mantenimientos preventivos basados en la evidencia física recolectada durante el levantamiento de detalle.

Las simulaciones 1D identificaron tramos críticos con insuficiencia hidráulica. Se determinó que los conductos en los tramos P42 a O-1 y P48 a O-4 operan a presión debido a pendientes reducidas y diámetros que no asumen los caudales pronosticados. Se cuantificaron caudales de inundación significativos en los pozos P30 (140.51 l/s) y P42 (157.20 l/s), al evidenciar zonas con alta vulnerabilidad a desbordamientos.

La aplicación de los modelos semidual y dual permitió una aproximación superior de la superficie de drenaje, pasando de 76 subcuencas en el modelo tradicional a 1131 áreas de aporte, la implementación del modelo dual muestra que el rendimiento del sistema mejora al permitir

que el agua fluya a través de las calles cuando la red se satura, dando lugar a una disminución de los caudales en los pozos más importantes: el P30 alcanza los 94.46 l/s y el P42 los 118.59 l/s, demostrando que parte del volumen es gestionado por la red vial, al evitar así la sobreestimación observada en el modelo tradicional.

La simulación de diversos modelos ante eventos extremos máximos demostró la superioridad del modelo dual, el cual muestra la reducción en las tuberías que trabajan a presión al tomar en cuenta el caudal que circula por las vías. Este análisis permitió proponer soluciones basadas en resultados numéricos. Un análisis detallado de la nueva salida (O-9) muestra una reducción significativa de la presión desde el pozo P40 hasta la descarga O-1, al demostrarlo mediante perfiles hidráulicos.

20 RECOMENDACIONES.

Se propone la implementación de un protocolo de mantenimiento preventivo para la infraestructura vial y los sistemas de captación pluvial, el programa debe priorizar la limpieza sistemática de sedimentos y residuos sólidos en las calzadas, factores que disminuyen críticamente la eficiencia de intercepción en los sumideros, resulta urgente coordinar el saneamiento integral de pozos de revisión y estructuras de entrada antes del periodo estacional de lluvias, garantizando así que la red opere bajo el régimen hidráulico de diseño.

Se recomienda la intervención de estos puntos críticos, donde el nivel topográfico de sumideros es superior a la rasante de la calle, ya que, esta desalineación impide el ingreso del escurrimiento superficial al sistema menor, lo que requiere un mantenimiento correctivo que restituya los niveles y garantice la captación funcional del flujo.

Proyectar la construcción de un emisario de alivio de 400 mm de diámetro que conecte el pozo P42 con la infraestructura externa a lo largo de 75 metros, esta obra civil responde a la necesidad de disminuir los niveles de energía en el tramo crítico P30 y P42, donde el modelado detectó problemas de presurización, la integración de esta descarga asegura la efectividad del sistema bajo condiciones de seguridad hidráulica, evitando que la carga piezométrica alcance la rasante del terreno en eventos extremos de 10 años de retorno.

Se recomienda que la Dirección de Infraestructura, Obras, Patrimonio y Medioambiente, o la unidad que en el futuro gestione la infraestructura de datos de la ULEAM, adopte el SIG desarrollado en esta investigación como base de datos técnica de referencia y lo extienda a otras redes de infraestructura (agua potable, alcantarillado sanitario, redes eléctricas).

En futuras actualizaciones de los modelos semiduales y duales se incorporen zonas actualmente excluidas por restricciones de información, tales como el Centro de Convenciones, y se planteen soluciones de drenaje específicas para las áreas identificadas como proclives al encharcamiento que actualmente carecen de evacuación formal.

Los resultados obtenidos validan la necesidad de sustituir los métodos de cálculo tradicionales por esquemas de acoplamiento bidireccional en futuras intervenciones de la red pluvial, el empleo de simulaciones 1D-1D resulta importante para caracterizar el comportamiento hidráulico bajo condiciones de saturación, permitiendo dimensionar nuevas estructuras que contemplen la física del escurrimiento vial, este enfoque asegura una planificación basada en la resiliencia del sistema frente a eventos que superen la capacidad de la red enterrada.

21 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Alcantarillado, E. M. de, & Potable, A. (2009). Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado para la EMAAP-Q. *Quito, Ecuador*.

Barreiro, J., Santos, F., Ferreira, F., Neves, R., & Saldanha Matos, J. (2022). Development of a 1D/2D Urban Flood Model Using the Open-Source Models SWMM and MOHID Land. *Sustainability*, 15, 707. <https://doi.org/10.3390/su15010707>

Barreiro Santana, D. A. (2022). *Respuesta Hidrológica-Hidráulica del Sistema de Drenaje Pluvial del Plan Maestro Hidrosanitario de la Ciudad de Chone Ante Diferentes Escenarios Hidrometeorológicos, por Medio de un Modelo de Simulación Hidrodinámica*. Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí.

Campo Arteaga, C. A., & Zambrano Santander, D. I. (2024). *Flujo de trabajo eficiente y moderno basado en software de acceso libre para la realización de proyectos de diseño y/o análisis de sistemas de drenaje pluvial. Caso de estudio: asentamientos Rioverde y Palestina, provincia Esmeralda, Ecuador*. Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí.

Cea, L., Sañudo, E., Montalvo, C., Farfán, J., Puertas, J., & Tamagnone, P. (2025). Recent advances and future challenges in urban pluvial flood modelling. *Urban Water Journal*, 22(2), 149-173. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2446528>

Chen, Y., & Gaspari, J. (2023). Exploring an Integrated System for Urban Stormwater Management: A Systematic Literature Review of Solutions at Building and District Scales. *Sustainability*, 15. <https://doi.org/10.3390/su15139984>

Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw-Hill. *Santafe de Bogota-Colombia*.

Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.

Gironás, J., Roesner, L. A., Davis, J., Rossman, L. A., & Supply, W. (2009). *Storm water management model applications manual*. Citeseer.

Guo, K., Guan, M., & Yu, D. (2020). *Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges*. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-655>

INAMHI, I. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. *Instituto Nacional De Meteorología E Hidrología, Determinación De Ecuaciones Para El Cálculo De Intensidades Máximas De Precipitación*, 283.

INEN, I. (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. En *Código Ecuatoriano de la construcción*.

Knight, K. L., Hou, G., Bhaskar, A. S., & Chen, S. (2021). Assessing the Use of Dual-Drainage Modeling to Determine the Effects of Green Stormwater Infrastructure on Roadway Flooding and Traffic Performance. *Water*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/w13111563>

Kwast, H. van der, Menke, K., & Sherman, G. E. (2019). *QGIS for hydrological applications*. Recipes for catchment hydrology; water management. Chugiak: Locate Press.

Monachese, A., Gomez Villarino, T., Santiago, J., Sanz, E., Almeida-Ñauñay, A., & Zobelzu, S. (2024). Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus. *Water*, *17*, 76. <https://doi.org/10.3390/w17010076>

Montalvo, C., Reyes-Silva, J. D., Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2024). Urban pluvial flood modelling in the absence of sewer drainage network data: A physics-based approach. *Journal of Hydrology*, *634*, 131043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131043>

Niazi, M., Nietch, C. T., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., & Massoudieh, A. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of sustainable water in the built environment*, *3* 2. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132824528>

Oberauer, M., & Lehmann, B. (2024). Enhanced 2D-models as alternative to dual-drainage systems for urban flood simulation. *Journal of Hydrology*, *645*, 132198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132198>

Pochwat, K. (2022). Assessment of Rainwater Retention Efficiency in Urban Drainage Systems—Model Studies. *Resources*, *11*, 14. <https://doi.org/10.3390/resources11020014>

Rangari, V., Prashanth, S., Nanduri, U., & Patel, A. (2018, marzo). *Simulation of Urban Drainage System using a Storm Water Management Model (SWMM)*.

Rodriguez, C., Fabian, C., & Sarmiento-Rojas, J. (2025). Modeling urban drainage in intermediate cities under extreme climate change scenarios: a case study in Southeastern Tunja, Colombia. *H2Open Journal*, *8*. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2025.007>

Saleh, M., Palermo, S. A., Pirouz, B., Naghib, N., Javadi, H., Brusco, A. C., Presta, L., Turco, M., Falco, S., Stefano, A., Minniti, D., Polizzi, A., Filippis, F., Russo, B., & Piro, P. (2024, noviembre). *HYDRODYNAMIC MODEL OF AN URBAN DRAINAGE NETWORK USING SWMM AND GIS*.

Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models Iber and SWMM. *Water*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092647>

Schellart, A., Ochoa-Rodriguez, S., Simões, N., Wang, L.-P., Rico-Ramirez, M., Liguori, S., Duncan, A., Chen, A., Keedwell, E., Djordjević, S., Savic, D., Saul, A., & Maksimovic, Č. (2011, enero). *Urban pluvial flood modelling with real time rainfall information - UK case studies*.

Schilling, J., & Tränckner, J. (2022). Generate_SWMM_inp: An open-source QGIS plugin to import and export model input files for SWMM. *Water*, 14(14), 2262.

Sim, S.-B., & Kim, H.-J. (2024). An Urban Flood Model Development Coupling the 1D and 2D Model with Fixed-Time Synchronization. *Water*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/w16192726>

Siswanto, E., Susanto, S., & Rahmawati, F. (2025). Evaluation of Rainfall Intensity and the Effectiveness of Green Infrastructure in Urban Water Management: A Case Study of the University of Kadiri. *International Journal of Engineering Continuity*, 4, 118-139. <https://doi.org/10.58291/ijec.v4i1.364>

Swarup, S. D., Shams, M., Banik, B., Hoque, M., Kabir, M. I., & Islam, M. (2024, diciembre). *ASSESSMENT OF URBAN DRAINAGE SYSTEM USING SWMM AND GIS: A CASE STUDY ON SUST CAMPUS*.

Xie, J., Qiang, W., Lin, Y., Huang, Y., Xu, K.-Q., Zheng, D., Chen, S., Pei, Y., & Fan, G. (2025). Enhancing Urban Drainage Resilience Through Holistic Stormwater Regulation: A Review. *Water*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/w17101536>

Zuo, C., Yin, B., Tan, F., Ma, Z., Gong, S., & Qi, X. (2025). Runoff Simulation and Waterlogging Analysis of Rainstorm Scenarios with Different Return Periods on Campus: A Case Study at China University of Geosciences. *Applied Sciences*, 15, 691. <https://doi.org/10.3390/app15020691>

22 ANEXOS.

Anexo 1. Proceso de obtención de pluviogramas de la estación M0074, duración de la lluvia 2 horas y períodos de retorno $Tr = 2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años.

Tabla donde se aplica el método de bloques alternos para una lluvia de 2 horas y período de retorno $Tr = 2$ años. Cada columna de la tabla se explica posteriormente.

