

Auxiliar de ingeniería civil en ibg ingeniería para realizar diseños hidrológicos e hidráulicos del
proyecto Anillo Vial Externo Metropolitano Aeropuerto Palonegro Piedecuesta

Shary Zadith Vargas Velasco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

Sandra Rocío Villamizar Amaya

Ph.D. Sistemas Ambientales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Programa Académico

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este logro va dedicado a mis padres.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia que pudo hacer realidad este sueño, por su apoyo constante y ser mi fuente de inspiración, a mis amigas por su compañía y por creer en mi cuando yo misma dudaba de mis capacidades, y a Dios, por guiarme siempre por el camino correcto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Descripción proyecto	14
3. Metodología	17
3.1 Fase I: Calcular caudales de diseño para el área de estudio según lo establecido en la norma técnica del INVÍAS.....	17
3.1.1 Método racional	17
3.1.1.1 Coeficiente de escorrentía.....	18
3.1.1.2 Intensidad.....	20
3.1.1.2.1 Periodo de retorno.....	21
3.1.1.3 Tiempo de concentración.....	22
3.1.2 Método de hidrograma SCS.....	24
3.1.2.1 Número de curva.....	24
3.1.2.2 Hietograma.....	28
3.1.3 Método de transposición de caudales	28
3.2 Fase 2: Establecer las obras de arte hidráulicas requeridas para la implantación del proyecto.	29
3.2.1 Modelo de inundación.....	29

3.2.2 Localización obras de drenaje vial.....	30
3.2.2.1 Alcantarillas	30
3.2.2.2 Cunetas.....	31
3.2.2.3 Puentes y Culverts.....	31
3.3 Fase 3: Elaborar diseños de las obras hidráulicas siguiendo la norma técnica del INVÍAS. .	31
3.3.1. Diseño de cunetas	31
3.3.2. Diseño de alcantarillas y culverts	34
3.3.3. Diseño de Puentes	35
4. Resultados	36
4.1 Fase 1	36
4.2 Fase 2	39
4.3 Fase 3	41
5. Discusión.....	50
6. Conclusiones	52
Referencias Bibliográficas	54
Apéndices.....	56

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Localización general del proyecto.....	15
Figura 2 Localización tramo 1 de vía del estudio.....	16
Figura 3 Localización tramo 2 de vía del estudio.....	16
Figura 4 Valores del coeficiente de escorrentía en áreas urbanas	19
Figura 5 Valores del coeficiente de escorrentía en áreas rurales	20
Figura 6 Valores de los coeficientes a, b, c y d para Colombia.....	21
Figura 7 Periodos de retorno de diseño en obras de drenaje vial.....	22
Figura 8 Número de curva de escorrentía para áreas urbanas	25
Figura 9 Número de curva de escorrentía para áreas rurales	26
Figura 10 Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas.....	27
Figura 11 Sección triangular para cuneta.....	33
Figura 12 Sección rectangular para cuneta.....	33
Figura 13 Velocidades máximas permisibles en canales artificiales	35
Figura 14 Evidencia de cálculo de caudales de los cruces del primer tramo.....	37
Figura 15 Evidencia de cálculo de caudales de los cruces del segundo tramo.....	38
Figura 16 Tipo de estructura para el segundo tramo.....	40
Figura 17 Nivel Máximo de Aguas Extraordinarias de cada puente.....	41
Figura 18 Dimensiones alcantarillas.....	41
Figura 19 Dimensiones Box Culvert.....	42

Figura 20 Verificación controles hidráulicos.....	43
Figura 21 Cuneta triangular.	44
Figura 22 Calzada izquierda, cuneta izquierda.	45
Figura 23 Calzada izquierda, cuneta derecha.	46
Figura 24 Calzada derecha, cuneta izquierda.	47
Figura 25 Calzada derecha, cuneta derecha.	48
Figura 26 Localización alcantarillas.	49
Figura 27 Localización obras de drenaje vial en plano.....	50

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Manual para el cálculo del caudal de diseño	56
Apéndice B. Manual para realizar un modelo de inundación	56

Glosario

Impluvium: área de drenaje del terreno natural que aporta a la carretera.

Lag time (tiempo de rezago): tiempo que transcurre desde el inicio de una precipitación hasta que se alcanza el pico de la respuesta hidrológica en una cuenca hidrográfica simulada.

Gálibo: distancia vertical entre el punto más bajo de la viga de un puente y la lámina de agua correspondiente al caudal de diseño.

Descole: proceso de descarga controlada del agua de las estructuras hidráulicas asegurando que esta fluya hacia el cuerpo receptor de agua.

Socavación: proceso de erosión que se produce en los cauces de ríos generalmente como resultado de la acción del agua, lo cual puede debilitar estructuras cercanas, como puentes, alcantarillas y diques.

Resumen

Título: Auxiliar de ingeniería civil en ibg ingeniería para realizar diseños hidrológicos e hidráulicos del proyecto anillo vial externo metropolitano aeropuerto Palonegro Piedecuesta. *

Autor: Shary Zadith Vargas Velasco **

Palabras Clave: Obras de drenaje vial, diseño, INVÍAS, modelación, caudal de diseño, HEC-RAS, HEC-HMS.

Descripción: La práctica empresarial como auxiliar de ingeniería civil tuvo como propósito desarrollar diseños hidrológicos e hidráulicos críticos para la construcción y funcionamiento del Anillo Vial Externo Metropolitano, una carretera importante para la conexión vehicular entre el aeropuerto Palonegro y el municipio de Piedecuesta. Para realizar los diseños hidrológicos e hidráulicos se trabajó en tres fases; la primera, orientada al cálculo de caudales de diseño en puntos críticos utilizando los métodos establecidos según la norma técnica del INVÍAS; a partir de estos caudales se identificó las obras de arte hidráulicas requeridas para la implantación del proyecto (alcantarillas, cunetas y sistemas de drenaje pluvial). Finalmente, se realizó el diseño de dichas estructuras siguiendo rigurosamente las especificaciones del manual de drenaje del INVÍAS, asegurando su eficiencia y sostenibilidad. La experiencia de práctica empresarial permitió desarrollar y fortalecer competencias técnicas relacionadas con los diseños hidrológicos e hidráulicos asociados a la infraestructura vial; adicionalmente, el conocimiento de la normativa técnica relevante fue fundamental para asegurar el cumplimiento de estándares de calidad y seguridad. Estos dos componentes permitieron la identificación y planificación de obras hidráulicas críticas para manejar adecuadamente los sistemas de drenaje asociados a las aguas pluviales del proyecto vial. Como aporte al conocimiento, se desarrolló un manual para el cálculo de caudales de diseño y un manual para realizar un modelo de inundación con la herramienta HEC-HMS y HEC-RAS, respectivamente.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Programa académico.
Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D. en Sistemas Ambientales

Abstract

Title: Civil engineering assistant at IBG Engineering to carry out hydrological and hydraulic designs for the Palonegro Airport Piedecuesta Metropolitan Outer Ring Road project.*

Author(s): Shary Zadith Vargas Velasco**

Key Words: Road drainage works, design, INVÍAS, modeling, design flow rate, HEC-RAS, HEC-HMS.

Description: The purpose of my professional practice as a civil engineering assistant was to develop critical hydrological and hydraulic designs for the construction and operation of the Metropolitan External Ring Road, an important highway connecting Palonegro Airport with the municipality of Piedecuesta. The development of hydrological and hydraulic designs was divided into three phases. The first phase focused on calculating design flows at critical points using methods established by INVÍAS technical standards. Based on these flows, the necessary hydraulic structures for the project (culverts, ditches, and storm drainage systems) were identified. Finally, the design of these structures was carried out, strictly following the specifications of the INVÍAS drainage manual to ensure their efficiency and sustainability. This professional practice experience allowed the development and strengthening of technical skills related to hydrological and hydraulic designs associated with road infrastructure. Additionally, knowledge of the relevant technical standards was crucial to ensuring compliance with quality and safety standards. These two components enabled the identification and planning of critical hydraulic structures to properly manage the drainage systems associated with the project's stormwater. As a contribution to knowledge, a manual for calculating design flows and a manual for creating a flood model using the HEC-HMS and HEC-RAS tools were developed.

* Degree Work

**Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Academic Program. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D. in Environmental Systems

Introducción

Las obras hidráulicas desempeñan un papel fundamental en los diseños viales, ya que su correcta planificación y ejecución pueden tener un impacto significativo en la funcionalidad, durabilidad y seguridad de las carreteras y vías de comunicación. La correcta gestión del agua lluvia puede evitar inundaciones, minimizar el riesgo de deterioro de la capa de rodadura y contribuir a la preservación de la integridad de la infraestructura vial a lo largo del tiempo (Brown et al., 2009). Esto, a su vez, disminuye las necesidades de reparación de los daños causados por el agua, implicando menores costos operativos y de mantenimiento. Adicionalmente, las obras hidráulicas bien diseñadas y mantenidas ayudan a prevenir la contaminación del agua al evitar la descarga de aguas pluviales contaminadas en las fuentes de agua cercanas; esto ayuda a proteger los ecosistemas acuáticos y la calidad del agua (Fwa, 2006).

