

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Existen carreteras que han sido pavimentadas 4000 años antes de la era común, por ejemplo, en la India, se empieza a usar ladrillo para pavimentar las calles 3000 años antes de la era común; también, 500 a. C., Darío I (Rey de Persia – Faraón de la Dinastía XXVII de Egipto) ordena ejecutar la primera red de caminos que incluiría el Camino Real Persa que sería también usado durante el Imperio Romano. A partir del año 312 a. C., el Imperio Romano construyó una gran red de calzadas que unió Europa y el Norte de África mediante 29 grandes arterias que cubrieron 78.000 kilómetros.

En los años 30 del siglo XX, en Alemania, se empieza a desarrollar un nuevo tipo de carretera de alta capacidad para vehículos conocida como *Autobahn* que representa a las primeras autopistas de la historia.

Un factor muy importante a tomar en cuenta al momento de construir una carretera es la lluvia que cae sobre la superficie de la tierra, una parte escurre inmediatamente convirtiéndose en corrientes de agua; otra se evapora y el resto se infiltra en el terreno. Cuando el agua de escurrimiento o de infiltración alcanza la carretera, si no se dispone de los elementos necesarios para conducirla o desviarla, se ocasiona una inundación de la calzada, el debilitamiento de la estructura de la carretera y la erosión o el derrumbe de los taludes, con graves perjuicios para el usuario de la vía y para la economía. La remoción de las aguas superficiales, ya sea que éstas caigan directamente sobre la plataforma de la vía o sobre las cuencas tributarias de las corrientes que debe cruzar la carretera, se logra a través de las obras de drenaje superficial; la remoción de las aguas subterráneas, mediante subdrenajes. Numerosos factores deben considerarse al intervenir en el estudio de los drenajes de una carretera, como: la topografía, la hidrología y la geología de la zona; variadas ramas de la ingeniería participan en la solución del problema, por ejemplo: la estadística, la hidráulica, el diseño estructural, etc.

Debido a las diferencias en las características topográficas, hidrológicas y geológicas, los métodos de diseño de los drenajes y los coeficientes que se utilizan en las fórmulas pueden

variar mucho de un sitio a otro. (...) La función de los drenajes superficiales de una carretera es la de proveer las facilidades necesarias para el paso de aguas de un lado a otro de la vía.

En este sentido, este proyecto trata del estudio hidrológico e hidráulico del tramo "Construcción de obras de conclusión, asfaltado camino San Andrés – San Pedro de Sola", en el cual se realiza el análisis pluviométrico, determinación de las precipitaciones de diseño, modelos de precipitación-escorrimento y caudales de crecidas para el diseño hidráulico de las alcantarillas de paso.

1.2 Situación Problemática

La implementación de nuevas tecnologías para la elaboración de proyectos de ingeniería permitirá obtener un vasto panorama de diseños para suministrar la ayuda técnica necesaria y asegurar la puesta en marcha de una manera eficaz y con el adecuado diseño, realizar comparaciones de diseño para optimizar y discernir, mediante un análisis de costo beneficio, el diseño más favorable.

En el departamento de Tarija existe necesidad de buscar nuevas alternativas para el diseño de alcantarillas de paso en carreteras, siendo la implementación de un software como SWMM "Storm Water Management Model" (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales) de gran importancia en el diseño de proyectos, permitiendo introducir datos de entrada para el área de drenaje, simular el comportamiento hidráulico y presentar los resultados.

Ante la falta de registros de caudales, se puede recurrir a la modelación hidrodinámica de precipitación-escorrimento para la determinación de los caudales de crecida. Los modelos de este tipo evalúan las tormentas a partir de datos de precipitación, junto a esto, SWMM contiene un conjunto flexible de herramientas de modelación de características hidráulicas utilizado para analizar el flujo debido a la escorrentía superficial y los aportes externos de caudal a través de una red de tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, y demás estructuras.

Realizando un análisis y un correcto ingreso de datos al programa para las cuencas que aportan a las alcantarillas de paso en las carreteras se determinará un diámetro o la sección más favorable para evacuar las aguas de esta cuenca, permitiendo resguardar la seguridad de la vía.

Los resultados obtenidos de la comparación entre el método racional y la modelación hidrodinámica permitirán saber si es o no aconsejable el uso de este programa específico en el diseño de las alcantarillas de paso.

1.2.1 Planteamiento del problema

1.2.1.1 Estado del problema

El control de las aguas en los últimos años es de suma importancia debido a los cambios del clima que ha generado crecidas significativas, poniendo en gran riesgo las vías, por lo que un eficiente diseño de evacuación y transporte de las aguas es de gran importancia en las mismas.

Debido a la falta de un método estandarizado se presenta la necesidad de analizar nuevos métodos para el diseño de alcantarillas de paso, siendo la modelación hidrodinámica la que presenta una manera diferente de diseño, de tal forma que encontrar el método más óptimo es una necesidad.

Por tales motivos, es necesario realizar un análisis comparativo de diseño entre el método racional y el método de la modelación hidrodinámica mediante el Software SWMM independientemente de las fórmulas o razonamiento lógico que utilice el software.

1.2.1.2 Problema

¿La inclusión de nuevos métodos alternativos optimizará la determinación del caudal de diseño máximo y la geometría más adecuada para una alcantarilla de paso en carreteras?

¿De qué manera la inclusión de nuevos métodos alternativos optimizará la determinación del caudal de diseño máximo y la geometría más adecuada para una alcantarilla de paso en carreteras?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar los resultados obtenidos de caudales y la geometría de las alcantarillas de paso construidas entre el método racional y la modelación hidrodinámica con el software SWMM “Storm Water Management Model” (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales).

Analizar y evaluar la efectividad del software SWMM “Storm Water Management Model” (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales) usado para calcular los caudales y la geometría de las alcantarillas en contraposición al método racional y la modelación hidrodinámica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar el caudal de aporte de las alcantarillas de paso mediante el método Racional.
- Realizar verificación de la geometría de las alcantarillas construidas de paso mediante el método Racional.
- Realizar la modelación hidrodinámica para generar caudales de diseño y la verificación de la geometría de las alcantarillas mediante el software SWMM.
- Comparar el diseño y beneficio entre los dos métodos, Racional y la modelación Hidrodinámica.
- Realizar una conclusión y plantear recomendaciones acerca del análisis comparativo entre estos dos métodos.

1.3.3 Hipótesis

Con la implementación del método de la modelación hidrodinámica se facilitará el proceso de diseño de las alcantarillas de paso, proporcionando mejores diseños y resultados más óptimos.

1.3.4 Variables

1.3.4.1 Variable independiente

Como variables independientes se tiene:

- **Las características geomorfológicas de la cuenca**
 - Área y perímetro de la cuenca
 - Índice de permeabilidad de la cuenca
 - Coeficiente de escorrentía

- Pendiente de la cuenca

- **Lista de datos pluviométricos de la estación de estudio**

1.3.4.2 Variable dependiente

Como variables dependientes están:

- El caudal de diseño de las alcantarillas.
- La geometría de las alcantarillas de paso en el tramo de estudio.

1.3.5 Alcance

Implementar un nuevo método para el diseño de alcantarillas de paso en carreteras intercomunales y provinciales mediante la modelación hidrodinámica con el software EPA SWMM.

1.4 Diseño Metodológico

1.4.1 Unidad

La unidad de análisis sobre la cual se realizaron los estudios correspondientes a la investigación son las alcantarillas en una carretera.

1.4.2 Población

La población a la cual está dirigida la investigación son las alcantarillas de paso en las carreteras, intercomunales y provinciales.

1.4.3 Muestra

Se tiene como muestra el diseño de diez alcantarillas de paso en una carretera, cada una diseñada con los dos métodos de diseño.

1.4.4 Medios

Los medios que se utilizaron para determinar las variables y cumplir con el objetivo principal son:

- La extracción de información de las alcantarillas ya construidas.
- La recopilación de información acerca del nuevo software para la modelación hidrodinámica.

- Capacitación en el uso del programa EPA SWMM para la modelación
- Obtención de información de las precipitaciones de la zona.
- Determinación de las características geomorfológicas de las cuencas de aporte.
- Recopilación de resultados obtenidos.

1.4.5 Métodos

- El análisis de las alcantarillas diseñadas en el sector de estudio.
- Rediseño de las alcantarillas ya construidas.
- Aplicación del software EPA SWMM y obtención de resultados.
- Realizar una comparación entre ambos diseños.

Una vez obtenida la información acerca de las alcantarillas (geometría, datos pluviométricos y morfológicos de la cuenca), se hizo una verificación del diseño realizado por el SEDECA en base a la Normativa de la ABC, para luego introducir los datos al programa de estudio y comparar los resultados obtenidos mediante el software y los obtenidos por el SEDECA, previa verificación.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE ALCANTARILLAS DE PASO EN CARRETERAS Y SUS MÉTODOS DE DISEÑO

2.1 Sistemas de Drenaje

Se define como sistema de drenaje de una vía al dispositivo específicamente diseñado para la recepción, canalización y evacuación de las aguas que puedan afectar directamente a las características funcionales de cualquier elemento integrante de la carretera.

Dentro de esta amplia definición, se distinguen diversos tipos de instalaciones encaminadas a cumplir tales fines, agrupadas en función del tipo de agua que se pretende alejar o evacuar, o de la disposición geométrica con respecto al eje de la vía.

2.1.1 Drenaje longitudinal

Los elementos de este componente del sistema se ubican por lo general a los costados de las vías para llevar el agua pendiente abajo de la sección. Es muy común que estén vinculados a estructuras de disipación y canales de descenso (caídas o rápidas), toda vez que deben evacuar el agua alcanzando niveles más bajos, sean cunetas o quebradas.

Estas obras son muy importantes en el diseño actual, tanto para obtener un adecuado desagüe, como por razones de seguridad, apariencia y mantenimiento de la vía.

Canaliza las aguas caídas sobre la plataforma y taludes de la explanación de forma paralela a la calzada, restituyéndolas a sus cauces naturales. Para ello, se emplean elementos como las cunetas, caces, colectores, sumideros, arquetas y bajantes.

Figura 1. A la derecha una cuneta, izquierda una zanja de coronamiento



Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

2.1.1.1 Cunetas

Las cunetas son canales dispuestos en el extremo de la berma en forma paralela al eje longitudinal de la vía, y con una pendiente que permita el inmediato escurrimiento de las aguas.

Pueden también construirse como protección a posibles infiltraciones de aguas acumuladas al pie del talud del terraplén del lado de aguas arriba.

Su principal tarea es concentrar en puntos colectores, las aguas que fluyen por los taludes de corte, sea que estas provengan de precipitaciones pluviales o de aguas subterráneas emergentes; pero también deben recolectar las aguas pluviales de la capa de rodadura evitando zonas de inundación que ocasionen problemas de tráfico.

Figura 2. Cuneta de hormigón



Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

2.1.1.2 Zanjas de coronamiento y contracunetas

Son canales proyectados en forma paralela a la corona de los taludes de corte, su función consiste en la captación de aguas que escurren superficialmente por las laderas desde mayores alturas, evitando que lleguen hasta el pie del talud formando cárcavas, y el congestionamiento de las cunetas y la plataforma por el agua y el material de arrastre. Estas estructuras, aunque de pequeñas envergaduras, deben realizarse cuidadosamente, proporcionándoles buena impermeabilización y pendiente de tal forma que permitan un rápido desalojo del agua y que no existan filtraciones que pongan en riesgo la estabilidad de los taludes que protegen.