Nro	t (min)	t (h)	Est: M0074, Tr: 2 (años), IdTR: 1.86 (mm/h)				
			I (mm/h)	Pacum (mm)	dP (mm)	Intervalos	P(mm)
1	5	0.083	78.24	6.52	6.52	0-5	0.20
2	10	0.167	56.68	9.45	2.93	5-10	0.22
3	15	0.250	46.94	11.74	2.29	10-15	0.24
4	20	0.333	41.06	13.69	1.95	15-20	0.26
5	25	0.417	37.02	15.42	1.74	20-25	0.98
6	30	0.500	34.01	17.00	1.58	25-30	1.04
7	35	0.583	31.66	18.47	1.46	30-35	1.12
8	40	0.667	29.75	19.83	1.37	35-40	1.22
9	45	0.750	28.16	21.12	1.29	40-45	1.37
10	50	0.833	26.82	22.35	1.22	45-50	1.58
11	55	0.917	25.65	23.52	1.17	50-55	1.95
12	60	1.000	24.64	24.64	1.12	55-60	2.93
13	65	1.083	23.74	25.72	1.08	60-65	6.52
14	70	1.167	22.93	26.76	1.04	65-70	2.29
15	75	1.250	22.21	27.76	1.01	70-75	1.74
16	80	1.333	21.55	28.74	0.98	75-80	1.46
17	85	1.417	20.39	28.88	0.14	80-85	1.29
18	90	1.500	19.43	29.14	0.26	85-90	1.17
19	95	1.583	18.56	29.39	0.25	90-95	1.08

Nro	t (min)	t (h)	Est: M0074, Tr: 2 (años), IdTR: 1.86 (mm/h)				
			I (mm/h)	Pacum (mm)	dP (mm)	Intervalos	P(mm)
20	100	1.667	17.78	29.63	0.24	95-100	1.01
21	105	1.750	17.06	29.86	0.23	100-105	0.14
22	110	1.833	16.41	30.08	0.22	105-110	0.25
23	115	1.917	15.81	30.29	0.21	110-115	0.23
24	120	2.000	15.25	30.50	0.20	115-120	0.21

En la columna 2 se ubican valores de tiempos en minutos con un intervalo constante de 5 min hasta llegar al valor 120 que representa las 2 horas, la columna 3 es la conversión de estos valores de tiempo a horas, esto se hace dividiendo la columna 2 por 60, la columna 3 es muy importante, cada valor se obtiene evaluando en las ecuaciones correspondientes de I_{TR} que fueron presentadas con anterioridad. Para ambas ecuaciones el valor de $Id_{TR} = 1.86 (mm/h)$, solo hay que tener en cuenta en la evaluación los valores de $t (min)$ que se encuentran en la columna 2, véase que se emplea una u otra ecuación de I_{TR} atendiendo al valor de $t (min)$ (fila de la tabla) que se esté calculando, ver intervalos de validez de las ecuaciones de I_{TR} . Seguidamente, los valores de la columna 5 se obtienen de la multiplicación de las columnas 3 y 4 con esto se obtiene la lámina de lluvia acumulada para cada tiempo. En la columna 6 se obtiene la lluvia ocurrida en cada intervalo de tiempo (ya no acumulada), para esto el primer valor coincide con el de la columna 5 y de ahí en lo adelante, se toma la resta de los valores de la columna 5 de la fila actual con la anterior. En la columna 7 se ubican los intervalos de tiempo. En la columna 8 es donde se aplica el método de bloques alternos, el primer valor es el último de la columna 6, el segundo es el antepenúltimo de la columna 6 y así se continúa hasta llegar al valor intermedio de la serie que coincidirá con el primer valor de la columna 6, de ahí en lo

adelante se toman (de forma organizada y descendiente los valores que no fueron tomados en la columna 6). Los valores obtenidos en esta columna 8 serían los que conforman el pluviograma.

Este mismo procedimiento se aplica para los períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años, los resultados tabulares principales se presentan en la siguiente tabla.

Nro	t (min)	t (h)	Precipitación (mm)				
			Tr 5(años)	Tr 10(años)	Tr 25(años)	Tr 50(años)	Tr 100(años)
1	5	0.0833	0.28	0.33	0.40	0.45	0.49
2	10	0.1667	0.30	0.36	0.43	0.48	0.53
3	15	0.2500	0.33	0.39	0.47	0.52	0.58
4	20	0.3333	0.36	0.43	0.51	0.57	0.63
5	25	0.4167	1.35	1.59	1.90	2.13	2.36
6	30	0.5000	1.44	1.70	2.03	2.28	2.52
7	35	0.5833	1.55	1.83	2.19	2.45	2.71
8	40	0.6667	1.69	2.00	2.39	2.68	2.96
9	45	0.7500	1.89	2.23	2.67	2.99	3.31
10	50	0.8333	2.18	2.58	3.08	3.46	3.82
11	55	0.9167	2.70	3.19	3.81	4.27	4.72
12	60	1.0000	4.04	4.78	5.71	6.40	7.08
13	65	1.0833	9.01	10.66	12.72	14.27	15.77
14	70	1.1667	3.16	3.74	4.47	5.01	5.54
15	75	1.2500	2.40	2.84	3.39	3.80	4.20
16	80	1.3333	2.02	2.39	2.85	3.20	3.54
17	85	1.4167	1.78	2.11	2.52	2.82	3.12
18	90	1.5000	1.62	1.91	2.28	2.56	2.83
19	95	1.5833	1.49	1.76	2.10	2.36	2.61
20	100	1.6667	1.39	1.64	1.96	2.20	2.43
21	105	1.7500	0.20	0.23	0.28	0.31	0.35