La empresa ibg ingeniería, surge en el año 2008 con el fin de dar respuesta a la evidente necesidad del país de generar proyectos y consultorías con gran nivel técnico, ofreciendo servicios en las especialidades de hidrogeología, hidráulica, geología, geotecnia y medio ambiente tales como el diseño de estructuras hidráulicas, manejo de caudales, estudios de socavación, hidrogeología, entre muchos otros. La empresa ha brindado su asistencia para importantes proyectos para empresas como la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) para la que realizó un plan de ordenamiento de recurso hídrico de las cuencas de Vetas, Tona y Angula, y un diagnóstico ambiental del río Lebrija. La empresa ibg Ingeniería trabajó con la constructora Saavar S.A.S para el estudio hidrológico e hidráulico de vías rurales en el municipio de Saladoblando (Huila), en el marco del programa Colombia Rural-

Nacional Fase II. En este proyecto se realizó el diseño de las obras hidráulicas de la vía. Actualmente la empresa está desarrollando un proyecto que consiste en diseñar obras de drenaje para la doble calzada de aproximadamente 28 kilómetros que conectará el aeropuerto Palonegro con el municipio de Piedecuesta. Para este proyecto, la empresa cuenta con un equipo de ingenieros calificado y capacitado para los diseños; sin embargo, le interesa vincular un estudiante en práctica que, a partir de sus conocimientos base de ingeniería civil y su dedicación de tiempo completo, apoye los procesos asociados a los cálculos hidrológicos e hidráulicos del proyecto. La función de la practicante dentro de la estructura técnica de la empresa, como auxiliar de ingeniería para este proyecto, fue la de calcular caudales de diseño y establecer y diseñar obras hidráulicas, siempre bajo la supervisión del tutor empresarial y el equipo de diseño. Esto implicó comprender las bases de conocimiento fundamentales para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas en entornos viales. Algunas de estas bases de conocimiento incluyen:

- ✓ Drenaje de carreteras: Es fundamental para prevenir la acumulación de agua en la superficie de la carretera, lo que podría causar deterioro del pavimento, reducir la visibilidad y aumentar el riesgo de accidentes (Arciniegas, 2004).

- ✓ Diseño hidráulico: Planificación de sistemas de drenaje que sean eficientes y efectivos para desviar el agua de la superficie de la carretera hacia los sistemas de drenaje adecuados.

- ✓ Alcantarillas: Estructuras de drenaje diseñadas para permitir el paso del agua debajo de carreteras. Consisten en tubos o canales enterrados que recogen y conducen el agua de lluvia o el flujo superficial, evitando la acumulación y el daño a la superficie de la vía.

✓ Cunetas: Canales a lo largo de los bordes de la carretera que recogen y conducen el agua de lluvia hacia puntos de drenaje adecuados, como alcantarillas o desagües pluviales. Ayudan a prevenir la acumulación de agua en la superficie de la carretera, mejorando así la seguridad y durabilidad de la vía.

✓ Box culvert: Estructuras prefabricadas utilizadas para cruzar corrientes de agua, arroyos o canales. Funcionan como puentes cerrados y permiten el paso del agua y otros fluidos bajo la carretera, proporcionando una solución eficaz para el drenaje en áreas donde se requiere un cruce vial (Carmona, 2013).

El Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) es la entidad encargada de la construcción, mantenimiento y administración de las carreteras de Colombia. Cuando se desarrolla un proyecto de infraestructura vial bajo la supervisión o regulación del INVÍAS, es importante seguir el marco normativo establecido por esta entidad. Para un proyecto que involucre el diseño y construcción de drenaje para carreteras, específicamente, se debe hacer referencia al "Manual de Drenaje para Carreteras" autoría del INVÍAS (INVÍAS, 2009). El manual proporciona pautas detalladas y especificaciones técnicas para el diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de drenaje en carreteras. Alguno de los aspectos que aborda este manual son estimación de caudales de diseño, selección de estructuras hidráulicas, criterios para la ubicación y diseño de obras de drenaje.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar diseños hidrológicos e hidráulicos de la infraestructura vial asociada al proyecto Anillo Vial Externo Metropolitano que conectará el aeropuerto Palonegro y el municipio de Piedecuesta.

1.2 Objetivos Específicos

Calcular caudales de diseño para el área de estudio según lo establecido en la norma técnica del INVÍAS.

Establecer las obras de arte hidráulicas requeridas para la implantación del proyecto.

Elaborar diseños de las obras hidráulicas siguiendo la norma técnica del INVÍAS.

2. Descripción proyecto

El proyecto aborda el manejo de aguas lluvias que afectan el proyecto vial en consideración. Comienza con una recopilación de información secundaria, seguida de un análisis detallado de los datos provenientes de las estaciones más representativas. Utilizando las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para los periodos de retorno establecidos se determinaron los caudales máximos. El IDEAM proporciona los datos pluviométricos necesarios para calcular la intensidad de las curvas IDF.

Además, se llevó a cabo la identificación del tipo de suelo y cobertura de influencia en la escorrentía, elementos cruciales para comprender el comportamiento hidrológico de la zona de estudio. A partir de esta información, se realizó la modelación de la fuente de las aguas pluviales, buscando establecer un manejo adecuado para su conducción y disposición final.

Los cálculos y resultados obtenidos del estudio hidrológico son fundamentales para el diseño hidráulico de obras de drenaje necesarias para mitigar los efectos de las aguas lluvias sobre la vía. Dichas estructuras fueron diseñadas siguiendo las recomendaciones del manual de drenaje del INVÍAS, garantizando así su eficacia y durabilidad.

Los tramos de vía en estudio hacen parte del proyecto de la vía alterna Girón – Piedecuesta cuya localización general se presenta en la Figura 1 y específicamente se localizan a lo largo del corredor vial existente entre el Municipio de Girón y Piedecuesta, vía que comunica desde el sector de la Cárcel de Máxima Seguridad de Palogordo y el Club de Pesca Bahía Guatiguará. Los tramos estudiados se distribuyen de la siguiente manera: Tramo 1, como se ve en la Figura 2 (km00+000-km11+740) y Tramo 2, como se ve en la Figura 3 (km11+740-km27+386).

Figura 1

Localización general del proyecto



Nota. Tomado de la información base del Proyecto.

Figura 2

Localización tramo 1 de vía del estudio.



Nota. Tomado de la información base del Proyecto.

Figura 3

Localización tramo 2 de vía del estudio



Nota. Tomado de la información base del Proyecto.

3. Metodología

3.1 Fase I: Cálculo de caudales de diseño para el área de estudio según lo establecido en la norma técnica del INVÍAS.

El caudal máximo es el insumo principal al diseñar obras de drenaje vial porque determina la capacidad necesaria de los sistemas de drenaje para manejar el agua lluvia durante dichos eventos. De acuerdo con el INVÍAS subtítulo 2.5.5 (INVÍAS, 2009), se puede calcular el caudal máximo utilizando métodos de lluvia-escorrentía y se sugieren dos métodos específicos según el tamaño del área de la cuenca, los cuales son el método racional y el método del hidrograma de escorrentía superficial. En el manual para el cálculo de caudal de diseño que se realizó durante la práctica empresarial se detalla el paso a paso del procedimiento (Apéndice A).

3.1.1 Método racional

El método racional se basa en principios racionales y lógicos para estimar el flujo de agua que se genera por la precipitación sobre un área determinada si esta es menor a 2.5 km² (INVÍAS, 2009). Este caudal máximo se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

donde:

- Q: Caudal de escorrentía superficial, en metros cúbicos por segundo (m³/s).
- i: Intensidad de precipitación, en milímetros por segundo (mm/s).

- A: Área de drenaje de la cuenca, en kilómetros cuadrados (Km^2)
- C: Coeficiente de escorrentía

3.1.1.1 Coeficiente de escorrentía. El coeficiente de escorrentía es una medida que representa la proporción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial en lugar de infiltrarse en el suelo. Este coeficiente depende de varios factores, como el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno, entre otros (Arciniegas, 2004).

El uso de la fórmula racional está condicionado por este coeficiente, el cual se puede consultar en tablas específicas creadas con ese propósito. En las Figura 4 y

Figura 5 se presentan valores estándar de este coeficiente para zonas urbanas y rurales, respectivamente.

Figura 4*Valores del coeficiente de escorrentía en áreas urbanas*

TIPO DE ÁREA DE DRENAJE	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA C
PRADOS	
Suelos arenosos, planos, 2%	0.05 - 0.10
Suelos arenosos, promedio, 2 -7 %	0.15 - 0.20
Suelos pesados (arcillosos), planos, 2%	0.13 - 0.17
Suelos pesados (arcillosos), promedio, 2 -7 %	0.18 - 0.22
Suelos pesados (arcillosos), pendientes, 7%	0.25 - 0.35
DISTRITOS COMERCIALES	
Áreas de centro de ciudad	0.70 - 0.95
Áreas vecinas	0.50 - 0.70
RESIDENCIAL	
Casas individuales separadas	0.30 - 0.50
Casas multifamiliares separadas	0.40 - 0.60
Casas multifamiliares unidas	0.60 - 0.75
Suburbana	0.25 - 0.40
Áreas de apartamentos de vivienda	0.50 - 0.70
INDUSTRIAL	
Áreas livianas	0.50 - 0.80
Áreas pesadas	0.60 - 0.90
PARQUES CEMENTERIOS	0.10 - 0.25
CAMPOS DE JUEGOS	0.20 - 0.35
ÁREAS DE PATIOS DE FERROCARRILES	0.20 - 0.40
ÁREAS NO DESARROLLADAS	0.10 - 0.30
CALLES	
Asfaltadas	0.70 - 0.95
Concreto	0.80 - 0.95
Ladrillo	0.70 - 0.85
CALZADAS Y ALAMEDAS	0.75 - 0.85
TECHOS	0.75 - 0.95

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

Figura 5

Valores del coeficiente de escorrentía en áreas rurales

VEGETACIÓN Y TOPOGRAFÍA Y	TEXTURA DEL SUELO		
	FRANCO ARENOSO	FRANCO LIMO ARCILLOSO	ARCILLOSO
BOSQUES			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.25	0.35	0.50
Montañoso	0.30	0.50	0.60
PASTOS			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Montañoso	0.22	0.42	0.60
TIERRAS CULTIVADAS			
Plano	0.30	0.50	0.60
Ondulado	0.40	0.60	0.70
Montañoso	0.52	0.72	0.82
Nota: Plano (pendiente 0 - 5%); Ondulado (pendiente 5 - 10%); Montañoso (pendiente 10 - 30%). Para valores mayores al 30 %, a falta de datos, utilizar los valores para pendientes entre el 10 y el 30 %.			