Figura 3. Zanja de coronamiento protegiendo viviendas



Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

2.1.1.3 Bordillos

Son pequeños parapetos conocidos también con el nombre de brocales, que se construyen en el borde de la corona del terraplén, para impedir que el agua desborde por los taludes erosionándolos. Al finalizar el terraplén, su continuidad se interrumpe y las aguas se canalizan hacia las salidas transversales.

Son obras recomendables como drenaje provisional en caminos no pavimentados, particularmente en zonas arenosas o areno-limosas. La construcción se realizará con mezclas de suelo-cemento o asfalto, y otras veces con cemento hidráulico. Aunque estas obras son poco comunes, la tarea de protección que cumplen justifica su costo.

Figura 4. Bordillo en carretera



Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

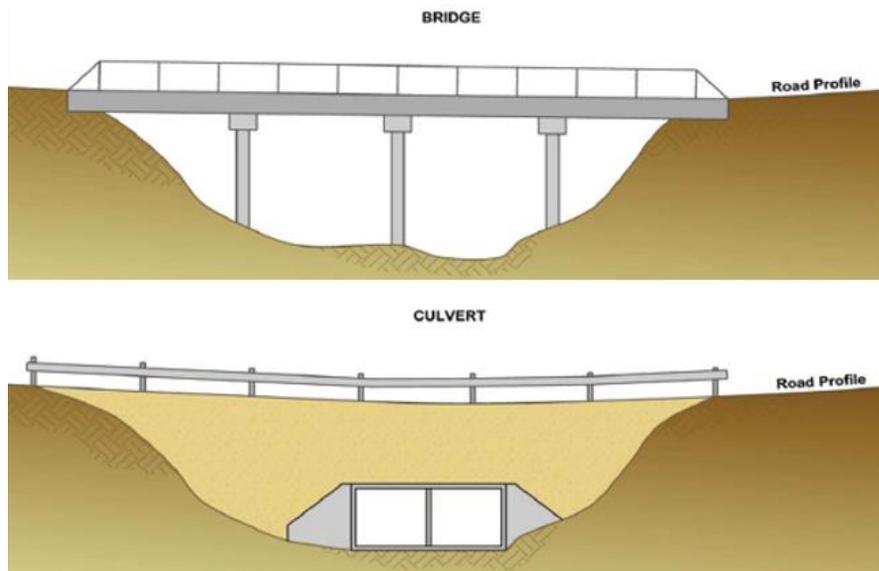
2.1.2 Drenaje transversal

Las obras hidráulicas que encauzan y conducen las aguas a través de las vías de comunicación, para descargarlas y eventualmente restituirlas a los cauces interferidos por la viabilidad, son las que constituyen el drenaje transversal. (Franceschi, 1984)

Permite el paso del agua a través de los cauces naturales bloqueados por la infraestructura viaria, de forma que no se produzcan destrozos en esta última. Comprende pequeñas y grandes obras de paso, como puentes, alcantarillas, badenes, etc.

Los sistemas de drenaje transversal son aquellos elementos que transportan agua cruzando el eje de la carretera. Por lo general, el cruce se realiza de manera perpendicular al eje y transportan el aporte de la cuenca que se encuentra aguas arriba de la vía en dirección aguas abajo.

Figura 5. Drenaje en carreteras, puente contra alcantarilla en la misma ubicación



Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

2.1.2.1 Alcantarillas

Son estructuras civiles que permiten el cruce de un cauce natural o conducto abierto por debajo de una vía terrestre o terraplén.

Estos elementos van, por lo general, acompañados de estructuras adicionales como son los cabezales, cuyo objetivo es brindar anclaje al conducto y resguardar el relleno de la vía evitando filtraciones que puedan afectar su estabilidad. Además, sirven como estructuras de encauzamiento de las aguas.

Se entiende por alcantarilla una estructura de drenaje cuya luz mayor, medida paralela al eje de la carretera, sea hasta de 6 metros; losas de mayores luces se tratarán como puentes en lo relativo a su cálculo hidráulico. La alcantarilla debe ser capaz de soportar las cargas del tráfico en la carretera, el peso de la tierra sobre ella, las cargas durante la construcción, etc., es decir, también debe cumplir requisitos de tipo estructural.

Para incrementar la eficacia hidráulica de la obra, puede recurrirse a modificaciones en la entrada, entre las cuales, las prácticas más sencillas y económicas están los muros que

hacen de alas en la entrada y salida que encauzan las aguas e inducen la contracción del flujo.

Figura 6. Alcantarillas en carreteras



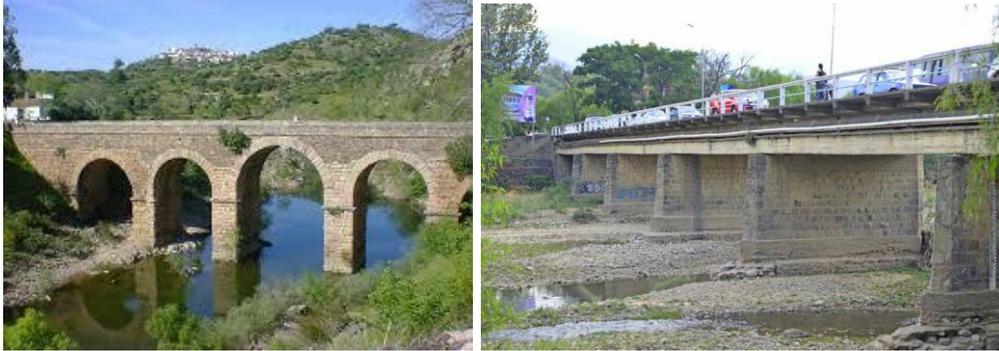
Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

2.1.2.2 Puentes

Un puente es una construcción que permite salvar un accidente geográfico como un río, un cañón, un valle, una carretera, un camino, una vía férrea, un cuerpo de agua o cualquier otro obstáculo físico. El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y de la naturaleza del terreno sobre el que se construye.

Su proyecto y su cálculo pertenecen a la ingeniería estructural, siendo numerosos los tipos de diseños que se han aplicado a lo largo de la historia, influidos por los materiales disponibles, las técnicas desarrolladas y las consideraciones económicas, entre otros factores. Al momento de analizar el diseño de un puente, la calidad del suelo o roca donde habrá de apoyarse y el régimen del río por encima del que cruza son de suma importancia para garantizar la vida del mismo.

Figura 7. Puentes que facilitan el curso normal del agua



Fuente: Cañada Joe Bill, Tecate, Baja California, México

2.2 Diseño Hidráulico de Alcantarillas

2.2.1 Conceptos hidráulicos

La adecuada elección de la ubicación, alineación y pendiente de una alcantarilla es importante ya que de ella depende su comportamiento hidráulico, los costos de construcción y mantenimiento, la estabilidad hidráulica de la corriente natural y la seguridad de la carretera.

En general, se obtendrá la mejor ubicación de una alcantarilla cuando ésta se proyecta siguiendo la alineación y pendiente del cauce natural, ya que existe un balance de factores, tales como, la pendiente del cauce, la velocidad del agua y su capacidad de transportar materiales en suspensión y arrastre de fondo. Cuando se cambia cualquiera de estos factores, es necesario compensar con cambios en otro de ellos.

2.2.1.1 Ubicación en planta

Desde el punto de vista económico, el reemplazo de la ubicación natural del cauce, por otra normal o casi normal al eje del camino, implica la disminución del largo del conducto, el acondicionamiento del cauce y la construcción adicional de un canal de entrada y/o de salida.

Estos cambios deben ser diseñados en forma cuidadosa para evitar una mala alineación del canal natural y los problemas de erosión o de depósito de sedimentos, tanto en la alcantarilla como en el terraplén y propiedades vecinas.

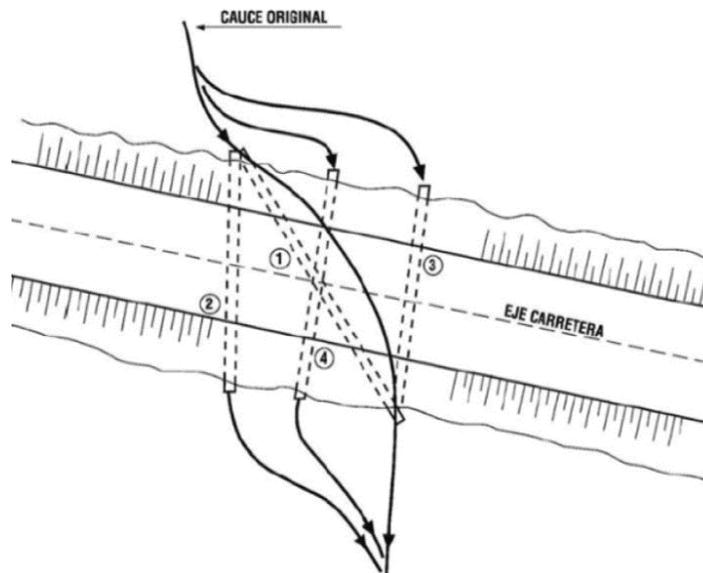
Como consideraciones generales conviene destacar los siguientes aspectos:

La corriente debe cruzar la carretera en la primera oportunidad, ya que se evita, de esta manera, posibles derrumbes y deslizamientos por llevar la corriente paralela al pie del terraplén y aguas arriba de él.

Si la oblicuidad del canal con respecto a la normal al eje de la carretera es pequeña, conviene hacer la alcantarilla normal al eje y, si es grande, conviene reducirla. No hay disminuciones importantes de costos cuando se reduce una oblicuidad moderada. Los límites entre estos casos deberán determinarse por comparación de costos.

Las distintas soluciones que podrían darse en el caso general de un cauce con fuerte esviate aparecen en la siguiente figura.

Figura 8. Cauce con esviate respecto del eje del camino



Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje, págs. 49/313

Caso 1: Se conserva la entrada y salida del canal natural (en general, si este es muy sinuoso aguas debajo de la carretera, conviene hacer la alcantarilla recta). Esta solución da la longitud máxima de alcantarilla. Colocando la alcantarilla ligeramente a un lado del canal natural, se puede obtener, por lo general, una mejor función, siendo necesario desviar la corriente.

Caso 2: La entrada se coloca en el canal natural y la salida se desplaza para tener una alcantarilla casi normal al eje de la carretera. Como en este caso se ha alargado la línea del flujo, esto será a costo de reducir la pendiente. Las estructuras de entrada y de salida y la alimentación del canal deben hacerse de tal modo de minimizar los efectos de cambios bruscos de dirección. Ello podría aumentar la sección de la alcantarilla comparada con la de la solución anterior. En los costos será necesario considerar estructuras especiales de entrada y salida, la construcción del canal a la salida y su mantención.

Caso 3: Se ha desplazado la entrada de modo que la salida descargue directamente en el canal natural. El canal de acercamiento a la alcantarilla debe tener una buena alineación con ella para no necesitar una entrada o salida especial. El tamaño de la alcantarilla puede ser influenciado por el hecho que al aumentar la longitud de flujo debe reducirse la pendiente. Habrá costos adicionales por construcción y mantención del canal, un posible mayor diámetro y protección del terraplén a la entrada.