Nro	t (min)	t (h)	Precipitación (mm)				
			Tr 5(años)	Tr 10(años)	Tr 25(años)	Tr 50(años)	Tr 100(años)
22	110	1.8333	0.35	0.41	0.49	0.55	0.60
23	115	1.9167	0.32	0.37	0.45	0.50	0.55
24	120	2.0000	0.29	0.35	0.41	0.46	0.51

Anexo 2. Código empleado en QGIS para lograr esta conexión entre las fichas técnica en pdf y los objetos en el proyecto de QGIS.

```
<div style="text-align: center; font-family: 'Segoe UI', sans-serif; min-width: 220px;">
  <div style="background-color: #2c3e50; color: white; padding: 8px; border-radius: 5px 5px 0 0;">
    <b>Detalle de Infraestructura</b>
  </div>
  <div style="padding: 15px; border: 1px solid #bdc3c7; border-top: none; border-radius: 0 0 5px 5px; background-color: #fdfeff;">
    <p style="margin-top: 0; font-weight: bold; color: #2c3e50;">ID: [% "Name" %]</p>
    [% CASE
      WHEN left("Name", 1) = 'B' OR left("Name", 2) = 'SD'
      THEN '<p style="color: #7f8c8d; font-size: 12px; margin: 0;"><i>Los esquemas técnicos solo están disponibles para pozos de revisión.</i></p>'
      WHEN "ruta_pdf" IS NULL OR trim("ruta_pdf") = ''
      THEN '<p style="color: #e67e22; font-weight: bold; font-size: 12px; margin: 0;">⚠ Sin información<br><span style="font-weight: normal; color: #7f8c8d;">No se tuvo acceso al pozo al momento de la inspección.</span></p>'
      ELSE '<p style="margin-bottom: 10px; font-size: 12px; color: #34495e;">Documento disponible:</p><a href="file:/// ' || @project_folder || '/' || "ruta_pdf" || ' ' style="text-decoration: none;"><div style="background-color: #e74c3c; color: white; padding: 8px 12px; border-radius: 4px; font-weight: bold; display: inline-block;">Ver PDF</div></a>'
    END %]
  </div>
</div>
```

El código escrito se divide en tres partes, con el fin de ver lo que realmente está sucediendo:

Utiliza la función `left("Name", n)` para determinar si el elemento es una alcantarilla o un accesorio (caja [B]/sumidero [SD]). Si se identifica como un accesorio, el sistema informa al usuario de que no existe esquema técnico para la categoría.

La instrucción `CASE WHEN "ruta_pdf" IS NULL` comprueba si el campo `ruta_pdf` contienen algún dato. Si no fue posible acceder al pozo, se muestra un mensaje de advertencia ( Sin información) en lugar del enlace roto.

La expresión `ELSE 'file:/// || (project_folder?) || '/' || "ruta_pdf"` crea automáticamente la ruta completa para el componente. combinando la ruta base del proyecto (.qgz) con el nombre del componente, que se almacena en sus propiedades. El fichero *.pdf se puede abrir con un solo clic en cualquier visor predeterminado del sistema operativo.

Anexo 3. Datos de los pozos de revisión existentes en el sistema de AALL de la ULEAM Manta.

Nro	ID	CF(m)	CT(m)	hp(m)	Nro	ID	CF(m)	CT(m)	hp(m)
1	B32	46.267	47.837	1.57	34	P37	54.430	57.410	2.98
2	B88	47.009	47.609	0.60	35	P38	52.472	55.492	3.02
3	B89	49.188	50.518	1.33	36	P39	46.171	51.351	5.18
4	B96	46.872	48.322	1.45	37	P4	44.123	47.143	3.02
5	P1	45.626	47.496	1.87	38	P40	51.686	53.036	1.35
6	P10	52.575	54.465	1.89	39	P41	49.554	51.214	1.66
7	P11	54.846	56.886	2.04	40	P42	46.473	47.993	1.52
8	P12	55.351	57.251	1.90	41	P43	53.128	54.778	1.65
9	P13	54.103	55.943	1.84	42	P44	51.308	53.718	2.41
10	P14	49.763	51.993	2.23	43	P45	51.804	54.184	2.38
11	P15	44.616	44.536	1.92	44	P46	52.114	54.334	2.22
12	P16	44.060	46.330	2.27	45	P47	52.386	54.286	1.90
13	P17	43.630	46.270	2.64	46	P48	52.820	54.050	1.23
14	P18	43.209	45.959	2.75	47	P49	52.556	54.116	1.56
15	P19	43.538	46.058	2.52	48	P5	40.835	45.215	4.38
16	P2	45.406	47.446	2.04	49	P50	52.327	54.257	1.93
17	P20	43.962	46.242	2.28	50	P51	52.056	53.966	1.91
18	P21	44.563	46.493	1.93	51	P52	51.842	53.872	2.03
19	P22	48.613	50.753	2.14	52	P53	46.403	48.553	2.15
20	P23	56.185	58.405	2.22	53	P55	45.097	46.997	1.90
21	P25	45.735	47.265	1.53	54	P56	47.380	48.780	1.40
22	P26	45.784	47.089	1.31	55	P63	52.740	53.240	0.50
23	P27	49.112	50.982	1.87	56	P64	55.750	57.250	1.50
24	P28	45.082	47.122	2.04	57	P65	43.420	47.300	3.88
25	P29	45.445	48.315	2.87	58	P7	46.560	48.880	2.32

Nro	ID	CF(m)	CT(m)	hp(m)	Nro	ID	CF(m)	CT(m)	hp(m)
26	P3	44.855	47.535	2.68	59	P8	48.985	51.005	2.02
27	P30	45.678	47.458	1.78	60	P9	50.288	52.718	2.43
28	P31	60.327	62.327	2.00	61	PZ01	61.899	63.899	2.00
29	P32	57.491	59.951	2.46	62	PZ02	60.095	62.595	2.50
30	P33	56.161	57.421	1.26	63	PZ03	53.907	56.410	2.50
31	P34	55.694	58.614	2.92	64	PZ04	51.263	54.593	3.33
32	P35	55.247	57.927	2.68	65	PZ05	49.947	53.647	3.70
33	P36	55.107	57.527	2.42					

Donde:

ID: Es el código de identificación asignado a cada pozo.