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

3.1.1.2 Curvas IDF. Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia son herramientas utilizadas en hidrología para estimar la intensidad máxima de precipitación en función de la duración de la lluvia y la frecuencia con la que se espera que ocurra un evento de cierta magnitud. para obtenerlas el INVÍAS recomienda usar la metodología simplificada cuando no se disponga de datos pluviográficos en el sitio de estudio. El numeral 2.6.6.3 del manual da la expresión:

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c} \quad (2)$$

donde:

- i : Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).
- T : Periodo de retorno, en años.
- M : Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual
- t : Duración de la lluvia, tiempo de concentración en minutos (min).
- a, b, c, d : Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados y, teniendo en cuenta que el área de estudio está localizada en la región Andina, sus valores se presentan en la Figura 6.

Figura 6

Valores de los coeficientes a, b, c y d para Colombia

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

3.1.1.2.1. Periodo de retorno. En proyectos de drenaje vial, se deben emplear los siguientes periodos de retorno para determinar los caudales máximos instantáneos (Figura 7).

Figura 7

Periodos de retorno de diseño en obras de drenaje vial

TIPO DE OBRA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS) ¹
Cunetas	5
Zanjas de Coronación ²	10
Estructuras de Caída ²	10
Alcantarillas de 0.90 m de diámetro	10
Alcantarillas mayores a 0.90 m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10 m)	25
Puentes de luz mayor o igual a 10 m y menor a 50 m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50 m	100
Drenaje subsuperficial	2

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

3.1.1.3 Tiempo de concentración. El tiempo de concentración se define como el período que el agua requiere para fluir desde los límites más alejados de la cuenca hasta su punto de salida (Arciniegas, 2004). Esta medida es fundamental para determinar la intensidad de la precipitación de la anterior sección. Existen varias ecuaciones empíricas para calcular el tiempo de concentración, algunas son:

Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (3)$$

Ecuación de Témez

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (4)$$

Ecuación de Giandotti

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{25.3(L \cdot S)^{0.5}} \quad (5)$$

donde:

- A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km²).
- L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).
- S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

En algunos casos, los valores de tiempo de concentración varían demasiado por lo que si la diferencia entre ellas es de más del 150% se promedian los valores, de lo contrario se usa la mayor, y por recomendación del manual de drenaje según el subtítulo 2.1 se tomará como mínimo un tiempo de concentración igual a 15 minutos para considerar el inicio del proceso de concentración del agua en una cuenca y evitar así sobreestimar la intensidad de la precipitación, especialmente con valores calculados por debajo de este umbral.

3.1.2 Método de hidrograma SCS

Es una técnica utilizada para estimar la escorrentía superficial con diferentes coberturas de suelo y condiciones de uso de la tierra por tormenta o precipitación en una cuenca de más de 2.5 km², el manual de drenaje para carreteras recomienda aplicar metodologías computacionales, como la ofrecida por el programa HEC-HMS (US Army Corps of Engineers & Hydrologic Engineering Center, 2024).

3.1.2.1 Número de curva. El número de curva (CN) representa la capacidad de retención de agua lluvia en el suelo. Su valor depende de la cobertura (y su estado) y del grupo hidrológico de suelo. Esta capacidad se representa por un número adimensional de 1 a 100 donde, los mayores valores indican reducción en la capacidad de infiltración resultando en que, para un evento de tormenta, casi toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial. El CN se puede estimar sencillamente mediante el uso de las Figura 8 (áreas urbanas),

Figura 9 (áreas rurales) y

Figura 10 (otras tierras agrícolas). El grupo hidrológico de suelo tiene cuatro categorías (A, B, C, y D) y se puede obtener de mapas de suelos. La descripción de estos grupos es:

- A: Consisten en arenas o gravas profundas, caracterizadas por un drenaje excepcionalmente eficiente. Tienen una alta capacidad de transmisión de agua.
- B: Suelos con moderada a buena capacidad de drenaje, compuestos por texturas que van de moderadamente finas a moderadamente gruesas, y con una permeabilidad que varía de moderadamente lenta a moderadamente rápida. Estos suelos exhiben tasas moderadas de transmisión de agua.
- C: Consisten en suelos con texturas moderadamente finas a finas, caracterizados por una infiltración lenta o por tener niveles freáticos moderados.
- D: Estos suelos están compuestos por arcillas con un alto potencial de expansión, presentan un nivel freático permanentemente alto y tienen un estrato superficial arcilloso.

Figura 8

Número de curva de escorrentía para áreas urbanas

TIPO DE COBERTURA Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA	% PROMEDIO ÁREAS IMPERMEABLES ¹	NUMERO DE CURVAS PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación ya establecida):					
Espacios abiertos (prados, parques, campos de golf, cementerios, etc.) ²					
Condición pobre (menos del 50% cubierto de pasto)		68	79	86	89
Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pasto)		49	69	79	84
Condición buena (más del 75% cubierto de pasto)		39	61	74	80
Áreas impermeables:					
Parqueaderos pavimentados, techos, autopistas, etc. (excluyendo derecho de vía)		98	98	98	98
Calles y caminos:					
Pavimentados		98	98	98	98
Pavimentados; zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía)		83	89	92	93
Grava (incluyendo derecho de vía)		76	85	89	91
Tierra (incluyendo derecho de vía)		72	82	87	89
Áreas desiertas urbanas:					
Paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) ³		63	77	85	88
Paisajes desérticos artificiales (barreras impermeables de maleza, arbustos de desierto con 1 a 2 pulg de diámetro; Cubierta de arena o grava y orillas de áreas húmedas)		96	96	96	96
Áreas urbanas:					
Comercial y de negocios	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote:					
1/8 de acre o menos (506 m ² o menos)	65	77	85	90	92
1/4 acre (1012 m ²)	38	61	75	83	87
1/3 acre (1350 m ²)	30	57	72	81	86
1/2 acre (2025 m ²)	25	54	70	80	85
1 acre (4050 m ²)	20	51	68	79	84
2 acre (8100 m ²)	12	46	65	77	82
Áreas urbanas desarrolladas:					
Áreas permeables conformadas (solamente áreas permeables, sin vegetación)		77	86	91	94

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

Figura 9

Número de curva de escorrentía para áreas rurales

COBERTURA		CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPO DE SUELOS			
USO DE LA TIERRA	TRATAMIENTO O PRÁCTICA		A	B	C	D
			NÚMERO DE CURVA			
Rastrojo	Hileras Rectas	---	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras Rectas	Mala	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

Figura 10

Número de curva de escorrentía de otras tierras agrícolas.

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	NÚMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo ¹	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno	---	30	58	71	78
Maleza mezclada con pasto de semilla con la maleza como principal elemento ²	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30 ³	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁴	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques ⁵	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	---	59	74	82	86

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

Este método necesita de las coberturas y el tipo de suelo para calcular el número de curva; dicha información se puede obtener del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) o de Corporaciones Autónomas Ambientales del país.

3.1.2.2 Hietograma. Un hietograma es básicamente un gráfico que muestra la distribución de la precipitación a lo largo del tiempo. Este se deriva en un hidrograma, que muestra el caudal de un río o arroyo a lo largo del tiempo en respuesta a la precipitación. La transformación del hietograma en un hidrograma es posible mediante el uso de un modelo de lluvia-escorrentía, que simula cómo la precipitación se convierte en escorrentía y afecta el flujo del agua en un cauce.

3.1.3 Método de transposición de caudales

El método de transposición de caudales es una técnica utilizada en hidrología para estimar los caudales de un río o cuenca hidrográfica basándose en la información disponible de una cuenca cercana o similar. Este método es particularmente útil en áreas donde no se tienen datos históricos

suficientes o estaciones hidrométricas disponibles. Para aplicar esta metodología, es crucial que la diferencia en las áreas de drenaje no supere el 50%. Además, las características hidrológicas y climatológicas deberán ser similares entre la cuenca de aplicación y la de referencia, donde la cuenca de referencia es la cuenca con datos hidrológicos conocidos y la cuenca de aplicación es la cuenca para la cual se desea estimar el caudal (INVÍAS, 2009).

$$Q_{SP} = Q_{EH} \cdot \left(\frac{A_{SP}}{A_{EH}} \right)^x$$

donde:

- QSP: Caudal en el sitio de aplicación (m³/s).
- QEH: Caudal en la estación hidrométrica (m³/s).
- ASP: Área de la cuenca hasta el sitio de aplicación (km²).
- AEH: Área de la cuenca hasta la estación hidrométrica (km²).

La variable x usualmente oscila entre 0.5 y 0.75. En casos donde no hay datos de investigación disponibles, se suele adoptar un valor estándar de 0.5.