Caso 4: En este caso, se ha desplazado tanto la entrada como la salida. No se obtiene un mejoramiento hidráulico con esta solución y solo conviene usarla cuando hay restricciones de espacio para otras soluciones. En cuyo caso, se requieren estructuras especiales de entrada y de salida de canales de acercamiento en los dos extremos, los que deben considerarse en el costo, además de una posible mayor sección de la alcantarilla debido a la disminución de la pendiente.

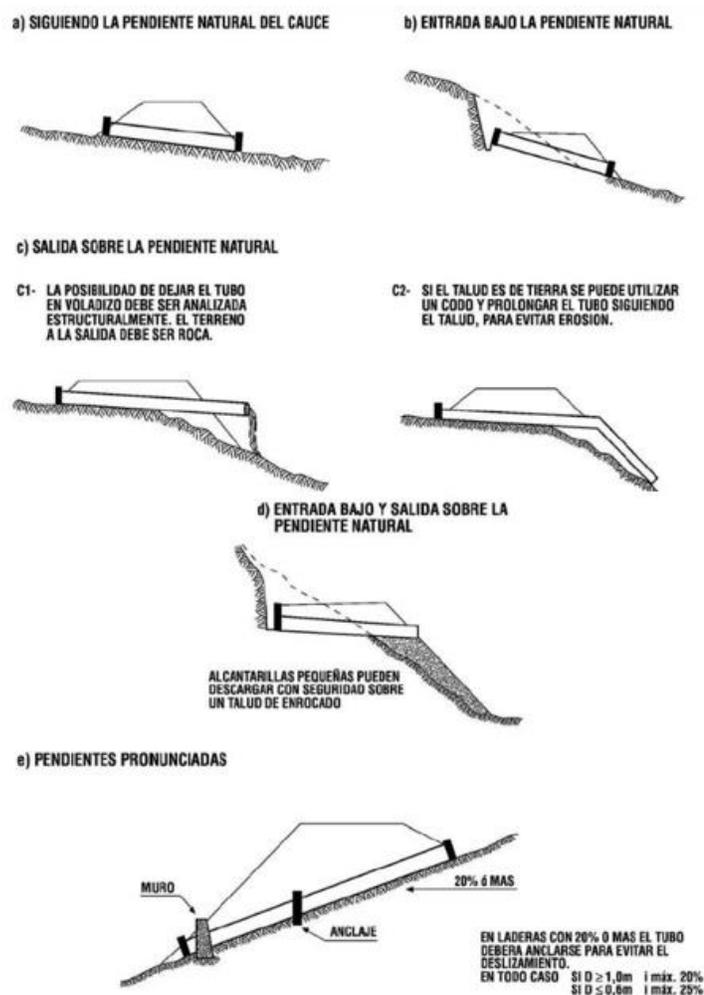
2.2.1.2 Perfil longitudinal

La mayoría de las alcantarillas se colocan siguiendo la pendiente natural del cauce, sin embargo, en ciertos casos puede resultar aconsejable alterar la situación existente. Estas modificaciones de pendiente pueden usarse para disminuir la erosión en él o en los tubos de la alcantarilla, inducir el depósito de sedimentos, mejorar las condiciones hidráulicas,

acortar las alcantarillas o reducir los requerimientos estructurales. Sin embargo, las alteraciones de la pendiente deben ser estudiadas en forma cuidadosa de tal modo de no producir efectos indeseables.

En la siguiente figura se indican los perfiles longitudinales de las alcantarillas más usuales con sus respectivas estructuras especiales de salida o de entrada.

Figura 9. Ubicación de la alcantarilla respecto de la pendiente del cauce



Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje, págs. 52/313

En general, al cambiar la pendiente en cada uno de estos casos, debe tenerse especial cuidado que el terreno de fundación de la alcantarilla no permita asentamientos, debiendo ser terreno natural firme o relleno estructural debidamente compactado, caso contrario, las fuerzas de corte causadas por el asentamiento de terraplenes importantes pueden causar el colapso total de la estructura.

2.2.1.3 Elección del tipo de alcantarilla

a) Forma y sección

Las formas usuales de alcantarillas son: circulares, rectangulares, parabólicas y celulares. En casos muy especiales puede resultar económico el uso de arcos parabólicos de grandes dimensiones, los que requerirán de un tratamiento especial. La alcantarilla circular es una de las más usadas y resiste en forma satisfactoria, en la mayoría de los casos, las cargas a que es sometida. Existen distintos tipos de tubos circulares que se utilizan con este propósito.

El diámetro para alcantarillas de caminos locales o de desarrollo deberá ser al menos 0,8 m o 1 m si la longitud de la obra es mayor a 10 m. En las demás categorías de caminos y carreteras, el diámetro mínimo será de 1 m. En obras de drenaje urbano es admisible usar tubos de 0.60 m para conexiones cortas, como de sumidero a registro.

Las alcantarillas celulares cuadradas o rectangulares pueden ser diseñadas para evacuar grandes caudales y pueden acomodarse con cambios de altura a distintas limitaciones que puedan existir, tales como alturas de terraplén o alturas permisibles de agua en la entrada.

Como generalmente se construyen en el lugar, deberá tomarse en cuenta el tiempo de construcción al compararlas con las circulares prefabricadas.

En los cauces naturales que presentan caudales de diseño importante, si la rasante es baja respecto del fondo del cauce, se suelen usar alcantarillas múltiples. Sin embargo, cuando se ensancha un canal para acomodar una batería de alcantarillas múltiples, se tiende a producir depósito de sedimentos tanto en el canal como en la alcantarilla, situación que deberá tenerse presente.

En las zonas fuertemente onduladas, las tormentas intensas producen un importante arrastre de sólidos mezclados con vegetación, los cuales tienden a obstruir las alcantarillas, en especial si estas disminuyen la velocidad del flujo en el cauce natural. Esta situación es más grave cuando la sección de escurrimiento se divide, usando alcantarillas múltiples.

En estos casos se recomienda seleccionar obras con la mayor sección transversal libre, sin subdivisiones, aun cuando la obra sea de costo mayor, a fin de evitar posibles puntos de retención de sólidos flotantes. Por igual motivo, conviene instalarlas con una pendiente tal, que acelere el flujo, aun cuando ello obligue a revestir el cauce a la entrada y a la salida de la obra.

La separación de los tubos en instalaciones múltiples, medidas entre las superficies externas, deberá ser igual a la mitad del diámetro del tubo con un máximo de 1 m y un mínimo de 0,4 m, a fin de facilitar la compactación del material de relleno.

b) Materiales

Los materiales más usados para las alcantarillas son el hormigón armado *in situ* o prefabricado, y los pequeños puentes o “pontillones”, con o sin solera de hormigón, muros de piedra bruta colocada y losa de hormigón armado.

En la elección del material de la alcantarilla se debe tomar en cuenta la durabilidad, resistencia, rugosidad, condiciones del terreno, resistencia a la corrosión, abrasión e impermeabilidad. No es posible dar reglas generales para la elección del material ya que depende del tipo de suelo, del agua y de la disponibilidad de los materiales en el lugar. Sin embargo, deberá tenerse presente al menos lo siguiente:

- Según sea la categoría de la carretera, se deben considerar las siguientes vidas útiles:

Tabla 1. Vida útil de diseño para alcantarillas

Clasificación		Tiempo
Autopistas y rutas primarias	>	50 años
Colectores y locales	>	30 años
Desarrollo	>	10 años

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje

Si se trata de caminos pavimentados, la alcantarilla debe asegurar una impermeabilidad que evite la saturación del terraplén adyacente, lo cual puede acarrear asentamientos del terraplén con el consecuente daño al pavimento.

Alcantarillas bajo terraplenes con altura superior a 5 m deberán construirse preferentemente de hormigón armado por la dificultad que conlleva el reemplazo.

En definitiva, el costo de las alcantarillas está altamente influenciado por la selección del material, forma y sección de ellas.

En la elección del tipo de alcantarillas se considerarán los siguientes factores:

a) Factores Físicos y Estructurales

- Durabilidad
- Altura disponible para la alcantarilla
- Carga de tierra sobre ella
- Condiciones de apoyo
- Rigidez de la alcantarilla
- Resistencia al impacto
- Tipo de terreno existente

b) Factores Hidráulicos, tales como:

- Caudal de diseño
- Forma, pendiente y área de del cauce

- Velocidad de aproximación
- Carga hidráulica total admisible
- Arrastre de sedimentos
- Condiciones de entrada y salida
- Pendiente de la alcantarilla
- Rugosidad del conducto
- Longitud y tamaño de la alcantarilla
- Sección transversal

c) Factores de Construcción y Mantenimiento:

- Accesibilidad del lugar
- Disponibilidad de materiales

d) Costos de la Obra

2.2.1.4 Procedimiento para la selección del tamaño de una alcantarilla

A continuación, se resume el procedimiento detallado para el cálculo de las dimensiones de una alcantarilla.

Ordenar todos los datos de diseño: caudal (m^3/s), longitud de la alcantarilla (m), pendiente de la alcantarilla, profundidad admisible en el remanso de entrada (m), velocidades máximas y medias de la corriente en el cauce natural y elección tentativa del tipo de alcantarilla, material, forma del conducto y tipo de entrada.

Determinar en primera aproximación las dimensiones del conducto, suponiendo, por ejemplo, una velocidad en el conducto. Si resulta un ancho excesivo debido a la limitación de altura que impone el terraplén, puede pensarse en una alcantarilla múltiple.

Determinar la profundidad del remanso de entrada suponiendo escurrimiento con control de entrada. Si esta profundidad resulta mayor que la admisible debe ensayarse una nueva dimensión tentativa.

Suponer escurrimiento con control de salida y determinar la profundidad en el remanso de entrada. Inicialmente, debe determinarse la profundidad de la corriente en la salida y

seguir el procedimiento que corresponda según sea una situación de salida sumergida o no sumergida.

Comparar las profundidades en el remanso de entrada con escurrimientos con control en la entrada y en la salida. El valor determinante es el mayor de ambos, e indica cual es el tipo de control que rige para las dimensiones elegidas en las condiciones del problema.

Si el valor determinante es mayor que el admisible y hay control de salida, elegir una dimensión mayor y repetir el cálculo para control de salida.

Repetir el procedimiento hasta contar con un tamaño adecuado.

Calcular la velocidad de salida y verificar que su valor sea menor que los máximos admisibles.

Anotar las características de la alcantarilla finalmente elegida, incluyendo tipo, tamaño, profundidad del remanso en la entrada y velocidad de salida.

2.3 Métodos de Diseño en Alcantarillas

En este proyecto, es necesario enfocarse en los métodos de diseño de las alcantarillas al ser el motivo de este análisis.

Los métodos que se puede encontrar para el diseño de las alcantarillas son:

- Método de secciones y pendientes
- Correlación hidrológica de cuencas
- Fórmulas empíricas
- Métodos estadísticos
- Hidrógrama triangular U.S. Bureau of Reclamation
- Hidrógrama instantáneo de I PAI-WU
- Método racional
- Método de la modelación hidrodinámica

Debido a que el proyecto requiere hacer una comparación entre dos diseños, se evaluarán y estudiarán el método racional y la modelación hidrodinámica.