CF(m): Cota de fondo del pozo.

CT(m): Cota de terreno del pozo.

hp(m): Altura del pozo CT- CF.

Anexo 4. Datos de los conductos existentes en el sistema de AALL de la ULEAM Manta.

Nro	ID	NI	NF	L(m)	D(mm)	dh(m)	So(%)	Salto(m)
1	C-1	P1	P2	30.37	250	0.22	0.72	0.00
2	C-2	P2	P3	22.11	250	0.55	2.49	0.00
3	C-3	P3	P4	40.29	250	0.73	1.82	0.00
4	C-4	P4	P5	20.56	250	3.29	15.99	0.00
5	C-5	P7	P3	26.04	250	1.71	6.55	0.00
6	C-6	P8	P7	34.78	250	2.27	6.54	0.15
7	C-7	P9	P8	35.45	250	1.30	3.68	0.00
8	C-8	P10	P9	58.32	250	2.29	3.92	0.00
9	C-9	P11	P10	67.00	250	2.27	3.39	0.00
10	C-10	P12	P13	49.38	200	1.25	2.53	0.00
11	C-11	P13	P14	32.24	200	4.34	13.46	0.00
12	C-12	P14	P15	62.24	200	5.15	8.27	0.00
13	C-13	P15	P16	24.66	250	0.56	2.26	0.00
14	C-14	P16	P17	30.25	250	0.43	1.42	0.00
15	C-15	P17	P18	14.59	300	0.07	0.48	0.35
16	C-16	P19	P18	23.73	400	0.33	1.39	0.00
17	C-17	P20	P19	31.99	400	0.42	1.32	0.00
18	C-18	P21	P20	39.28	400	0.60	1.53	0.00
19	C-19	P22	P21	45.13	300	4.05	8.97	0.00
20	C-20	P23	P22	66.69	300	7.57	11.35	0.00
22	C-22	P26	P25	19.71	300	0.05	0.25	0.00
25	C-25	P29	P28	52.73	300	0.36	0.69	0.00
26	C-26	P30	P29	39.28	300	0.23	0.59	0.00
27	C-27	P39	P30	82.13	300	0.49	0.60	0.00
28	C-28	P32	P34	64.83	300	1.80	2.77	0.00
29	C-29	P33	P34	54.86	200	0.29	0.52	0.18

Nro	ID	NI	NF	L(m)	D(mm)	dh(m)	So(%)	Salto(m)
30	C-30	P34	P38	33.21	300	2.93	8.83	0.29
31	C-31	P35	P36	44.57	250	0.14	0.31	0.00
32	C-32	P36	P37	29.96	250	0.24	0.79	0.44
33	C-33	P37	P38	15.23	300	1.65	10.82	0.31
34	C-34	P38	P39	35.62	300	5.34	14.99	0.96
35	C-35	P42	P39	79.07	300	0.30	0.38	0.00
36	C-36	P40	P41	29.00	200	2.13	7.35	0.00
37	C-37	P41	P42	41.84	200	3.08	7.36	0.00
38	C-38	P43	P44	65.42	250	1.43	2.19	0.39
39	C-39	P45	P44	32.88	250	0.50	1.51	0.00
40	C-40	P46	P45	23.79	250	0.31	1.31	0.00
41	C-41	P47	P46	33.81	250	0.27	0.80	0.00
42	C-42	P48	P49	28.15	250	0.26	0.94	0.00
43	C-43	P49	P50	30.78	250	0.23	0.74	0.00
44	C-44	P50	P51	45.43	250	0.27	0.60	0.00
45	C-45	P51	P52	28.58	250	0.21	0.75	0.00
46	C-46	P52	P44	69.90	250	0.53	0.76	0.00
47	C-47	P44	P53	43.13	250	4.91	11.37	0.00
48	C-48	P53	P17	46.32	250	2.31	4.99	0.46
49	C-49	P18	O-4	8.99	400	0.02	0.22	2.72
50	C-50	P25	O-2	33.81	300	1.29	3.83	2.11
51	C-51	P55	O-3	14.23	150	0.42	2.96	2.79
52	C-52	P28	P65	21.09	300	0.18	0.86	1.48
53	C-53	P27	P65	35.23	200	3.26	9.26	2.43
66	C-65	P5	O-6	19.97	250	0.84	4.18	0.00
86	C-86	B89	B88	25.88	150	2.18	8.42	0.00
87	C-87	B88	P55	17.59	150	1.91	10.87	0.00
92	C-92	P56	B96	12.61	200	0.51	4.03	0.00
95	C-95	B96	B32	5.18	200	0.61	11.68	0.00

Nro	ID	NI	NF	L(m)	D(mm)	dh(m)	So(%)	Salto(m)
97	C-97	B32	P55	23.98	200	1.17	4.88	0.00
117	C-117	P31	P32	59.47	250	2.84	4.77	0.00
122	C-122	PZ02	PZ03	52.74	250	6.19	11.73	0.00
123	C-123	PZ03	PZ04	49.82	300	2.64	5.31	0.00
124	C-124	PZ04	PZ05	56.06	300	1.32	2.35	0.00
125	C-125	PZ05	O-5	31.27	300	1.94	6.19	0.00
126	C-126	P63	O-7	0.94	300	0.74	78.77	0.00
129	C-129	P64	O-8	13.86	300	1.84	13.28	0.00
135	C-135	P65	O-1	2.00	400	0.20	10.00	0.00

Donde:

ID: Es el código de identificación de los conductos.