3.2 Fase 2: Establecer las obras de arte hidráulicas requeridas para la implantación del proyecto.

3.2.1 Modelo de inundación

Realizar un modelo de inundación para un puente es fundamental para evaluar la vulnerabilidad del puente ante eventos extremos de inundación. Estos modelos hidráulicos

permiten estimar la altura y el alcance del agua durante inundaciones lo que ayuda a determinar si el puente está en riesgo de daños estructurales o colapso. Además, proporcionan información crucial para el diseño y la planificación de medidas de mitigación y protección, como la elevación del puente, la instalación de defensas contra inundaciones o la implementación de sistemas de alerta temprana. En resumen, realizar un modelo de inundación para un puente es esencial para garantizar su seguridad y funcionalidad frente a condiciones hidrológicas extremas.

El INVÍAS recomienda usar el programa HEC-RAS, que es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para el modelado hidráulico de ríos y sistemas fluviales (US Army Corps of Engineers, 2010). Esta herramienta se utiliza ampliamente en ingeniería hidráulica para simular el flujo del agua, predecir inundaciones y evaluar la capacidad de los puentes y otras estructuras hidráulicas.

3.2.2 Localización de obras de drenaje vial

3.2.2.1 Alcantarillas. Las alcantarillas se ubican en diferentes puntos a lo largo de las vías para permitir el paso del agua lluvia bajo la carretera y prevenir la acumulación de agua en la superficie de esta. Algunos lugares comunes donde se pueden encontrar alcantarillas en las vías incluyen:

En puntos donde la carretera cruza una afluyente para permitir que el agua fluya bajo la vía sin obstaculizar el tráfico.

En puntos bajos de la carretera donde pasa de una pendiente longitudinal negativa a una positiva, se instalan alcantarillas para recoger y drenar el agua de lluvia acumulada.

Cada cierta distancia, preferiblemente entre 150 y 200 metros, para drenar el agua de las cunetas de la carretera hacia cursos de agua naturales o sistemas de drenaje pluvial, siempre y cuando tenga dirección de descole, también se hace para la facilidad de mantenimiento de la vía.

3.2.2.2 Cunetas. Las cunetas son estructuras de drenaje diseñadas para recoger las aguas de escorrentía superficial de la plataforma de la vía y los taludes de corte, guiándolas a lo largo de la vía para asegurar su adecuada evacuación. En zonas de terraplén, también protegen los bordes de la berma y los taludes contra la erosión provocada por las lluvias, y a menudo se utilizan para prolongar las cunetas de corte hasta corrientes naturales donde se descargan dichas aguas.

3.2.2.3 Puentes y Culverts. Las obras se colocan estratégicamente en los puntos de cruce de afluentes o ríos con la vía. La selección del tipo de estructura se basa en varios factores, incluida la rasante de la vía. Por ejemplo, para la construcción de puentes, se sigue la normativa del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, sección 7.1.1, que establece que el gálibo debe estar al menos 2.5 metros por encima del Nivel Máximo de Aguas Extraordinarias también conocido como NAME. Si no cumple este criterio se propone culverts.

3.3 Fase 3: Elaborar diseños de las obras hidráulicas siguiendo la norma técnica del INVÍAS.

3.3.1. Diseño de cunetas

La sección 4.2.4.1 del INVÍAS detalla que el diseño de la cuneta implica verificar que su capacidad hidráulica, calculada con la fórmula de Manning, sea mayor que el caudal de diseño. La fórmula de Manning es la siguiente:

$$Q = \frac{1}{n} (A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2})$$

donde:

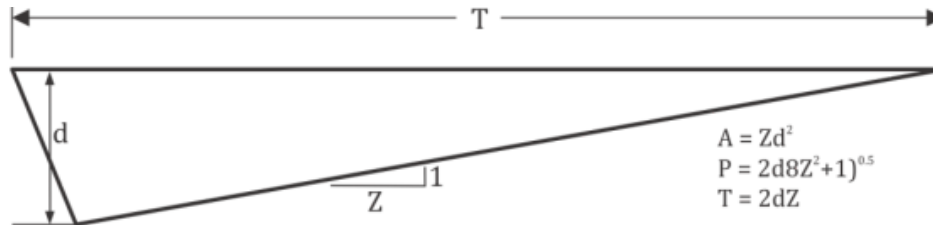
- Q: Caudal de diseño (m³/s).
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning.
- A: Área mojada (m²).
- R: Radio hidráulico (m).
- S: Pendiente (m/m)

La sección triangular (Figura 11) es recomendada debido a su facilidad de construcción; sin embargo, es necesario limitar las dimensiones de las cunetas. El Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible de España establece que la pendiente máxima del lado de la calzada debe ser de 5H:1V, mientras que la del lado del talud debe ser de 3H:2V (Ministerio de Fomento & Dirección general de carreteras, 2019); sin embargo, el Ministerio de Transportes de Brasil suele recomendar limitar la pendiente del lado de la calzada a un máximo del 25% (Ministério dos Transportes do Brasil, 2006). Otras normas limitan la pendiente del lado de la calzada a 4H:1V y la profundidad a 20 cm o a 1/5 del ancho total (Mays, 1999).

A nivel nacional, las dimensiones típicas de una cuneta triangular son de 1 m de ancho y 0,2 m de profundidad, formando un vértice de 90° y logrando una pendiente lateral de 20,8%. Estas dimensiones pueden modificarse, siempre y cuando la pendiente no exceda el 25%.

Figura 11

Sección triangular para cuneta.

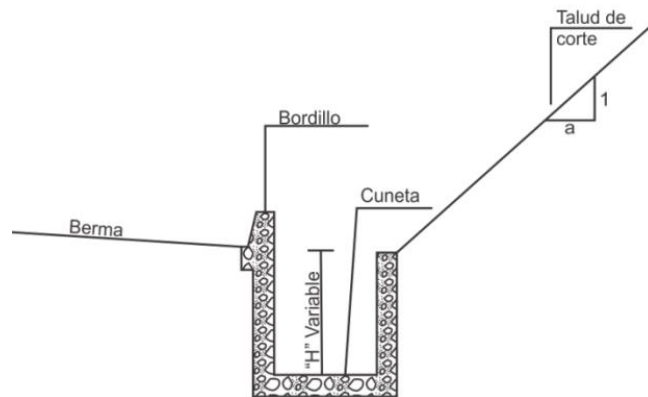


Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

Una opción adicional, en caso de que la cuneta triangular no tenga la capacidad hidráulica suficiente, es emplear cunetas rectangulares (Figura 12).

Figura 12

Sección rectangular para cuneta.



Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

3.3.2. Diseño de alcantarillas y culverts

El INVÍAS, en la sección 4.4.8, recomienda el uso del software HY8 (Federal Highway Administration, 2024) para el análisis y diseño de alcantarillas. Este software facilita la introducción de datos concernientes a la geometría de la carretera y los caudales. A partir de estos datos, se asumen las dimensiones y el tipo de alcantarilla, ajustando estos parámetros hasta verificar que no se presente la condición de sumergencia (fenómeno en el cual el agua llena completamente la sección transversal de la alcantarilla). Las condiciones de sumergencia ocurren cuando los valores de H_w/D exceden el rango de 1.20 a 1.50, donde H_w representa la carga de entrada y D es el diámetro o altura de la estructura. También es necesario verificar que no se supere la velocidad máxima permisible de acuerdo con el material de construcción de la alcantarilla de acuerdo con la Figura 13.

Figura 13

Velocidades máximas permisibles en canales artificiales

MATERIAL	VELOCIDAD MÁXIMA (m/s)
Ladrillo común	3.0
Ladrillo vitrificado	5.0
Arcilla vitrificada (gres)	4.0
Concreto 175 kg/cm ²	6.0
Concreto 210 kg/cm ²	10.0
Concreto 280 kg/cm ²	15.0
Concreto 350 kg/cm ²	20.0

Nota. Tomado del Manual de Drenaje para Carreteras, 2009, INVÍAS.

3.3.3. Diseño de Puentes

En el diseño de carreteras, a veces es necesario construir estructuras especiales para poder seguir el diseño planeado, especialmente cuando la topografía del terreno presenta desafíos que impiden una construcción directa. Estas obras especiales se construyen para permitir un diseño seguro y cómodo de la carretera, a pesar de las dificultades en la geometría del terreno. Para estos casos, se establecen criterios básicos para el diseño geométrico, sin dejar de cumplir en ningún momento con las normas y guías específicas.

Para corrientes de agua que puedan transportar desechos, troncos u otros objetos voluminosos en ciertos períodos, se recomienda que el gálibo tenga una altura mínima de 2.50 metros por encima del NAME, según lo especificado en la sección 7.1.1 del manual de diseño geométrico de carreteras. Este cálculo se realiza utilizando herramientas especializadas como el programa HEC-RAS, que permite modelar hidráulicamente el comportamiento de los cuerpos de

agua y determinar la altura adecuada del gálibo para garantizar la seguridad y funcionalidad de la estructura vial. El (Apéndice B) presenta una guía metodológica que se elaboró para facilitar la realización de un modelo de inundación.

4. Resultados

4.1 Fase 1

Para el primer tramo se calcularon, en total, los caudales de 27 cruces para diferentes tiempos de retorno; 23 por modelo racional, 3 por método del hidrograma SCS mediante el software HEC-HMS y 1 por transposición de caudal (Figura 14).

Para el segundo tramo se calcularon en total los caudales de 35 cruces; 30 por método racional y 6 por método del hidrograma SCS mediante el software HEC-HMS (Figura 15).