2.3.1 Método racional

Es el método más utilizado para calcular el caudal en cuencas pequeñas, aunque adolece de una serie de limitaciones. Los valores de escurrimiento obtenidos se encuentran generalmente por encima de los reales cuando las suposiciones de aplicación se alejan de sus enunciados fundamentales que son:

- La lluvia se toma como intensidad constante, tanto en tiempo como en espacio
- El coeficiente de escorrentía es constante durante toda la tormenta
- El almacenamiento temporal en depresiones y otros sitios es despreciable
- La duración de la lluvia debe ser igual o superior al tiempo de concentración de la cuenca, con lo que se alcanza el máximo de caudal
- La ecuación que corresponde es en unidades del SI:

$$Q_T = CU * \frac{C_E * i_{t,T} * A}{3,6}$$
$$CU = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14}$$

Donde:

- Q = Aportación líquida de la cuenca, en (m³/seg.)
- C_E = Coeficiente de escorrentía
- i_{t,T} = Intensidad media máxima de lluvia, en [mm/hr], para un periodo de retorno T y una duración “t”
- A = Área de aportación de la cuenca, (Km²)
- T_c = Tiempo de concentración
- CU = Coeficiente de uniformidad

La forma práctica de emplear el método racional sigue el siguiente procedimiento:

- Verificar las condiciones para la validez de la aplicación de la fórmula: $A < 25$ (Km²) y ($t_c \leq 1$ Hr.).
- Escoger el valor del coeficiente de escorrentía teniendo en cuenta las modificaciones futuras previsibles en la cuenca.
- Se cuantifica el valor del coeficiente de escorrentía en función de las características morfométricas de la cuenca. Luis Franceschi cita la recomendación de Kirpich (1940) de corregir el coeficiente mediante un multiplicador en zonas que puedan ser quemadas.
- Se determina el valor de C_E dependiendo la zona y el tipo de suelo.
- Se establece la intensidad de la precipitación de diseño para una duración igual al tiempo de concentración y para un periodo de retorno escogido.
- Se cuantifica el valor del área de aportación de la cuenca.
- Se calcula la aportación líquida de la cuenca.

2.3.1.1 Tiempo de concentración

Denotado por t_c , es el lapso bajo precipitación constante que tarda el agua en desplazarse desde el punto más distante, hidráulicamente definido dentro de la cuenca, hasta el punto de control.

Este parámetro, evidentemente, depende, entre otras variables, de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad promedio que adquiere en la misma, la cual, a su vez, varía en función de la pendiente y la rugosidad de la superficie.

En drenaje vial no es recomendable considerar valores del tiempo de concentración menores a 10 minutos. (Pizarro, 1993)

Diversos son los autores y los procedimientos de cálculo utilizados para establecer una mejor relación, pero entre sí tienen grandes diferencias en los resultados. Sin embargo, las fórmulas empíricas dan valores más reales y con mejor ajuste a los datos experimentales.

Aunque hay una gran variedad, su uso debe estar restringido en función de los límites y condicionantes de la obtención de dichas fórmulas, las principales son:

Tabla 2. Fórmulas para el cálculo del Tiempo de Concentración

Autor	Ecuación t_c	Unidades	Descripción		Observaciones
Kirpich	$t_c = 0,078 * k^{0,77}$ $k = 3,28 * L / S^{\frac{1}{2}}$	(min)	L (m)	Longitud del cauce principal	Cuenca pequeñas
			S (m/m)	Pendiente del cauce principal	
Mopu	$t_c = 0,3 * \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$	(Hr)	L (Km)	Longitud del cauce principal	
			S (%)	Pendiente del cauce principal	
Giandotti	$t_c = \frac{4 * A^{1/2} + 1,5 * L}{0,8 * H^{1/2}}$	(Hr)	H (m)	Altura media descontando la cota de origen de la cuenca (punto de salida)	Áreas menores a 10 (Km²)
			A (Km²)	Área de la cuenca	
			L (Km)	Longitud del cauce principal	
SCS	$t_c = \frac{0,0287 * L^{0,8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{1,67}}{S^{1/2}}$	(min)	L (m)	Longitud del cauce principal	$L = 1,27 * A^{0,6}$ (Km)
			S (%)	Pendiente media de la cuenca	
			CN	Numero de curva del SCS	
California Highway and Public Works	$t_c = 0,95 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	(Hr)	L (Km)	Longitud del cauce principal	
			H (m)	Desnivel máximo de la cuenca	

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 1.3-2

2.3.1.2 Coeficiente de escorrentía

Los coeficientes de escorrentía dependen de las características del terreno, uso y manejo del suelo, condiciones de infiltración, etc., y se necesita un criterio técnico adecuado y experiencia para seleccionar un valor representativo. En la Tabla 3 se entregan antecedentes con rangos usuales de este coeficiente para diversos tipos de situaciones.

En otras situaciones, la elección del coeficiente de escurrimiento puede abordarse con la ayuda de los factores de relieve, infiltración, cobertura vegetal y almacenamiento de agua en el suelo. En la Tabla 4 se entregan los valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, los cuales son similares a los incluidos en las instrucciones de diseño de España. Ellos se basan en examinar 4 factores que inciden en este coeficiente, como son el relieve, la infiltración, la vegetación y la capacidad de almacenar agua.

El uso de la Tabla 3 requiere seleccionar el valor correspondiente a la situación de cada factor e ir sumando las contribuciones de cada uno de ellos. Si la cuenca presenta mucha heterogeneidad en estas características se pueden estimar coeficientes para cuencas

parciales y, posteriormente, calcular la suma ponderada por el tamaño de las subcuencas para encontrar el valor total. Las recomendaciones anteriores son representativas de tormentas con períodos de retorno de 10 años.

En función de lo referido en el párrafo anterior, se tiene que, en la medida que el valor del Coeficiente de Escorrentía tiende a 1 (su valor máximo), mayor será la cantidad de agua precipitada que se convertirá en Caudal superficial lo cual podría estar asociado, por ejemplo, a una baja tasa de retención del agua por parte de la cuenca o área en estudio (por ejemplo, un suelo prácticamente impermeable en este caso).

Si se necesitan coeficientes de escorrentía de tormentas de períodos de retorno mayor, se recomienda amplificar los resultados por 1,1; 1,2 y 1,25 para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente.

Tabla 3. Coeficientes de escurrimiento (C)

Tipo de terreno	Coeficiente de escurrimiento
Pavimentos de adoquín	0,50 – 0,70
Pavimentos asfálticos	0,70 – 0,95
Pavimentos en concreto	0,80 – 0,95
Suelo arenoso con vegetación y pendiente 2 % - 7 %	0,80 – 0,95
Suelo arcilloso con pasto y pendiente 2 % - 7 %	0,25 – 0,65
Zonas de cultivo	0,20 – 0,40

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 1.6-2

Tabla 4. Coeficientes de escorrentía (c) para T=10 años

Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28-0,35 Escarpado con pendientes mayores a 30 %.	0,20-0,28 Cerros con pendientes entre 10 y 30 %.	0,14-0,20 Con cerros y pendientes entre 5 y 10 %.	0,08-0,14 Relativamente plano, con pendientes menores al 5 %.

Infiltración	0,12-0,16 Suelo rocoso o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08-0,12 Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	0,06-0,08 Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos.	0,04-0,06 Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración.
Cobertura Vegetal	0,12-0,16 Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura.	0,08-0,12 Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20 % del área con buena cobertura	0,06-0,08 Regular a buena; 50 % del área con praderas o bosques, no más del 50 % cultivado	0,04-0,06 Buena a excelente; 90 % del área con praderas, bosques o cobertura equivalente.
Almacenamiento Superficial	0,10-0,12 Despreciable, pocas depresiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08-0,10 Baja; sistema de cauces superficiales, pequeños, bien definidos, sin zonas	0,06-0,08 Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04-0,06 Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos.
Si T > 10 años Amplificar Resultado por: T = 25; C x 1,10 T = 50; C x 1,20 T = 100; C x 1,25				

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 1.6-3

El método racional se ha utilizado ampliamente para determinar caudales de diseño en carreteras, debido a su simplicidad y lógica. Sin embargo, se debe tener presente sus limitaciones y las hipótesis involucradas. El método supone que el coeficiente de escorrentía se mantiene constante para distintas tormentas, lo cual es estrictamente válido sólo para áreas impermeables, de allí la necesidad de amplificar los valores de C para períodos de retorno altos.

2.3.1.3 Intensidad de precipitación

a) Obtención de curvas IDF

El diseño hidráulico de las obras de drenaje requiere el uso de las llamadas curvas intensidad-duración-frecuencia de lluvias IDF. Estas relaciones presentan la variación de la intensidad de la lluvia de distintas duraciones, asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia, siendo necesarias para estimar indirectamente el escurrimiento proveniente en función de la lluvia.

Estas familias de curvas llevan en las abscisas la duración de la lluvia, en ordenadas la intensidad y, en forma paramétrica, el periodo de retorno o la probabilidad. Ellas son el resultado de un análisis probabilístico de las lluvias máximas anuales de diferentes duraciones.

A continuación, se consultan dos procedimientos para calcular las curvas IDF: el primero se emplea cuando se cuenta con datos pluviográficos representativos del área de interés y el segundo permite obtener una estimación de estas curvas usando solamente datos pluviométricos. Este segundo procedimiento es útil cuando no se cuenta con información pluviográfica.

b) Obtención de curvas IDF a partir de datos pluviográficos

Para determinar las curvas IDF a partir de datos pluviográficos, es necesario contar con registros de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, con el fin de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas.

En general, el procedimiento de obtención de las curvas IDF a partir de datos pluviográficos se puede resumir en los siguientes pasos:

Selección de las Estaciones Pluviográficas.

Recolección de la información requerida: Generalmente se trata de bandas de los pluviógrafos con los registros de las precipitaciones diarias y horarias.

Selección de intensidades máximas: se debe examinar cada una de las tormentas ocurridas en un año y elegir la lluvia correspondiente a la hora más lluviosa, a las dos horas más lluviosas y así sucesivamente, para luego convertir los valores de altura de precipitación en intensidad de lluvia.

Ajuste de los datos con una función de distribución de probabilidades: una vez calculadas las intensidades máximas horarias de precipitación para cada estación y para cada año, es necesario asignar a cada duración de lluvia seleccionada un periodo de retorno, para luego ajustar dichos valores a una función de distribución de probabilidad. Los modelos

de mayor aceptación y mediante los cuales se efectúa normalmente el análisis son Gumbel (valor extremo tipo I) y Log- Pearson (tipo III).

Estimar $i_{(d,T)}$ usando la distribución de probabilidades seleccionada.

Graficar la intensidad de precipitación y la duración: de este modo, se obtienen los puntos de la curva asociada a un periodo de retorno dado. Luego, se repite la misma operación para otros periodos de retorno $T = 5, 10, 20, 30, 50, 100$.

Análisis estadístico: una vez definidas las curvas IDF para cada estación, resulta útil analizar el comportamiento de las variables involucradas, relacionando simultáneamente las tres variables en una familia de curvas a modo de representar la relación de la intensidad, duración y la frecuencia no solo en forma gráfica, sino que también en forma analítica. Con este fin, se recomienda utilizar la ecuación propuesta por Aparicio (1997), la cual ha sufrido una pequeña modificación, quedando expresada de la siguiente forma:

$$i = k * T^m / d^n$$

Donde K , m y n son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal múltiple, T es el periodo de retorno en años, d la duración en minutos u horas e i la intensidad de precipitación en mm/hr. Luego, aplicando los logaritmos, se llega a la forma de un modelo de regresión lineal múltiple, cuyo modelo se expresa en la siguiente ecuación:

$$\text{Log } i = \text{Log } k + m * \text{Log } T - n * \text{Log } d$$

Debe destacarse que formar las series anuales es un proceso largo y laborioso que involucra el examen cuidadoso de los rollos pluviográficos, la lectura de los valores, la digitación de la información, la contratación y verificación de los valores leídos con los registros pluviométricos cercanos y el análisis de las tormentas registradas para encontrar los máximos valores registrados para cada una de las duraciones seleccionadas.