NI: Nodo inicial del conducto.

NF: Nodo final del conducto.

L(m): Longitud de la tubería.

D(mm): Diámetro de la tubería.

dh(m): Altura desde el fondo hasta la tapa del pozo.

So(%): Pendiente del conducto.

Salto(m): Altura desde la cota del fondo del pozo al que llega la tubería hasta la cota de llegada de la tubería al pozo.

Anexo 5. Datos de las descargas existentes en el sistema de AALL de la ULEAM Manta.

Nro	ID	CF(m)	CT(m)	dh(m)
1	O-1	43.22	47.30	4.08
2	O-2	42.33	46.53	4.20
3	O-3	41.89	46.56	4.67
4	O-4	40.47	46.27	5.80
5	O-5	48.01	53.31	5.30
6	O-6	40.00	43.24	3.24
7	O-7	52.00	52.50	0.50
8	O-8	53.91	55.21	1.30

Donde:

ID: Es el código de identificación de las descargas.

CF(m): Cota de fondo a la descarga.

Anexo 6. Entrada de perfiles de calles para el modelo dual del sistema de AALL de la ULEAM Manta.

Este equipo > Data (D:) > Proj2_QGIS > ULEAM_AALL > swmm_AALL_ULEAM_dual

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
5_2_giswmm_curves.xlsx	29/12/2025 13:19	Microsoft Excel W...	18 KB
5_2_giswmm_inflows.xlsx	6/9/2025 18:11	Microsoft Excel W...	5 KB
5_2_giswmm_options.xlsx	30/12/2025 10:21	Microsoft Excel W...	10 KB
5_2_giswmm_patterns.xlsx	6/9/2025 18:11	Microsoft Excel W...	5 KB
5_2_giswmm_quality.xlsx	6/9/2025 18:11	Microsoft Excel W...	5 KB
5_2_giswmm_streets.xlsx	6/9/2025 18:11	Microsoft Excel W...	5 KB
5_2_giswmm_timeseries.xlsx	30/12/2025 10:22	Microsoft Excel W...	10 KB
5_2_giswmm_transects.xlsx	27/12/2025 1:10	Microsoft Excel W...	12 KB
5_2_SWMM_conduits.gpkg	31/12/2025 0:28	Archivo GPKG	376 KB
5_2_SWMM_dividers.gpkg	6/9/2025 18:11	Archivo GPKG	96 KB
5_2_SWMM_junctions.gpkg	29/12/2025 15:30	Archivo GPKG	200 KB
5_2_SWMM_orifices.gpkg	30/12/2025 10:32	Archivo GPKG	124 KB
5_2_SWMM_outfalls.gpkg	23/12/2025 0:14	Archivo GPKG	96 KB
5_2_SWMM_outlets.gpkg	29/12/2025 15:41	Archivo GPKG	124 KB
5_2_SWMM_pumps.gpkg	6/9/2025 18:11	Archivo GPKG	96 KB
5_2_SWMM_raingages.gpkg	7/9/2025 8:41	Archivo GPKG	96 KB
5_2_SWMM_storages.gpkg	6/9/2025 18:11	Archivo GPKG	96 KB
5_2_SWMM_subcatchments.gpkg	7/1/2026 1:26	Archivo GPKG	624 KB
5_2_SWMM_weirs.gpkg	6/9/2025 18:11	Archivo GPKG	96 KB
g_s_i_documentation_v_0_35.pdf	6/9/2025 18:11	Microsoft Edge P...	725 KB

AutoSave Off 5_2_giswmm_transects.xlsx • Saved to this PC

File Home Insert Page Layout Formulas Data Review View Automate Developer Help

Clipboard Font Alignment Number Styles

Conditional Formatting Format as Table Cell Styles

Cells Editing Sensitivity Add-ins Copilot

K10

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
4	Cuneta_derecha_2.7m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
5	Cuneta_izquierda_2.7m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
6	Cuneta_derecha_1.8m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
7	Cuneta_izquierda_1.8m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
8	Cuneta_derecha_2.3m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
9	Cuneta_izquierda_2.3m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
10	Canal_rectang_0.5m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
11	Cuneta_postgrado_Peralta	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
12	Cuneta_izquierda_1.3m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
13	Cuneta_derecha_1.3m	0.015	0.015	0.015	0	0	0	0	0
14									
15									