Figura 14

Evidencia de cálculo de caudales de los cruces del primer tramo.

No.	Abscisa derecha	Abscisa izquierda	Área (km ²)	Método análisis	CAUDAL				
					Q10años (m ³ /s)	Q20años (m ³ /s)	Q25años (m ³ /s)	Q50años (m ³ /s)	Q100años (m ³ /s)
1	K0+050	K0+090	0.635	Racional	11.452	12.974	13.505	15.300	17.333
2	K0+200	K0+215	0.056	Racional	1.399	1.585	1.650	1.869	2.118
3	K0+425	K0+440	0.685	Racional	11.167	12.651	13.169	14.919	16.902
4	K0+925	K0+940	0.184	Racional	2.292	2.597	2.703	3.062	3.469
5	K1+460	K1+490	0.513	Racional	9.969	11.294	11.757	13.319	15.089
6	K1+720	K1+740	0.332	Racional	7.581	8.589	8.941	10.129	11.475
7	K2+120	K2+135	3.893	Hidrograma SCS			28		49,4
8	K2+655	K2+665	0.148	Racional	2.156	2.443	2.543	2.881	3.263
9	K3+100	K3+120	0.137	Racional	1.992	2.257	2.350	2.662	3.015
10	K3+430	K3+460	0.401	Racional	7.068	8.008	8.336	9.444	10.699
11	K3+925	K3+945	0.134	Racional	2.791	3.162	3.291	3.728	4.224
12	K4+015	K4+025	0.376	Racional	5.191	5.881	6.122	6.936	7.857
13	K4+890	K4+910	2.713	Hidrograma SCS			14.1		26.7
14	K5+145	K5+150	1.231	Racional	18.650	21.128	21.994	24.917	28.228
15	K5+660	K5+675	0.015	Racional	0.296	0.335	0.349	0.395	0.448
16	K5+900	K5+920	0.073	Racional	1.238	1.402	1.460	1.654	1.873
17	K6+130	K6+150	0.235	Racional	3.176	3.598	3.745	4.243	4.807
18	K6+350	K6+370	1.635	Racional	16.578	18.781	19.551	22.149	25.093
19	K7+140	K7+170	1.874	Racional	22.942	25.990	27.055	30.651	34.724
20	K7+510	K7+535	0.330	Racional	5.410	6.129	6.381	7.228	8.189
21	K8+255	K8+300	0.057	Racional	0.872	0.988	1.029	1.165	1.320
22	K8+520	K8+560		Transposición de caudal					476.686
23	K8+720	K8+760	0.008	Racional	0.176	0.199	0.208	0.235	0.267
24	ROUND POINT		0.046	Racional	0.723	0.819	0.852	0.965	1.094
25	K0+550	K0+550	2.608	Hidrograma SCS		12.8			
26	K0+680	K0+680	2.008	Racional	14.392	16.304	16.972	19.228	21.783
27	K0+900	K0+900	0.031	Racional	0.477	0.541	0.563	0.638	0.723

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Figura 15

Evidencia de cálculo de caudales de los cruces del segundo tramo.

No.	Abscisa derecha	Abscisa izquierda	Área (Km2)	Método análisis	CAUDAL				
					Q10años (m3/s)	Q20años (m3/s)	Q25años (m3/s)	Q50años (m3/s)	Q100años (m3/s)
1	14+090	14+080	5.936	Hidrograma SCS		22.3			
2	14+235	14+235	0.047	Racional	0.646	0.732	0.762	0.864	0.978
3	14+710	14+715	11.398	Hidrograma SCS		32.2			
4	15+380	15+400	0.233	Racional	3.781	4.283	4.459	5.051	5.723
5	16+185	16+185	1.310	Racional	15.300	17.333	18.043	20.441	23.157
6	16+700	16+710	0.198	Racional	3.438	3.895	4.055	4.593	5.204
7	17+520	17+505	0.184	Racional	3.371	3.819	3.975	4.503	5.102
8	17+920	17+910	0.146	Racional	2.906	3.292	3.427	3.883	4.399
9	18+190	18+175	0.180	Racional	3.089	3.499	3.643	4.127	4.675
10	18+390	18+385	0.564	Racional	10.651	12.066	12.561	14.230	16.121
11	18+690	18+690	0.032	Racional	0.656	0.743	0.773	0.876	0.993
12	18+900	18+890	0.057	Racional	1.181	1.338	1.393	1.578	1.788
13	19+020	19+020	2.157	Racional	24.653	27.929	29.074	32.938	37.314
14	19+560	19+560	0.047	Racional	0.975	1.105	1.150	1.303	1.476
15	19+690	19+680	0.025	Racional	0.507	0.575	0.598	0.678	0.768
16	18+840	19+835	0.501	Racional	10.312	11.682	12.161	13.777	15.607
17	20+450	20+410	0.046	Racional	0.869	0.984	1.025	1.161	1.315
18	20+580	20+580	0.339	Racional	8.256	9.353	9.736	11.030	12.496
19	21+000	20+980	0.188	Racional	4.180	4.736	4.930	5.585	6.327
20	21+020	21+010	0.128	Racional	2.837	3.214	3.346	3.790	4.294
21	21+230	21+210	0.001	Racional	0.045	0.050	0.052	0.059	0.067
22	21+360	21+360	50.159	Hidrograma SCS					118.3
23	21+780	21+760	1.770	Racional	15.263	17.291	18.000	20.391	23.101
24	22+240	22+320	1.581	Racional	15.007	17.002	17.698	20.050	22.715
25	22+410	22+380	0.038	Racional	0.768	0.870	0.905	1.025	1.162
26	22+480	22+480	0.027	Racional	0.662	0.750	0.781	0.885	1.002
27	22+785	22+780	0.014	Racional	0.220	0.250	0.260	0.294	0.333
28	22+850	22+850	0.037	Racional	0.442	0.500	0.521	0.590	0.668
29	23+115	23+110	8.648	Hidrograma SCS				56	
30	23+525	23+535	2.011	Racional	20.198	22.882	23.820	26.985	30.571
31	24+245	24+280	80.706	Hidrograma SCS				153.8	202.3
32	25+840	25+835	0.017	Racional	0.286	0.325	0.338	0.383	0.434
33	26+180	26+160	0.035	Racional	0.414	0.469	0.488	0.553	0.627
34	26+225	26+220	2.507	Hidrograma SCS		21			
35	26+980		0.011	Racional	0.271	0.307	0.319	0.362	0.410

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras

Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Como aporte al conocimiento, se elaboró un manual exhaustivo que detalla el proceso para calcular los caudales de diseño utilizando el método racional y el método del hidrograma SCS. Este manual servirá como una herramienta para los nuevos empleados, facilitando su capacitación rápida y efectiva al proporcionar procedimientos estandarizados y ejemplos prácticos. Además, al ofrecer un recurso claro y accesible, el manual optimiza el aprendizaje autodidacta, asegura la consistencia y calidad en el trabajo, y permite a los nuevos integrantes del equipo resolver dudas y realizar cálculos precisos con mayor confianza.

4.2 Fase 2

Debido a que el ente gubernamental sigue haciendo estudios y van a reubicar el primer tramo por exceso de costos en el movimiento de tierras, se decidió parar el diseño del primer tramo de la vía. Por lo tanto, solo se realizó el cálculo de caudales para el primer tramo.

Para el segundo tramo se propusieron las siguientes estructuras para tanto la calzada derecha como la calzada izquierda: 10 alcantarillas, 17 box culverts, 7 puentes (Figura 16).

Figura 16

Tipo de estructura para el segundo tramo.

NO.	ABSCISA DERECHA	ABSCISA IZQUIERDA	ESTRUCTURA	NO.	ABSCISA DERECHA	ABSCISA IZQUIERDA	ESTRUCTURA
1	14+089.73	14+080	Box culvert	18	20+579.73	20+580	Box culvert
2	14+235	14+235	Alcantarilla	19	21+000	20+980	Box culvert
3	14+709.73	14+715	Box culvert	20	21+020	21+010	Box culvert
4	15+380	15+400	Box culvert	21	21+230	21+210	Alcantarilla
5	16+185	16+185	Box culvert	22	21+360	21+360	Puente
6	16+699.73	16+710	Box culvert	23	21+779.73	21+760	Box culvert
7	17+520	17+505	Box culvert	24	22+319.73	22+320	Box culvert
8	17+920	17+910	Box culvert	25	22+409.73	22+380	Alcantarilla
9	18+189.73	18+175	Puente	26	22+479.73	22+480	Alcantarilla
10	18+390	18+385	Puente	27	22+785	22+780	Alcantarilla
11	18+689.73	18+690	Puente	28	22+849.73	22+850	Alcantarilla
12	18+900	18+890	Box culvert	29	23+115	23+110	Puente
13	19+020	19+020	Puente	30	23+525	23+535	Box culvert
14	19+560	19+560	Box culvert	31	24+245	24+280	Puente
15	19+689.73	19+690	Alcantarilla	32	25+839.73	25+835	Alcantarilla
16	19+839.73	19+835	Box culvert	33	26+179.73	26+160	Alcantarilla
17	20+450	20+410	Alcantarilla	34	26+225	26+220	Box culvert

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Se calcularon los NAME de cada puente del segundo tramo para saber la altura de este (Figura 17). El diseño como tal del puente no compete con las actividades de la empresa.

De la misma forma, se desarrolló un manual completo que desglosa el proceso de creación de un modelo de inundación en HEC-RAS, proporcionando una guía paso a paso. Este manual está diseñado para simplificar el uso del software, ofreciendo instrucciones precisas y ejemplos que facilitan el aprendizaje.