En consecuencia, para proyectos ubicados en una zona próxima o de similares características climáticas a una o más estaciones de la cual se dispone de los datos

estadísticos, se podrá utilizar la curva IDF de dicha estación representativa, o bien estimar una curva usando los valores registrados en dos o más estaciones representativas.

c) **Obtención de curvas IDF a partir de datos pluviométricos**

Debido a que la disponibilidad de registros pluviográficos es escasa, y si solo se dispone de estadísticas pluviométricas diarias, solo se dispondrá de un punto de la curva, correspondiendo a la intensidad media diaria o en 24 hrs.

Es importante señalar que cuando se dispone de datos aportados por un pluviómetro en una estación, es evidente que, en general, solo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas.

Sin embargo, estadísticamente se ha establecido en diversas partes del mundo que la forma de las curvas intensidad-duración es muy poco variable para tormentas de un mismo tipo, por lo que resulta válido estimar intensidades en distintas duraciones de las tormentas a partir de un punto conocido de ellas, normalmente, la intensidad media diaria.

e) **Fórmula de Grunsky**

En la literatura se han propuesto diversas fórmulas para definir las curvas IDF que pretenden tener validez universal, entre las que destaca la denominada fórmula de Grunsky que se muestra a continuación:

$$i_t = i_{24} \sqrt{24/t} \left(\frac{mm}{hr} \right)$$

Donde:

- i_t = Es la intensidad en una duración cualquiera t
- i_{24} = Es la intensidad media en 24 horas
- t = Duración en horas

Conocida entonces la precipitación máxima diaria para un cierto periodo de retorno T , dada por la expresión:

$$i_{24} = P_d/24 \left(\frac{mm}{hr} \right)$$

Es posible obtener la relación entre la intensidad y la duración aplicando la fórmula de Grunsky.

f) Relación de Bell

Preocupado por estudiar la relación existente entre la lluvia caída y su duración, como una forma de obtener una estimación para las lluvias de duración menor a 24 horas en función de las lluvias diarias, Bell (1969) estudió las razones entre lluvias de distintas duraciones e igual frecuencia o periodos de retorno, y también la razón entre lluvias de diferentes periodos de retorno e igual duración, utilizando datos de un gran número de estaciones ubicadas en una extensa zona geográfica, que incluyó Estados Unidos, Hawaii, Australia, Rusia, Alaska, Puerto Rico y África. Los resultados obtenidos son válidos para lluvias provenientes de tormentas de tipo convectivo con duraciones entre 10 minutos y 2 horas.

Las conclusiones obtenidas indican que las razones entre lluvias de distintas duraciones o distinto periodo de retorno, llamadas coeficientes de duraciones y coeficientes de frecuencia, respectivamente, son muy constantes para todos los puntos indicados y el autor propuso su aplicación en otras zonas para tormentas convectivas.

La expresión de cálculo propuesta es:

$$P_t^T = (0,21Int + 0,52) * (0,54t^{0,25} - 0,5)P_{60}^{10}$$

Donde:

P_t^T = Lluvia en mm de duración t minutos y T años de periodo de retorno

T = Periodo de retorno en años

t = Duración de la lluvia en minutos

Finalmente, la intensidad correspondiente a dicha precipitación queda dada por:

$$i \left(\frac{mm}{hr} \right) = P_t^T / \left(\frac{t}{60} \right)$$

De esta forma, se obtiene una relación entre la intensidad de precipitación, la duración y el periodo de retorno, obtenida a partir de una lluvia de una hora de duración, correspondiente a 10 años periodo de retorno. La dificultad en este caso es determinar este último parámetro.

2.4 Diseño Hidráulico de Alcantarillas

2.4.1 Fórmula de Manning

La fórmula de Manning es una evolución de la fórmula de Chezy para el cálculo de la velocidad del agua en canales abiertos y tuberías, propuesto por el ingeniero irlandés Robert Manning en 1889:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde:

V = Velocidad media del agua en m/s que es función del tirante hidráulico

n = Coeficiente de rugosidad que depende de las paredes del canal o tubería

R = Radio hidráulico en metros que es función del tirante hidráulico

S = Pendiente del canal, m/m

La fórmula también puede estar expresada de la siguiente manera:

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

Donde:

A = Área mojada en m² es función del tirante.

De esta última manera, la fórmula permite trabajar con caudales, tomando en cuenta la continuidad hidráulica $Q = V \cdot A$.

2.4.1.1 Coeficiente de rugosidad (n)

Respecto del coeficiente de rugosidad, puede decirse que no existe método exacto o único para determinarlo y que, en general, se requiere experiencia para hacer estimaciones, muchas veces apoyadas también en tablas y/o antecedentes específicos de que se disponga. Es inusual contar con información hidráulica que permita deducir directamente coeficientes de rugosidad de un cauce.

Para canales naturales considerados de lecho fijo (canales no aluviales), existen numerosos factores que pueden condicionar la elección de un valor determinado del coeficiente de rugosidad como los indicados en la tabla a continuación:

Tabla 5. Coeficiente de rugosidad

• Conductos Abiertos Revestidos y de Alineamiento Recto:		
Características	Calidad buena	Calidad Regular
Concreto vaciado en formaletas sin acabado	0,013	0,017
Concreto alisado a boca de cepillo	0,013	0,015
Concreto emparejado con llana	0,012	0,014
Mortero lanzado, sección buena	0,016	0,019
Piedras irregulares, unidas con mortero cemento	0,017	0,020
Mampostería de piedra bruta y mortero de cemento frisado	0,016	0,020
• Conductos Abiertos Revestidos y de Alineamiento Recto:		
Tierra, limpio de vegetación	0,016	0,018
Tierra, con hierba corta y pocas malezas	0,022	0,027
Suelo con alto contenido de grava, limpio	0,022	0,025
Tierra, sección irregular y muchas malezas	0,030	0,035

Tierra, con lados limpios de vegetación y fondo de grava	0,025	0,030
Tierra, con lados limpios de vegetación y fondo de cantos rodados	0,030	0,035
Roca lisa y con pocas irregularidades	0,035	0,040
Roca dentada y con muchas irregularidades	0,040	0,045
Canales sin mantenimiento con maleza densa de la misma altura del agua o mayor	0,080	0,120
Canales sin mantenimiento con fondo limpio y rastrojo y matorrales en los lados. Gastos Altos	0,050	0,080
Canales sin mantenimiento con fondo limpio y rastrojo y matorrales en los lados. Gastos Bajos	0,070	0,110

Fuente: Bolinaga, J. J., (1979). Drenaje Urbano, INOS

2.4.1.2 Radio hidráulico

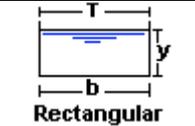
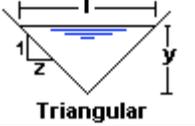
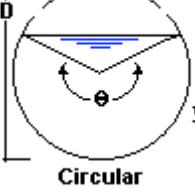
El radio hidráulico es un parámetro importante en el dimensionamiento de canales, tubos y otros componentes de las obras hidráulicas, generalmente es expresado por la letra R. y en metros; es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, es decir:

$$R = \frac{A}{P}$$

Las expresiones que permiten su cálculo están en función de la forma geométrica de la sección transversal del canal.

En la siguiente tabla se resumen las secciones más utilizadas con las unidades del sistema internacional.

Tabla 6. Fórmulas más usuales para radios hidráulicos de diferentes secciones

Tipo de sección	Área A(m ²)	Perímetro mojado (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 <p>Rectangular</p>	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b
 <p>Trapezoidal</p>	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$
 <p>Triangular</p>	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$
 <p>Circular</p>	$\frac{(\theta - \sin \theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right) \frac{D}{4}$	$\frac{\sin \frac{\theta}{2} D}{2\sqrt{y(D - y)}}$
 <p>Parabólica</p>	$2/3Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: Ven Te Chow (1982). Hidráulica de los canales abiertos

2.4.1.3 Pendiente del canal

Entre los factores a tomar en cuenta para la ubicación de las alcantarillas está la pendiente ideal, definida como aquella que no ocasiona sedimentos ni velocidad excesiva, evita la erosión y exige menor longitud. La pendiente recomendada para tubos es de 1 a 2 %. Para evitar la sedimentación, se aconseja que se adopte como mínimo una pendiente de 0.5 % ya que, de lo contrario, se ocasionará la obstrucción paulatina del drenaje.

Se deberá siempre, en lo posible, mantener la pendiente del cauce natural, ya que la alteración del mismo puede ocasionar cambios tanto aguas arriba como aguas abajo.

2.4.2 Número de Froude

El número de Froude (Fr) es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. Debe su nombre al ingeniero hidrodinámico y arquitecto naval inglés William Froude (1810-1879). De esta forma, el número de Froude se puede escribir como:

$$Fr^2 = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas de gravedad}}$$

El número de Froude en canales abiertos informa del estado del flujo hidráulico. El número de Froude en un canal se define como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gDh}}$$

Donde:

V = velocidad media de la sección en el canal (m/s)

Dh = profundidad hidráulica (A/T) (m), siendo A el área de la sección transversal del flujo y T el ancho de la lámina libre.

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

En el caso que:

Sea $Fr > 1$ el régimen del flujo será supercrítico

Sea $Fr = 1$ el régimen del flujo será crítico

Sea $Fr < 1$ el régimen del flujo será subcrítico

2.4.3 Control de entrada y de salida

El método de diseño de alcantarillas presentado está basado en el uso de monogramas y ecuaciones polinómicas de quinto grado que fueron generados mediante modelos de regresión que entregan la carga hidráulica a la entrada. La correlación entre los

monogramas y las ecuaciones no es exacta, por lo que se puede considerar un error de más menos 10 % en términos de carga de agua en la entrada.

Para el diseño de la alcantarilla, se deberá realizar el control de entrada y salida; el control de flujo para una alcantarilla que tiene una velocidad del flujo alta, categorizada como supercrítica en el canal de la misma, se realiza en la entrada. Por el contrario, una alcantarilla con control de salida tendrá una profundidad relativa y velocidad más lenta de flujo, denominada flujo subcrítico, para el mismo, el control se realiza en la salida de la alcantarilla.

2.4.3.1 Carga hidráulica en la entrada o profundidad de remanso

Corresponde a la profundidad del agua en la entrada, medida desde el punto más bajo (umbral o *radier* de la alcantarilla). Esta obra, al limitar el paso libre de agua, causará un aumento de nivel aguas arriba y, en consecuencia, puede ocasionar daños a la carretera. En el cálculo hidráulico se acostumbra a suponer que la altura de agua corresponde al nivel de energía total disponible. La carga máxima de diseño a la entrada se limita según se indica a continuación:

Tabla 7. Carga hidráulica de diseño H_Wo máx.