Data XSections

Ready Accessibility: Good to go 100%

Microsoft Excel window: 5_2_giss... • Saved to this PC

File Home Insert Page Layout Formulas Data Review View Developer Help

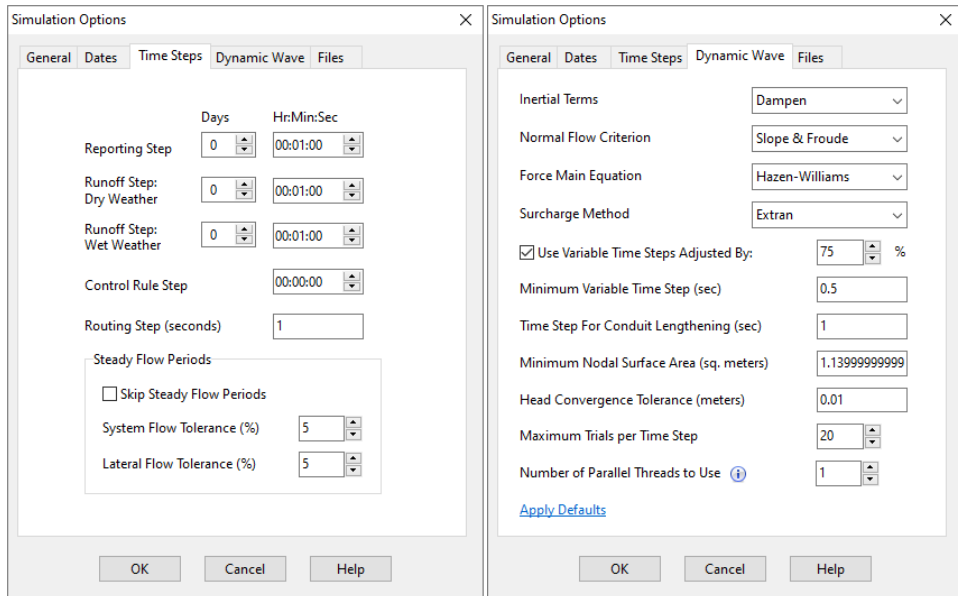
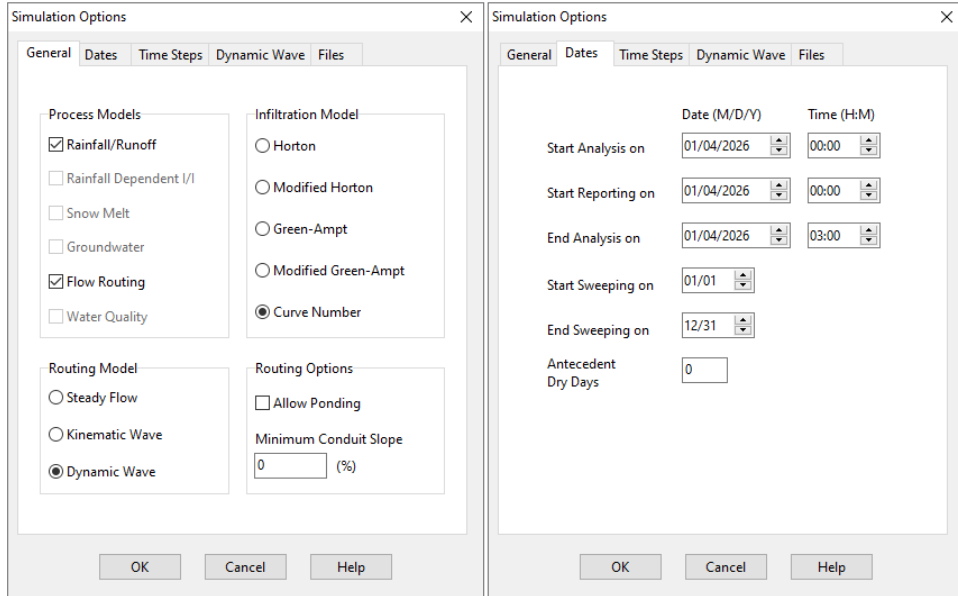
Clipboard Font Alignment Number Conditional Formatting Format as Table Cell Styles

F70

	A	B	C	D
1	TransectName	Station	Elevation	
2	Cuneta_derecha_3m	0	0.3	
3	Cuneta_derecha_3m	0	0.06	
4	Cuneta_derecha_3m	3	0	
5	Cuneta_derecha_3m	3	0.15	
6	Cuneta_derecha_3m	4	0.152	
7	Cuneta_derecha_3m	4	0.3	
8	Cuneta_izquierda_3m	0	0.3	
9	Cuneta_izquierda_3m	0	0.152	
10	Cuneta_izquierda_3m	1	0.15	
11	Cuneta_izquierda_3m	1	0	
12	Cuneta_izquierda_3m	4	0.06	
13	Cuneta_izquierda_3m	4	0.3	
14	Cuneta_derecha_2_7m	0	0.3	
15	Cuneta_derecha_2_7m	0	0.054	
16	Cuneta_derecha_2_7m	2.7	0	
17	Cuneta_derecha_2_7m	2.7	0.15	
18	Cuneta_derecha_2_7m	3.7	0.152	
19	Cuneta_derecha_2_7m	3.7	0.3	
20	Cuneta_izquierda_2_7m	0	0.3	
21	Cuneta_izquierda_2_7m	0	0.152	
22	Cuneta_izquierda_2_7m	1	0.15	
23	Cuneta_izquierda_2_7m	1	0	
24	Cuneta_izquierda_2_7m	3.7	0.054	
25	Cuneta_izquierda_2_7m	3.7	0.3	

Ready 100%

Anexo 7. Valores de parámetros hidráulicos obtenidos en la simulación del modelo tradicional.



Anexo 8. Valores de parámetros hidráulicos obtenidos en la simulación del modelo tradicional.