Figura 17

Nivel Máximo de Aguas Extraordinarias de cada puente.

No.	Abscisa derecha	Abscisa izquierda	NAME
9	18+189.73	18+175	864.53
10	18+390	18+385	861.31
11	18+689.73	18+690	873.59
13	19+020	19+020	859.16
22	21+360	21+360	874.06
29	23+115	23+110	887
31	24+245	24+280	898.06

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

4.3 Fase 3

Para el segundo tramo se diseñaron las dimensiones de obras hidráulicas de cruces de drenaje (Figura 18 y Figura 19).

Figura 18

Dimensiones alcantarillas.

No.	Abscisa Derecha	Abscisa izquierda	CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA		
			Estructura	Material	DIMENSIONES
					Diámetro (m)
2	14+235	14+235	Alcantarilla	Concreto	0.9
15	19+690	19+680	Alcantarilla	Concreto	0.9
17	20+450	20+410	Alcantarilla	Concreto	0.9
21	21+230	21+230	Alcantarilla	Concreto	0.9
25	22+410	22+380	Alcantarilla	Concreto	0.9
26	22+480	22+480	Alcantarilla	Concreto	0.9
27	22+785	22+780	Alcantarilla	Concreto	0.9
28	22+850	22+850	Alcantarilla	Concreto	0.9
32	25+840	25+835	Alcantarilla	Concreto	0.9
33	26+180	26+160	Alcantarilla	Concreto	0.9

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Figura 19

Dimensiones Box Culvert.

No.	Abscisa Derecha	Abscisa izquierda	CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA			
			Estructura	Material	DIMENSIONES	
					Base (m)	Altura (m)
1	14+090	14+080	Box culvert	Concreto	3	3
3	14+710	14+715	Box culvert	Concreto	3.5	3.5
4	15+380	15+400	Box culvert	Concreto	2	1.5
5	16+185	16+185	Box culvert	Concreto	3	2.5
6	16+700	16+710	Box culvert	Concreto	2	1.5
7	17+520	17+505	Box culvert	Concreto	2	1.5
8	17+920	17+910	Box culvert	Concreto	2	1.5
12	18+900	18+890	Box culvert	Concreto	1	1
14	19+560	19+560	Box culvert	Concreto	1	1
16	19+840	19+835	Box culvert	Concreto	2.5	2.5
18	20+580	20+580	Box culvert	Concreto	2.5	2
19	21+000	20+980	Box culvert	Concreto	2	2
20	21+020	21+010	Box culvert	Concreto	1.5	1.5
23	21+780	21+760	Box culvert	Concreto	3	2.5
24	22+320	22+320	Box culvert	Concreto	3	2.5
30	23+525	23+535	Box culvert	Concreto	3	3
34	26+225	26+220	Box culvert	Concreto	3	3

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

La eficiencia hidráulica se evalúa utilizando el software HY8, el cual modela las alcantarillas para asegurar que cumplan con los controles hidráulicos requeridos. Estos controles supervisan la altura del flujo de entrada, estableciendo un límite de 1.2 veces la altura planificada para la alcantarilla, con el fin de garantizar un flujo libre.

También se analizan las velocidades del flujo dentro de las alcantarillas para evitar que excedan las capacidades del material de diseño, previniendo así la socavación y la erosión. En este estudio, se propone el uso de concreto de 21 MPa, con una velocidad máxima permitida de hasta 10 m/s. A continuación, se presentan la verificación del control hidráulico (Figura 20).

Figura 20

Verificación controles hidráulicos.

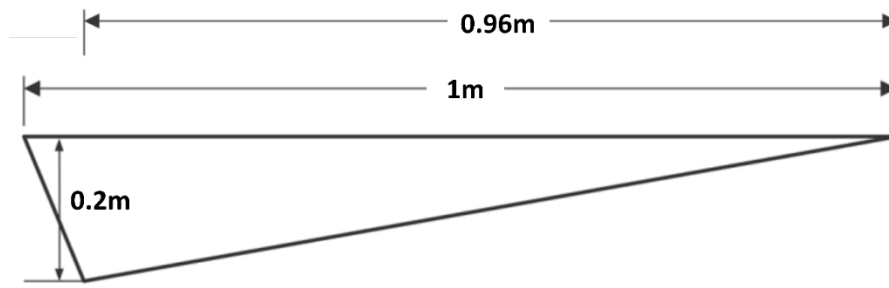
Tramo Vial	b (m)	y o D (m)	Control de entrada (m)	Control de salida (m)	$Y \times 1.2$	Control de entrada < $Y \times 1.2$	V (m/s)	V < 10 m/s
KM14+080-090_Doble	3	3	2.99	1.78	3.6	CUMPLE	5.89	CUMPLE
KM14+235_Doble		0.9	0.68	0.47	1.08	CUMPLE	4.35	CUMPLE
KM14+710-715_Doble	3.5	3.5	3.45	2.2	4.2	CUMPLE	5.98	CUMPLE
KM15+380-400_Doble	2	1.5	1.28	0.78	1.8	CUMPLE	5.24	CUMPLE
KM16+185_Doble	3	2.5	2.5	0.94	3	CUMPLE	6.53	CUMPLE
KM16+710_IzQ	2	1.5	1.2	0.37	1.8	CUMPLE	4.51	CUMPLE
KM16+700_DER	2	1.5	1.2	0.73	1.8	CUMPLE	4.6	CUMPLE
KM17+505_IzQ	2	1.5	1.18	0.28	1.8	CUMPLE	4.64	CUMPLE
KM17+520_DER	2	1.5	1.19	0.45	1.8	CUMPLE	4.28	CUMPLE
KM17+910-920_Doble	2	1.5	1.07	0.65	1.8	CUMPLE	5.28	CUMPLE
KM18+890-900_Doble	1	1	0.94	0.57	1.2	CUMPLE	5.1	CUMPLE
KM19+560_Doble	1	1	0.82	0.5	1.2	CUMPLE	4.72	CUMPLE
KM19+680-690_Doble		0.9	0.58	0.41	1.08	CUMPLE	4.14	CUMPLE
KM19+835-840_Doble	2.5	2.5	2.15	0.59	3	CUMPLE	6.25	CUMPLE
KM20+410_IzQ		0.9	0.82	0.29	1.08	CUMPLE	3.93	CUMPLE
KM20+450_DER		0.9	0.83	0.36	1.08	CUMPLE	3.72	CUMPLE
KM20+580_IzQ	2.5	2	1.87	1	2.4	CUMPLE	4.99	CUMPLE
KM20+580_DER	2.5	2	1.86	0.71	2.4	CUMPLE	5.58	CUMPLE
KM20+980-21+000_Doble	2	2	1.37	0.45	2.4	CUMPLE	5.24	CUMPLE
KM21+010-020_Doble	1.5	1.5	1.28	0.78	1.8	CUMPLE	5.46	CUMPLE
KM21+760-780_Doble	3	2.5	2.49	1.5	3	CUMPLE	7.28	CUMPLE
KM22+320_Doble	3	2.5	2.51	1.24	3	CUMPLE	4.57	CUMPLE
KM22+380_IzQ		0.9	0.76	0.32	1.08	CUMPLE	3.87	CUMPLE
KM22+410_DER		0.9	0.76	0.29	1.08	CUMPLE	4.26	CUMPLE
KM22+480_Doble		0.9	0.71	0.38	1.08	CUMPLE	2.56	CUMPLE
KM22+780-785_Doble		0.9	0.36	0.15	1.08	CUMPLE	3.29	CUMPLE
KM22+850_Doble		0.9	0.55	0.3	1.08	CUMPLE	2.33	CUMPLE
KM23+535_IzQ	3	3	3.04	2.12	3.6	CUMPLE	5.28	CUMPLE
KM23+525_DER	3	3	3.04	2.12	3.6	CUMPLE	5.28	CUMPLE
KM25+835-840_Doble		0.9	0.41	0.16	1.08	CUMPLE	3.62	CUMPLE
KM26+160-180_Doble		0.9	0.51	0.2	1.08	CUMPLE	4.03	CUMPLE
KM26+220-225_Doble	3	3	2.82	0.94	3.6	CUMPLE	7.45	CUMPLE
KM27+460_Doble	4	3	2.65	0.89	3.6	CUMPLE	7.22	CUMPLE
42 DOBLE	1	1	0.83	0.23	1.2	CUMPLE	4.96	CUMPLE
Descole Cunetas		0.9	0.33	0.16	1.08	CUMPLE	2.39	CUMPLE

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

En Colombia, es común encontrar cunetas triangulares con un ancho total de 1.0 m, distribuidos con 0.96 m a lo largo de la calzada, 0.04 m en el lado del talud y una profundidad de 0.20 m. (Figura 21).

Figura 21

Cuneta triangular.



Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

En algunos sectores no se necesitaron de las cunetas debido a que su bombeo era para ese mismo sentido y no había impluvium, lo que significa que se deja que el agua se derrame al terreno natural al no afectar la estructura. En la figura 22 y Figura 23 se anota la ubicación de las cunetas con sus respectivas dimensiones de la calzada izquierda, y en la figura 24 y figura 25 la ubicación de las cunetas con sus respectivas dimensiones de la calzada derecha.