Tipo de cauces	Tubos	Cajones	Losas (L≤6m)
Canales	D (diámetro)	H (altura total)	H - 0,10 m
Diseño Cauces Naturales	D + 0,30 m	H + 0,30 m	H - 0,10 m
Verificación de Cauces Naturales	D + 0,60 m	H + 0,60 m	H
Pero, H _W o máx. no puede pasar la cota exterior del SAP -0,30 m Si L > 6m revancha como en puentes			

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 2.3-1 págs. 54/313

2.4.3.2 Altura de agua a la salida

Corresponde a la profundidad del agua medida desde el punto más bajo de la alcantarilla en la sección de salida. Queda determinada por el cauce hacia aguas abajo cuando existen obstrucciones que remansan el agua.

2.4.3.3 Velocidad en la salida

Esta velocidad es, en general, mayor que la velocidad de escurrimiento en el cauce natural y debe limitarse para evitar la socavación y erosión del cauce hacia aguas abajo. Los valores máximos recomendados se indican en la tabla a continuación:

Tabla 8. Velocidades máximas admisibles (m/s) en canales no revestidos

Tipo de terreno	Flujo permanente (m/s)	Flujo intermitente (m/s)
Arena fina (no coloidal)	0,75	0,75
Arcilla arenosa (no coloidal)	0,75	0,75
Arcilla limosa (no coloidal)	0,90	0,90
Arcilla fina	1,00	1,00
Ceniza volcánica	1,20	1,00
Grava fina	1,50	1,20
Arcilla dura (coloidal)	1,80	1,40
Material graduado (no coloidal)		
Desde arcilla a grava	2,00	1,50
Desde limo a grava	2,10	1,70
Grava	2,30	1,80
Grava gruesa	2,40	2,00
Desde grava a piedras (bajo 15 cm)	2,70	2,10
Desde grava a piedras (sobre 20 cm)	3,00	2,40

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 2.3-2 págs. 54/313

Los principales factores que afectan a esta velocidad son la pendiente y rugosidad de la alcantarilla, no influyendo significativamente la forma y tamaño, salvo en los casos en que se produce flujo a boca llena.

Las velocidades de salida obtenidas por este método suelen ser algo mayores que las reales debido a que la altura normal, supuesta al aplicar la fórmula de Manning, rara vez se alcanza en la corta longitud de la mayoría de las alcantarillas.

En el caso con control de salida, la velocidad media en la salida de la alcantarilla será igual al caudal de descarga, dividido por el área de la sección transversal de la corriente en dicho lugar.

Esta área de escurrimiento puede ser la correspondiente a la profundidad crítica, o la correspondiente al nivel de la superficie libre en la salida (siempre que este nivel caiga por debajo de la cota del dintel del conducto) o de la sección transversal llena del conducto.

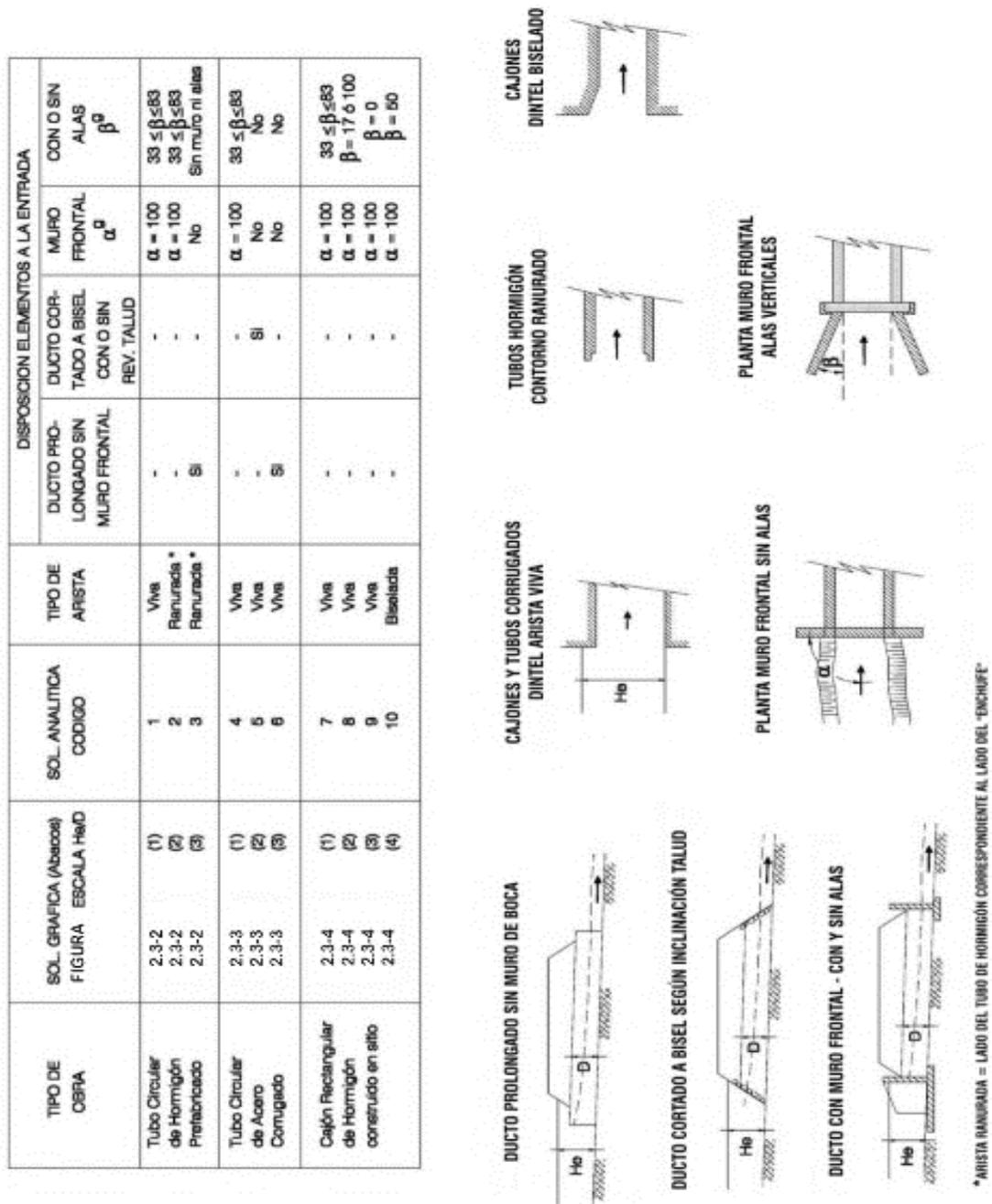
2.4.3.4 Alcantarillas con control de entrada

El control de entrada significa que la capacidad de una alcantarilla está determinada en su entrada por la profundidad de remanso (H_{W0}) y por la geometría de la embocadura, que incluye la forma y área de la sección transversal del conducto y el tipo de aristas de aquella.

La profundidad del remanso es la distancia vertical desde el umbral de la alcantarilla, en la entrada, hasta la línea de energía total de esa sección (profundidad + altura de velocidad). Debido a las pequeñas velocidades de la corriente en los remansos y a la dificultad en determinar la altura de velocidad para todos los escurrimientos, se admite que el nivel de agua y la línea de energía total coinciden, lo que significa que las profundidades del remanso, obtenidos de los gráficos del “Manual de Carreteras” de la ABC, puedan ser mayores que las que se presentan en los casos prácticos, lo que da una mayor seguridad a la obra.

La Figura 10 presenta un resumen de los diferentes casos que pueden presentarse en alcantarillas de sección circular y de cajón. En esta Figura se identifican los ábacos y las ecuaciones que se deben usar en cada caso, dependiendo de la forma de la sección y de la disposición de los elementos a la entrada de la obra, es decir, muros frontales, alas, tipo de aristas y forma como empieza el conducto. En la misma Figura, se definen las situaciones que pueden darse a la entrada y se definen los ángulos de los muros frontales y de los muros de ala.

Figura 10. Clasificación de tubos y cajones para el cálculo de HWO



Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Figura 2.3-1 págs. 58/313

Federal Highway Administration (FHWA) ha generado, mediante modelos de regresión, expresiones polinómicas de quinto grado que entregan la carga hidráulica a la entrada

directamente. Estas ecuaciones entregan resultados equivalentes a los obtenidos mediante los gráficos y son válidas para cargas comprendidas entre la mitad y tres veces la altura de la alcantarilla. Las expresiones son del tipo siguiente:

$$Hwo = [a + bzF + c(zF)^2 + d(zF)^3 + e(zF)^4 + f(zF)^5 - 0,5i]D$$

$$Circular F = \frac{Q}{D^{5/2}} \quad Rectangular F = \frac{Q}{BD^{3/2}}$$

Donde:

Hwo = Carga en la entrada (m)

a al f = Coeficientes de regresión

Q = Caudal (m³/s)

D = Altura de la alcantarilla; diámetro en caso de tubos (m)

B = Ancho de alcantarilla (m)

i = Pendiente longitudinal (m/m)

z = 1.81130889 (factor de conversión para unidades métricas)

Tabla 9. Coeficientes de regresión para alcantarillas con control de entrada

Descripción según tipo de obra	Cód.	a	b	c	d	e	f
Alcantarilla circular de concreto, aristas vivas Muro Frontal, alas $33 \leq \beta \leq 83$ grados	1	0,08748	0,706578	-0,2533	0,0667	-0,00662	0,000251
Alcantarilla circular de concreto, aristas ranuradas, Muro Frontal, alas $33 \leq \beta \leq 83$ grados	2	0,11409	0,653562	-0,2336	0,059772	-0,00616	0,000243
Alcantarilla circular de concreto, aristas ranuradas, Tubo Prolongado (sin muro ni alas)	3	0,10878	0,665386	-0,2338	0,057959	-0,00558	0,000205
Alcantarilla circular de acero corrugado, aristas vivas Muro Frontal, alas $33 \leq \beta \leq 83$ grados	4	0,16743	0,538595	-0,14937	0,039154	0,00344	0,000116
Alcantarilla circular de acero corrugado, tubo cortado a bisel (sin alas)	5	0,10713	0,757789	-0,3615	0,123393	-0,01606	0,000767
Alcantarilla circular de acero corrugado, tubo prolongado (sin muros ni alas)	6	0,18732	0,567719	-0,15654	0,044505	-0,00344	0,00009
Alcantarilla de cajón, aristas vivas Muro Frontal, alas $33 \leq \beta \leq 83$ grados	7	0,07249	0,507087	-0,11747	0,02217	-0,00149	0,000038
Alcantarilla de cajón, aristas vivas Muro Frontal, alas con $\beta = 17$ grados o 100 grados	8	0,12211	0,505435	-0,10856	0,020781	-0,00137	0,000035
Alcantarilla de cajón, aristas vivas Muro Frontal, alas con $\beta = 0$ grados	9	0,14413	0,461363	-0,09215	0,02003	-0,00136	0,000036
Alcantarilla de cajón, aristas biseladas, Muro Frontal, alas con $\beta = 50$ grados	10	0,15660	0,398935	-0,06404	0,011201	-0,00064	0,000015

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 2.3-3 págs. 63/313

2.4.3.5 Alcantarillas con control de salida

El escurrimiento en alcantarillas con control de salida puede presentarse con conducto lleno o parcialmente lleno, ya sea en una zona o en toda la longitud de la alcantarilla. Si cualquier sección transversal escurre llena, se dice que el escurrimiento es a sección llena. La Figura 10 muestra varias condiciones de escurrimiento con control de salida para varias alturas. Los procedimientos de cálculo son diferentes si la salida es sumergida o no y, por lo tanto, se analizarán los distintos casos que se ilustran en la Figura 10 separadamente.

a) Salida sumergida

En este caso, la carga HL o energía necesaria para hacer circular un gasto dado por la alcantarilla, se emplea en vencer las pérdidas de entrada, pérdidas por frotamiento, evaluadas con la ecuación de Manning y altura de velocidad en la salida.