Nro	ID	D (mm)	So (%)	Qmáx (l/s)	TQmáx (H:M)	Vmáx (m/s)	Qmáx/Qo	ymáx/D
1	C-1	250	0.72	28.68	1:10	1.11	0.48	1.00
2	C-2	250	2.49	52.19	1:10	1.06	0.47	1.00
3	C-3	250	1.82	185.37	1:10	3.98	1.96	0.90
4	C-4	250	15.99	226.34	1:10	4.87	0.80	0.90
5	C-5	250	6.55	119.31	1:10	2.43	0.66	1.00
6	C-6	250	6.54	111.61	1:10	3.62	0.62	0.82
7	C-7	250	3.68	50.49	1:10	2.11	0.37	0.53
8	C-8	250	3.92	26.14	1:10	1.65	0.19	0.36
9	C-9	250	3.39	7.32	1:10	0.87	0.06	0.23
10	C-10	200	2.53	16.91	1:10	1.68	0.27	0.36
11	C-11	200	13.46	38.56	1:10	3.25	0.27	0.40
12	C-12	200	8.27	46.71	1:10	2.34	0.42	0.73
13	C-13	250	2.26	62.24	1:10	1.59	0.59	1.00
14	C-14	250	1.42	75.64	1:10	1.54	0.90	1.00
15	C-15	300	0.48	289.29	1:10	4.09	3.64	1.00
16	C-16	400	1.39	228.05	1:10	1.81	0.79	1.00
17	C-17	400	1.32	216.33	1:10	2.11	0.76	1.00
18	C-18	400	1.53	205.48	1:10	2.34	0.67	0.82
19	C-19	300	8.97	132.33	1:10	2.87	0.39	0.64
20	C-20	300	11.35	101.70	1:10	3.98	0.26	0.39
22	C-22	300	0.25	12.54	1:10	0.84	0.22	0.27
25	C-25	300	0.69	159.80	1:10	2.26	1.69	1.00
26	C-26	300	0.59	159.80	1:10	2.26	1.81	1.00
27	C-27	300	0.60	98.29	1:10	1.39	1.11	1.00

Nro	ID	D (mm)	So (%)	Qmáx (l/s)	TQmáx (H:M)	Vmáx (m/s)	Qmáx/Qo	ymáx/D
28	C-28	300	2.77	21.35	1:10	1.71	0.11	0.23
29	C-29	200	0.52	9.82	1:10	0.81	0.35	0.41
30	C-30	300	8.83	42.81	1:10	3.29	0.13	0.24
31	C-31	250	0.31	17.09	1:10	0.54	0.43	0.62
32	C-32	250	0.79	59.65	1:10	1.46	0.95	0.78
33	C-33	300	10.82	59.67	1:10	3.89	0.16	0.27
34	C-34	300	14.99	102.36	1:10	3.94	0.23	0.66
35	C-35	300	0.38	67.41	1:10	0.95	0.96	1.00
36	C-36	200	7.35	27.15	1:10	2.54	0.26	0.37
37	C-37	200	7.36	35.32	1:10	1.51	0.34	0.70
38	C-38	250	2.19	13.91	1:10	1.47	0.13	0.31
39	C-39	250	1.51	47.97	1:10	1.50	0.56	0.79
40	C-40	250	1.31	32.01	1:10	1.34	0.40	0.50
41	C-41	250	0.80	10.69	1:10	0.67	0.17	0.36
42	C-42	250	0.94	31.63	1:10	1.17	0.46	1.00
43	C-43	250	0.74	40.72	1:10	0.95	0.67	1.00
44	C-44	250	0.60	70.37	1:10	1.43	1.30	1.00
45	C-45	250	0.75	83.45	1:10	1.70	1.37	1.00
46	C-46	250	0.76	98.19	1:10	2.04	1.60	1.00
47	C-47	250	11.37	200.57	1:10	4.26	0.84	1.00
48	C-48	250	4.99	203.13	1:10	4.14	1.29	1.00
49	C-49	400	0.22	522.45	1:10	4.16	4.57	1.00
50	C-50	300	3.83	25.74	1:10	2.11	0.12	0.23
51	C-51	150	2.96	26.03	1:10	1.97	0.84	0.70
52	C-52	300	0.86	181.14	1:10	2.56	1.71	1.00
53	C-53	200	9.26	71.91	1:10	3.95	0.61	0.56
65	C-65	250	4.18	226.35	1:10	4.61	1.57	1.00
86	C-86	150	8.42	9.84	1:10	2.35	0.19	0.29

Nro	ID	D (mm)	So (%)	Qmáx (l/s)	TQmáx (H:M)	Vmáx (m/s)	Qmáx/Qo	ymáx/D
87	C-87	150	10.87	9.82	1:10	1.14	0.16	0.49
92	C-92	200	4.03	5.25	1:10	1.62	0.07	0.16
95	C-95	200	11.68	5.25	1:10	1.05	0.04	0.22
97	C-97	200	4.88	16.38	1:10	1.38	0.19	0.41
117	C-117	250	4.77	21.59	1:10	2.10	0.14	0.26
122	C-122	250	11.73	10.49	1:10	1.22	0.04	0.23
123	C-123	300	5.31	40.95	1:10	1.69	0.16	0.38
124	C-124	300	2.35	83.10	1:10	2.24	0.47	0.52
125	C-125	300	6.19	169.06	1:10	4.20	0.59	0.56
126	C-126	300	78.77	13.57	1:10	5.44	0.01	0.08
129	C-129	300	13.28	28.92	1:10	3.39	0.07	0.18
135	C-135	400	10.00	291.22	1:10	5.75	0.37	0.42