Figura 22*Calzada izquierda, cuneta izquierda.*

Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo
11+762.63	11+872.63	Triangular
11+872.63	12+020	NO
12+020	12+320	Triangular
12+320	12+411	NO
12+411	12+770	Triangular
12+770	12+950	NO
12+950	13+330	Triangular
13+330	13+555	0.3*0.3
13+555	16+242.63	Triangular
16+242.63	16+662.63	0.25*0.3
16+662.63	16+792.63	NO
16+792.63	18+690	Triangular
18+690	18+715.51	NO
18+715.51	19+020	Triangular
19+020	19+282.63	0.25*0.3
19+282.63	19+328	Triangular
19+328	19+560	0.25*0.25
19+560	20+078	Triangular
20+078	20+410	0.25*0.25
20+410	20+572.63	Triangular
20+572.63	20+642.63	NO
20+642.63	21+620	Triangular
21+620	21+760	NO
21+760	22+320	Triangular
22+320	22+380	NO
22+380	24+372.63	Triangular
24+372.63	24+660	0.3*0.25
24+660	25+520	Triangular
25+520	25+602.63	NO
25+602.63	25+822.63	Triangular
25+822.63	25+835	NO
25+835	27+340	Triangular

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Figura 23*Calzada izquierda, cuneta derecha.*

Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo	Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo
11+762.63	11+850.63	NO	19+835	20+682.63	0.2*0.2
11+850.63	12+040	0.2*0.2	20+682.63	21+613	NO
12+040	12+258	NO	21+613	21+870	0.2*0.2
12+258	12+520	0.2*0.2	21+870	21+931	NO
12+520	12+772.63	NO	21+931	22+610	0.2*0.2
12+772.63	12+950	0.2*0.2	22+610	23+442.63	NO
12+950	13+312.63	NO	23+442.63	23+535	0.2*0.2
13+312.63	13+555	0.2*0.2	23+535	23+582.63	NO
13+555	13+779	NO	23+582.63	24+280	0.2*0.2
13+779	14+080	0.2*0.2	24+280	24+660	NO
14+080	14+495	NO	24+660	25+040	0.2*0.2
14+495	14+722.63	0.2*0.2	25+040	25+278	NO
14+722.63	15+312.63	0.25*0.25	25+278	25+572.63	0.2*0.2
15+312.63	15+430	0.2*0.2	25+572.63	25+802.63	0.25*0.25
15+430	16+242.63	NO	25+802.63	25+960	0.2*0.2
16+242.63	17+505	0.2*0.2	25+960	26+950	NO
17+505	18+175	NO	26+950	27+280	0.2*0.2
18+175	18+890	0.2*0.2	27+280	27+340	NO
18+890	19+835	NO			

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Figura 24*Calzada derecha, cuneta izquierda.*

Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo	Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo
11+759,73	12+409,73	NO	20+450	20+489,73	0.2*0.2
12+409,73	12+649,73	0.2*0.2	20+489,73	20+950	NO
12+649,73	12+700	0.2*0.2	20+950	21+189,73	0.2*0.2
12+700	13+520	NO	21+189,73	21+230	NO
13+520	14+089,73	0.2*0.2	21+230	21+360	0.2*0.2
14+089,73	14+680	NO	21+360	21+640	0.3*0.25
14+680	14+930	0.2*0.2	21+640	21+779,73	NO
14+930	15+110	NO	21+779,73	22+110	0.2*0.2
15+110	15+309,73	0.2*0.2	22+110	22+949,73	NO
15+309,73	15+380	NO	22+949,73	23+115	0.25*0.25
15+380	16+040	0.2*0.25	23+115	23+210	0.2*0.2
16+040	16+140	NO	23+210	23+429,73	NO
16+140	16+239,73	0.2*0.2	23+429,73	23+525	0.2*0.2
16+239,73	16+699,73	0.3*0.25	23+525	23+589,73	NO
16+699,73	17+089,73	0.2*0.2	23+589,73	24+245	0.2*0.2
17+089,73	17+520	0.25*0.25	24+245	24+389,73	NO
17+520	17+649,73	0.2*0.2	24+389,73	24+750	0.25*0.25
17+649,73	17+719,73	NO	24+750	24+949,73	NO
17+719,73	18+059,73	0.2*0.2	24+949,73	25+199,73	0.25*0.25
18+059,73	18+880	NO	25+199,73	25+450	0.2*0.2
18+880	19+020	0.2*0.2	25+450	26+120	NO
19+020	19+289,73	0.25*0.25	26+120	26+309,73	0.2*0.2
19+289,73	19+339,73	NO	26+309,73	26+330	0.3*0.3
19+339,73	19+930	0.2*0.2	26+330	26+499,73	NO
19+930	20+079,73	NO	26+499,73	26+980	0.3*0.3
20+079,73	20+450	0.25*0.25	26+980	27+080	NO

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Figura 25*Calzada derecha, cuneta derecha.*

Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo	Abscisa inicial	Abscisa final	Cuneta Tipo
11+759,73	13+299,73	Triangular	19+799,73	19+829,73	Triangular
13+299,73	13+520	0.25*0.25	19+829,73	19+839,73	NO
13+520	16+185	Triangular	19+839,73	21+000	Triangular
16+185	16+239,73	NO	21+000	21+039,73	NO
16+239,73	16+319,73	Triangular	21+039,73	21+280	Triangular
16+319,73	16+799,73	NO	21+280	21+640	NO
16+799,73	17+179,73	Triangular	21+640	21+900	Triangular
17+179,73	17+590	NO	21+900	21+949,73	NO
17+590	17+820	Triangular	21+949,73	24+679,73	Triangular
17+820	18+040	NO	24+679,73	25+199,73	0.3*0.3
18+040	18+900	Triangular	25+199,73	26+179,73	Triangular
18+900	19+289,73	NO	26+179,73	26+309,73	NO
19+289,73	19+470	Triangular	26+309,73	26+980	0.3*0.3
19+470	19+799,73	NO	26+980	27+080	Triangular

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Se propusieron y diseñaron otras alcantarillas por motivos del descole del agua y fácil mantenimiento de la vía, todas ellas con sección transversal circular con diámetro de 0.9m (Figura 26).

Figura 26*Localización alcantarillas.*

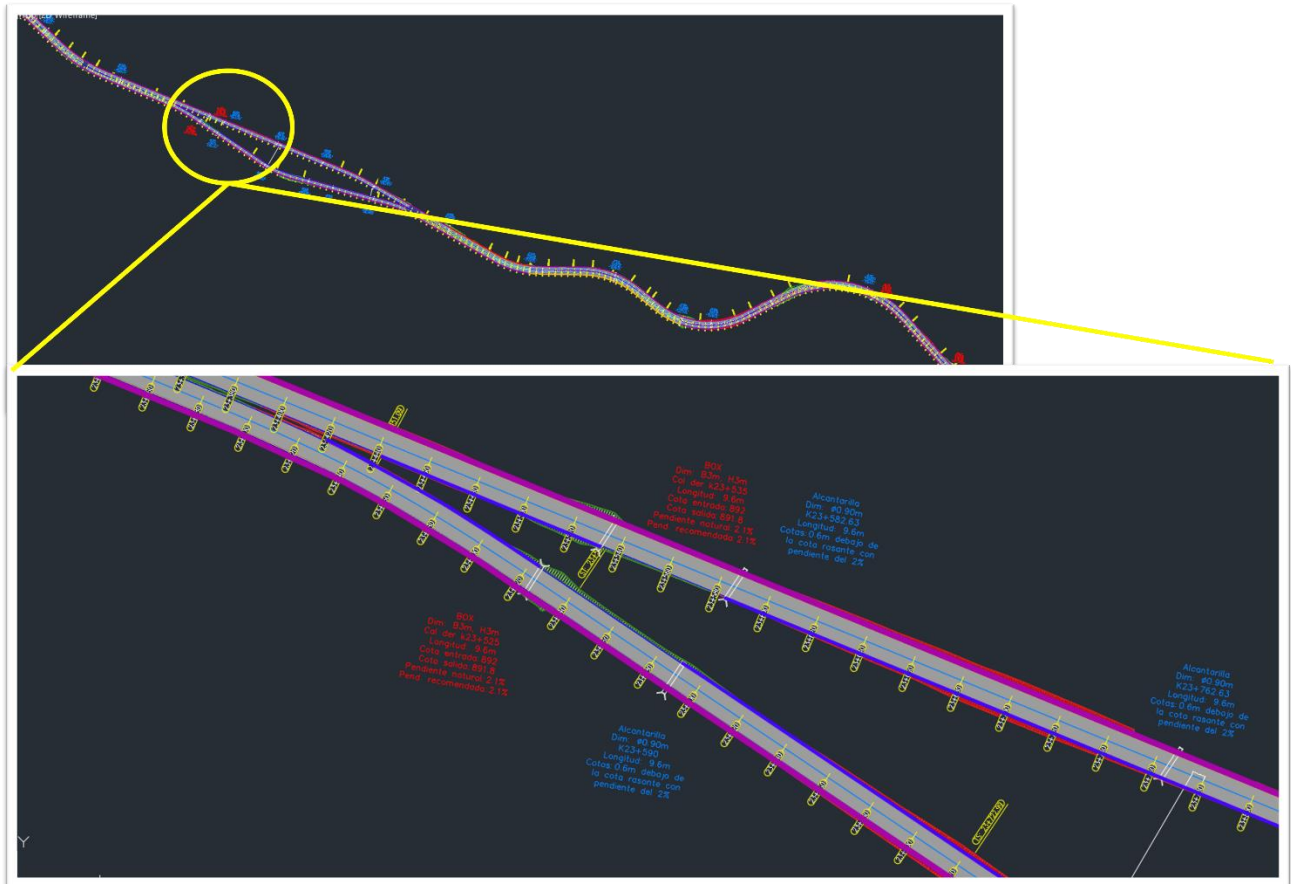
No.	CD	CI	No.	CD	CI
1	11+859.73	11+872.63	28	19+289.73	19+282.63
2	12+159.73	12+182.63	29	19+480	19+470
3	12+239.73	12+258	30	19+810	19+800
4	12+409.73	12+411	31	19+829.73	19+822.63
5	12+649.73	12+669	32	20+260	20+260
6	12+802.93	12+824	33	20+699.73	20+682.63
7	12+949.73	12+976	34	20+839.73	20+826
8	13+099.73	13+122.63	35	21+189.73	21+172.63
9	13+299.73	13+330	36	21+640	21+613
10	13+520	13+555	37	21+699.73	21+675
11	13+789.73	13+779	38	21+949.73	21+931
12	14+139.73	14+132.63	39	22+359.73	22+352.63
13	14+499.73	14+495	40	22+949.73	22+945.84
14	14+719.73	14+722.63	41	23+239.73	23+230
15	15+293	15+293	42	23+589.73	23+582.63
16	15+309.73	15+312.63	43	23+769.73	23+762.63
17	15+542	15+543	44	23+919.73	23+920
18	16+015	16+015	45	23+999.73	N/A
19	16+239.73	16+242.63	46	24+129.73	24+107
20	16+460	16+455	47	24+389.73	24+372.63
21	16+860	16+860	48	24+679.73	24+660
22	17+285	17+285	49	24+949.73	24+932.63
23	17+635	17+628	50	25+199.73	25+182.63
24	17+649.73	17+642.63	51	25+299.73	25+278
25	18+036	18+020	52	25+819.73	25+802.63
26	18+059.73	18+042.63	53	26+309.73	26+302.63
27	19+271	19+261	54	26+499.73	26+482.63
			55	26+749.73	26+729

Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

Como paso final, se ilustran las ubicaciones y especificaciones de las obras de drenaje vial (Figura 27). Las leyendas azules y rojas indican las ubicaciones de alcantarillas y box culverts, respectivamente. Para las cunetas, cada color representa una sección transversal diferente. Los colores morado y azul representan cunetas triangulares y cunetas de dimensiones 0.2m x 0.2m.

Figura 27

Localización obras de drenaje vial en plano.



Nota. Adaptado de las memorias de cálculo del proyecto Estudio y Diseño de Obras Hidráulicas del Anillo Vial Externo Metropolitano Doble Calzada.

5. Discusión

El aprendizaje de herramientas específicas para realizar este proyecto ofrece numerosas ventajas, incluyendo el análisis detallado y preciso de los sistemas de drenaje, lo que mejora la confiabilidad de las decisiones de diseño, así como también facilitan la simulación de diferentes

escenarios y condiciones, permitiendo optimizar los diseños de las obras de drenaje para que sean más eficientes y económicas. Por otro lado, el aprendizaje de estas herramientas presenta una serie de retos: la recopilación y validación de datos precisos es una tarea desafiante, así como la interpretación de los resultados generados por los modelos; además, integrar estos programas con otras herramientas SIG y software de diseño puede ser complejo y requiere conocimientos adicionales.

Aunque la toma de decisiones para este proyecto no tuvo mayores percances debido a que el proceso una vez aprendido era iterativo, estas decisiones pudieron modificarse al presentar propuestas y considerar las recomendaciones de las demás empresas asociadas al proyecto. Por ejemplo, se enfrentó a la necesidad de decidir si era viable prescindir de cunetas en varias secciones de la carretera. Después de un análisis detallado de las características del terreno, se concluyó que la implementación de cunetas no era necesaria, lo que permitió optimizar costos y tiempo de construcción, esto está permitido por la normativa, que indica que las cunetas deben ubicarse principalmente en todos los cortes y en los terraplenes propensos a la erosión (INVÍAS, 2009). En otra ocasión, se habían planteado unas alcantarillas para el segundo tramo, pero al presentarlas, se encontró que la otra empresa involucrada ya tenía sus propias propuestas. Esto obligó a recalcular y rediseñar las alcantarillas para asegurarse de que cumplían con todos los requisitos técnicos y de integración, garantizando así la efectividad y seguridad de la vía.

6. Conclusiones

Este trabajo de grado de grado en modalidad de práctica empresarial se dedicó a desarrollar diseños hidrológicos e hidráulicos para el proyecto Anillo Vial Externo Metropolitano, asegurando la eficiencia y sostenibilidad de las estructuras hidráulicas propuestas. Los objetivos establecidos fueron alcanzados mediante una metodología rigurosa amparada por lo establecido en la normatividad y soportada por el uso de herramientas tecnológicas y computacionales relevantes.

El estudio concluye que el cálculo de caudales es fundamental para garantizar que las obras hidráulicas puedan manejar los flujos de agua esperados durante diferentes condiciones, como lluvias intensas o eventos extremos. La utilización de métodos como el racional y el hidrograma SCS permitió obtener los datos necesarios que facilitaron la modelación de la escorrentía superficial.

Identificar las obras de arte hidráulicas requeridas es crucial para asegurar que el proyecto pueda manejar eficazmente el flujo de agua, previniendo inundaciones y mitigando los impactos de eventos hidrológicos extremos, esto implica seleccionar y diseñar adecuadamente elementos como puentes, alcantarillas, canales de drenaje, entre otros, que sean apropiados para las condiciones específicas del área de estudio.

Como resultado del estudio y diseño hidrológico e hidráulico, se propusieron y diseñaron las siguientes estructuras para el segundo tramo del proyecto: 17 box culverts, 10 alcantarillas y 7 puentes. Estas estructuras fueron diseñadas para garantizar la adecuada conducción y manejo de las aguas pluviales, protegiendo así la infraestructura vial y minimizando los riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos.

Las especificaciones seguidas, basadas en el manual de drenaje del INVÍAS, aseguran que las obras hidráulicas no solo sean eficientes, sino también sostenibles a largo plazo. Se resalta que estas estructuras contribuirán significativamente a la protección de la infraestructura vial y de los ecosistemas acuáticos de alrededor.

El uso de tecnologías avanzadas, tanto en la modelación hidrológica como en el diseño hidráulico, fue crucial para el éxito del proyecto. Estas tecnologías permitieron realizar diseños más precisos y adaptados a las condiciones reales del área de estudio, mejorando la calidad y la eficiencia de las soluciones propuestas.

Los manuales que se desarrollaron - uno que detalla el cálculo de caudales mediante el método racional y el método del hidrograma SCS (Apéndice A), y otro que guía el proceso para realizar un modelo de inundación en el programa HEC-RAS (Apéndice B) - serán de gran ayuda para los nuevos empleados de la empresa. Estos recursos proporcionan instrucciones claras y detalladas, facilitando una rápida capacitación y estandarizando los procedimientos técnicos. Al ofrecer una guía práctica y accesible, los manuales optimizan el aprendizaje autónomo, aseguran la consistencia en la aplicación de métodos y modelos, y aumentan la confianza en la realización de cálculos y simulaciones precisas, lo que contribuye a la eficiencia y al desarrollo profesional del equipo.

Referencias Bibliográficas

- Arciniegas, C. A. E. (2004). *Manual de Drenaje de Carreteras*.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/47d045df-7414-4456-8517-c47722b5b0e0/content>
- Brown, S. A., Schall, J. D. (James D., Morris, J. L., Stein, S., Warner, J. C., & National Highway Institute (U.S.). (2009). *Urban Drainage Design Manual: Hydraulic Engineering Circular 22, Third Edition* (FHWA-NHI-10-009). <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/44353>
- Carmona, R. P. (2013). *Diseño y construcción de alcantarillados sanitario, pluvial y drenaje en carreteras*. Ecoe Ediciones.
https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=Gtw3DgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Dise%C3%B1o+y+construcci%C3%B3n+de+alcantarillados+sanitario,+pluvial+y+drenaje+en+carreteras+&ots=to9R0Bgaff&sig=h5lioD8P9HI85P8pCfJSVH3Y-2s&redir_esc=y#v=onepage&q=Dise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20alcantarillados%20sanitario%2C%20pluvial%20y%20drenaje%20en%20carreteras&f=false
- Federal Highway Administration. (2024). *HY-8 Culvert Hydraulic Analysis Program*.
<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/software/hy8/>
- Fwa, T. F. (Ed.). (2006). *The handbook of highway engineering*. Taylor & Francis.
https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=oXzLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=the+handbook+of+highway+engineering+&ots=J2k6KKoTrJ&sig=RCdwdrOBwVUq_WMylccLEspdrfY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- INVÍAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*.
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file>
- Mays, L. W. (Ed.). (1999). *Hydraulic design handbook: Larry W. Mays, editor-in-chief*. McGraw-Hill.
- Ministerio de Fomento, & Dirección general de carreteras. (2019). *Norma 5.2–IC de la instrucción de carreteras, drenaje superficial*.
- Ministério dos Transportes do Brasil. (2006). *Manual de Drenagem de Rodovias (2ª EDIÇÃO)*.
- US Army Corps of Engineers. (2010). *HEC-RAS River Analysis System-Hydraulic Reference manual version 4.1*. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf
- US Army Corps of Engineers & Hydrologic Engineering Center. (2024). *HEC-HMS*.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

Apéndices



Apéndice A. Manual para el cálculo del caudal de diseño



Apéndice B. Manual para realizar un modelo de inundación