Por consiguiente, se calcula con la siguiente relación:

$$HL = \left[1 + K_e + \frac{19,6n^2L}{R^{1,33}} \right] \frac{V^2}{19,6}$$

Donde:

K_e = Coeficiente de la pérdida de carga en la entrada

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

L = Longitud de la alcantarilla [m]

R = Radio hidráulico [m]

V = Velocidad media en la alcantarilla (m/s)

La carga HL es la diferencia entre la línea de energía en la sección de entrada y la cota piezométrica en la sección de salida. Sin embargo, en general, debido a que la velocidad en el remanso es pequeña, se supone que la línea de energía es coincidente con el nivel de aguas a la entrada, lo que implica que los niveles calculados pueden ser algo mayores que los reales.

La Tabla 10 entrega coeficientes de pérdida de carga en la entrada para los distintos tipos de entrada en alcantarillas que escurren llenas o parcialmente llenas con control de salida. Este coeficiente, al ser multiplicado por la altura de velocidad, entrega la pérdida de energía debida a la singularidad que produce la entrada a la obra.

Tabla 10. *Coeficientes de pérdida de carga a la entrada con control de salida*

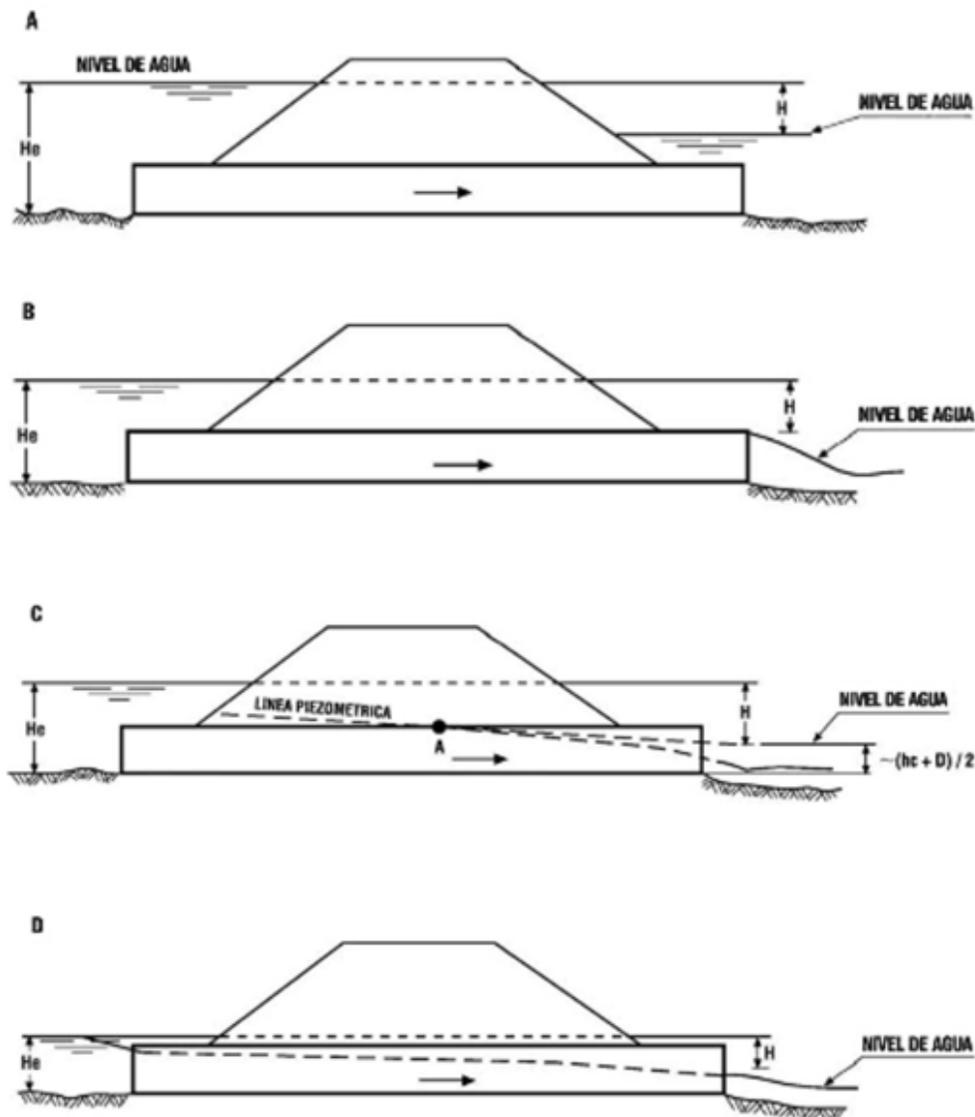
Tipo de estructura y características de la entrada	Coef. (Ke)
1. Tubos de hormigón	
- Conducto prolongado fuera del terraplén	
- Arista ranurada	0.20
- Arista viva	0.20
- Con muro de cabecera, con o sin muros de ala	
- Arista ranurada	0.20
- Arista viva	0.50
- Arista redondeada ($r=1/12D$)	0.20
- Arista biselada	0.20
2. Tubos circulares de metal corrugado	
- Conducto prolongado fuera del terraplén	
- Sin muro de cabecera	0.90
- Con muro de cabecera perpendicular al eje del tubo sin o con muros de ala y aristas vivas.	0.50
- Con muro de cabecera perpendicular al eje del tubo con o sin muros de ala y aristas biseladas.	0.25
3. Alcantarillas de cajón en hormigón armado con muro de cabecera paralelo al terraplén	0.50
- Sin muros de ala, y bordes de arista viva	0.20
- bordes aristas redondeadas ($r = 1/12 D$) o biseladas	0.50
- Con muros de ala formando ángulos entre 30° y 75° con el eje del conducto	0.20
- Bordes de aristas vivas	0.50
- Bordes del dintel con aristas redondeadas ($r = 1/12 D$) o biseladas	0.70
- Con muros de ala formando ángulos entre 10° y 25° con el eje del conducto, y aristas vivas	0.10
- Con muros de ala alabeados y aristas redondeadas ($r = 1/4 D$) en el dintel	

Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Tabla 2.3-4 pág. 66/313

Calculada la carga HL, el nivel de aguas a la entrada (H_e) se calcula sumando la carga al nivel de aguas a la salida de la alcantarilla. En la determinación de este último, pueden presentarse dos situaciones. Si a la salida, el cauce tiene una sección transversal, pendiente

y rugosidad razonablemente uniformes, se puede suponer la existencia de altura normal a la salida y calcularla empleando la fórmula de Manning. Si por el contrario, existen en el cauce hacia aguas abajo disminuciones de ancho o pendiente que impliquen un control del régimen hidráulico del escurrimiento, debe calcularse el nivel de aguas a la salida de la alcantarilla, empleando los métodos de cálculo de ejes hidráulicos o curvas de remanso.

Figura 11. *Escurremientos en alcantarillas con control de salida*



Fuente: Manual de carreteras Vol. II ABC – Hidrología y drenaje – Figura 2.3-8 pág. 67/313

b) Salidas no sumergidas

Si el nivel de la corriente inmediatamente aguas abajo de la salida se encuentra por debajo del dintel de la alcantarilla, la condición de salida sumergida no existe y la determinación del nivel de aguas a la entrada se realiza en forma diferente. La mayoría de los cauces naturales suelen ser relativamente anchos comparados con la alcantarilla, y la profundidad de agua en el cauce puede ser menor que la profundidad crítica de la alcantarilla, por lo cual, el nivel de la corriente aguas abajo no influye en la capacidad o en el nivel de remanso en la entrada. Los casos en que se produce esta situación corresponden a los presentados en la Figura 11, letras B, C y D. Para encontrarse en las condiciones de escurrimiento mostradas en el caso C, la alcantarilla debe escurrir llena, en parte de su longitud. La línea piezométrica para la porción llena pasará por el punto en que la corriente se separa de la parte superior del conducto, representado por el punto A de la Figura. Se demuestra, por cálculos de la curva de remanso, que si se prolonga en recta, la línea piezométrica cortará el plano de la sección transversal de salida, en un punto situado por encima de la superficie libre de la corriente que en dicho sitio tiene la profundidad crítica. Este punto se encuentra, aproximadamente, en la mitad de la distancia entre el dintel de la alcantarilla y a profundidad crítica. La prolongación de la recta mencionada anteriormente puede considerarse como una línea piezométrica equivalente, y la carga H determinada por la ecuación o los nomogramas puede sumarse al nivel de aquel punto para obtener la cota de la superficie del remanso de entrada.

La condición de escurrimiento lleno en parte de la longitud del conducto (Figura 11 caso C) se producirá cuando la profundidad del agua a la entrada, medida desde el nivel de la superficie del remanso calculado anteriormente, es igual, o mayor que la cantidad:

$$D + (1 + ke) \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

V = Es la velocidad media para la sección transversal llena del conducto

K_e = La pérdida de carga en la entrada

D = La altura interior de la alcantarilla

Si la profundidad de agua en la entrada es menor que el valor precedentemente consignado, la corriente presentará una superficie libre en toda la longitud del conducto, caso D.

Para obtener con precisión la profundidad en la entrada, en las condiciones de escurrimiento del caso D, deberá recurrirse al cálculo de la curva de remanso. La solución aproximada recomendada es la misma que la dada para las condiciones de escurrimiento del caso C, con la reserva de que la precisión en el cálculo de la profundidad en la entrada H_e disminuye a medida que decrece el caudal de descarga.

Para los fines del diseño, este método es generalmente satisfactorio para profundidades del remanso de entrada mayores a 0,75 veces la altura del conducto.

Calculada la carga (H) la profundidad del agua en la entrada medida desde el umbral (H_e) puede expresarse por una sola relación para todas las condiciones de escurrimiento con control en la salida.

Esta ecuación es la siguiente:

$$H_e = HL + Tw - LS$$

Donde:

H_e = Profundidad de agua en la entrada (m)

Tw = Carga de la alcantarilla (m)

LS = Delta altura por pendiente y longitud (m)

HL = Cota piezométrica en la salida medida desde el umbral de la salida de la alcantarilla [m]

Cuando el nivel superficial de la corriente inmediatamente aguas abajo de la salida iguala o sobrepasa el dintel, T_w es igual a dicha profundidad de agua. Si el nivel aguas abajo se encuentra bajo el dintel (Casos B, C y D), T_w es el mayor de dos valores: la profundidad de aguas en la salida o el valor $(h_c + D)/2$. Esta última expresión representa la altura de la línea piezométrica aproximada, mencionada anteriormente.

La altura crítica para un gasto Q (m^3/s), en una sección rectangular o cuadrada, está dada por:

$$h_c = 0.467 \left(\frac{Q}{B} \right)^{2/3}$$

Donde:

B = ancho de la obra en metros.

2.5 Método de la Modelación Hidrodinámica

2.5.1 ¿Qué es Storm Water Management Model?

Storm Water Management Model (modelo de gestión de aguas pluviales) de la EPA SWMM es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, especialmente en alcantarillados urbanos. *El módulo de escorrentía o hidrológico* de SWMM funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico de SWMM analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos regulados. Asimismo, SWMM es capaz de seguir la evolución de la cantidad y la calidad del agua de escorrentía de cada cuenca, así como el caudal, el nivel de agua en los pozos o la calidad del agua en cada tubería y canal durante una simulación compuesta por múltiples intervalos de tiempo.

SWMM se desarrolló por primera vez en 1971, habiendo experimentado desde entonces diversas mejoras. La edición actual, que corresponde a la 5° versión del programa, es un

código reescrito completamente a partir de ediciones anteriores. Funcionando bajo Windows, EPA SWMM 5 proporciona un entorno integrado que permite introducir datos de entrada para el área de drenaje, simular el comportamiento hidráulico, estimar la calidad del agua y ver todos estos resultados en una gran variedad de formatos. Entre estos, se puede incluir mapas de contorno o *isolíneas* para el área de drenaje, gráficos y tablas de evolución a lo largo del tiempo, diagramas de perfil y análisis estadístico de frecuencia.

La última versión de SWMM ha sido realizada por Nacional Risk Management Research Laboratory de Estados Unidos, perteneciente a la agencia para la protección del medio ambiente, contándose con la colaboración de la consultoría CDM, Inc.

2.5.2 Características del modelo hidrológico

SWMM considera distintos procesos hidrológicos que se producen en la salida de las aguas urbanas.

Entre estos se encuentran:

- Precipitaciones variables en el tiempo
- Evaporación de las aguas superficiales estancadas
- Acumulación y deshielo de nieve
- Intercepción de precipitaciones por almacenamiento en depresiones
- Infiltraciones de las precipitaciones en capas del suelo no saturadas
- Entrada del agua de la infiltración en acuíferos
- Intercambio de flujo entre los acuíferos y el sistema de transporte
- Modelo de depósitos no lineales para el flujo superficial

La variabilidad espacial en todos estos procesos se alcanza dividiendo una determinada área de estudio en áreas de captación de agua más pequeñas y homogéneas (N.d.T. denominadas cuencas). Cada una de estas contiene su propia fracción de subáreas entre las distintas cuencas o entre los puntos de entrada al sistema de drenaje.

Junto a esto, SWMM contiene un conjunto flexible de herramientas de modelación de características hidráulicas utilizado para analizar el flujo debido a la escorrentía superficial

y los aportes extremos de caudal a través de una red de tuberías, canales dispositivos de almacenamiento y tratamiento, y demás estructuras. Estas herramientas incluyen la capacidad de:

- Manejar redes de tamaño ilimitado
- Utilizar una amplia variedad de geometrías para las conducciones, tanto abiertas como cerradas, así como los canales naturales
- Modelar elementos especiales como unidades de almacenamiento y tratamiento, divisores de flujo, bombas, vertedores y orificios

Ampliar caudales externos y concentraciones para determinar la calidad del agua de las aguas superficiales, intercambio de caudales con los acuíferos, caudales de infiltración en los colectores dependientes de la precipitación, caudales sanitarios en tiempo seco y aportes extremos definidos por el usuario.

Realizar los análisis hidráulicos mediante distintos métodos como el flujo uniforme, la onda cinemática o la modelación completa por onda dinámica.

Modelar distintos regímenes de flujo, como pueden ser: remanso, entrada en carga, flujo inverso y acumulación en superficie.

Aplicar controles dinámicos definidos por el usuario para simular el funcionamiento de las bombas, la abertura de los orificios o la posición de la cresta de un vertedero.

Además de modelar la generación y transporte de la escorrentía superficial, SWMM puede también estimar la producción y evolución de cargas contaminantes asociadas a dicha escorrentía. Se pueden modelar los siguientes procesos para cualquier número de sustancias asociados a la calidad del agua definidas por el usuario:

- Acumulación del contaminante durante tiempo seco para diferentes usos del suelo.
- Arrastre del contaminante en determinantes usos del suelo durante episodios de tormenta.
- Contribución directa debida la propia lluvia.
- Reducción de la acumulación debida a la limpieza de calles en tiempo seco.
- Reducción en cargas de arrastre debidas a buenas prácticas de gestión.

- Entradas de flujos sanitarios en tiempo seco y otros aportes extremos especificados por el usuario en cualquier punto de drenaje.
- Seguimiento de las sustancias asociadas a la calidad del agua a lo largo de todo el sistema.
- Reducción en la concentración del contaminante por medio de tratamientos en depósitos o debido a procesos naturales en tuberías y canales.

2.5.3 Aplicaciones típicas de SWMM

Desde su aparición, el SWMM se ha utilizado en miles de redes de evacuación de aguas tanto residuales como pluviales. Entre las aplicaciones típicas se puede mencionar.

- Diseño y dimensionamiento de componentes de la red de drenaje para prevenir inundaciones.
- Dimensionamiento de estructuras de retención y accesorios correspondientes para el control de inundaciones y protección de la calidad de las aguas.
- Delimitación en zonas de inundación en barrancos y cauces naturales.
- Diseño de estrategias de control de la red para minimizar el número de descargas de sistemas unitarios.
- Evaluación del impacto de aportes e infiltraciones en las descargas de sistemas de evacuación de aguas residuales.
- Generar cargas de fuentes contaminantes no puntuales para estudios de acumulación de residuos.
- Evaluar la eficacia de las buenas prácticas de gestión número para reducir las cargas contaminantes durante una tormenta

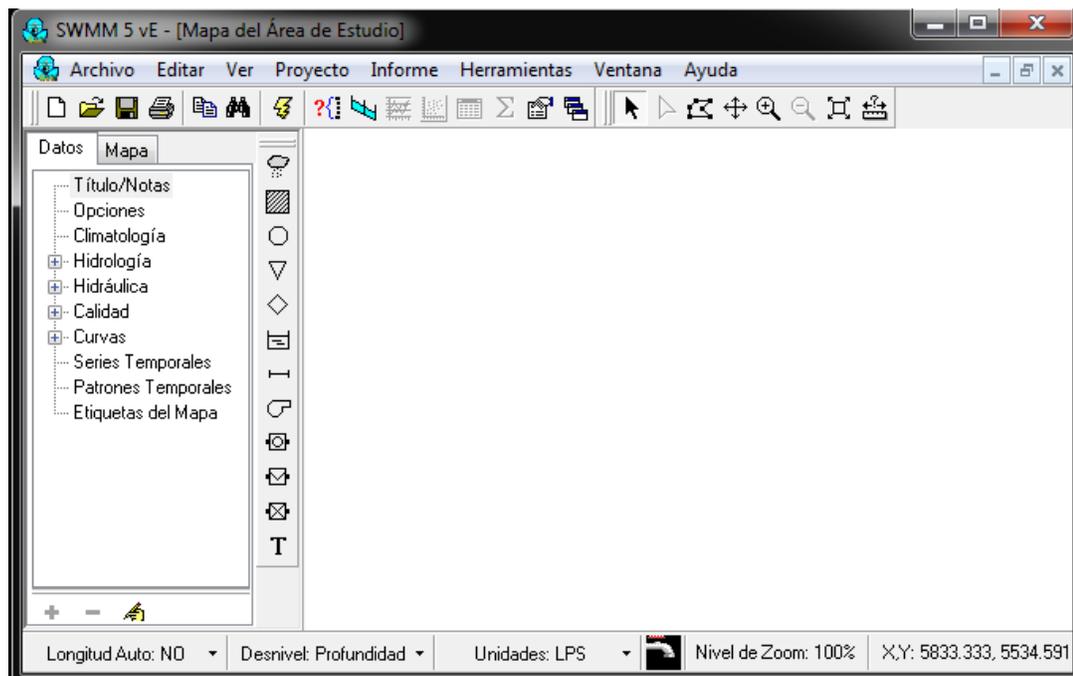
2.5.4 Herramientas utilizadas del programa SWMM

El tutorial presentado en este proyecto está enfocado a cómo se desarrolló el cálculo del caudal de diseño y el dimensionamiento de las alcantarillas; sin embargo, este software tiene una serie de diversas aplicaciones.

2.5.4.1 Ventana principal de SWMM

La ventana principal de EPA SWMM presenta el aspecto mostrado en la Figura 12. Ésta consiste en los siguientes elementos de interacción con el usuario: un Menú Principal, varias Barras de Herramientas, una Barra de Estado, un Mapa del Área de Estudio, un Visor y el Editor de Propiedades. A continuación, se proporciona una descripción más detallada de estos elementos en las siguientes secciones.

Figura 12. Vista General del espacio de trabajo de SWMM



Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

El menú principal.- La barra principal de EPA SWMM se sitúa a lo largo de la parte superior de la ventana principal, y contiene una colección de menús utilizados para trabajar con el programa. Estos menús incluyen:

- Menú Archivo (File)
- Menú Editar (Edit)
- Menú Ver (View)
- Menú Proyecto (Project)

Menú Informe (Report)

Menú Herramientas (Tools)

Menú Ventana (Window)

Menú Ayuda (Help)

Menú Archivo.- El Menú Archivo contiene comandos para abrir y salvar archivos de datos, así como para imprimir.

Tabla 11. Comandos de Archivo

Comando		Descripción
New	Nuevo	Crea un nuevo proyecto EPA SWMM
Open	Abrir	Abre un proyecto existente
Reopen	Reabrir	Reabre un proyecto existente usado recientemente
Save	Guardar	Salva el proyecto actual
Save As	Guardad como	Salva el proyecto actual con un nombre diferente
Export	Exportar	Exporta un mapa de área de estudio y datos a un archivo
Combine	Combinar	Utilidad para combinar archivos de interfaz
Page setup	Configurar pagina	Muestra el margen de la página y la orientación para la impresión
Print Prev	Vista preliminar	Muestra en pantalla como quedaría la impresión de página actual
Print	Imprimir	Imprime la página actual
Exit	Salir	Sale de EPA SWMM

Fuente: Elaboración Propia

Menú Edición.- El Menú Edición contiene comandos para editar y copiar.

Tabla 12. Menú Edición

Comando		Descripción
Copy to	Copiar	Copia la ventana activa (mapa, informe, grafico o tabla) al portapapeles o a archivo
Select Object	Seleccionar objeto	Permite la selección de un objeto del mapa
Select vertex	Seleccionar vértices	Permite la selección de los vértices de una cuenta o una línea
Select region	Seleccionar región	Permite al usuario seleccionar una región en el mapa, seleccionando así múltiples objetos
Select all	Seleccionar todo	Permite seleccionar todos los objetos cuando la ventana activa es la del mapa, o todas las celadas cuando la ventana activa es la del informe de tabla

Find	Buscar	Localiza un objeto específico en el mapa
Group edit	Edición de grupo	Edita una propiedad para el grupo de objetos que se encuentran dentro de una región definida en el mapa
Group delete	Borrar grupo	Borra un grupo de objetos que se encuentran dentro de una región definida en el mapa

Fuente: Elaboración propia

Menú Ver.- El Menú Ver controla cómo se ve el mapa del área de estudio

Tabla 13. Menú Ver

Comando		Descripción
Dimensions	Dimensiones	Muestra las dimensiones del área de estudio.
Backdrop	Fondo	Permite añadir, ubicar y presentar una imagen de fondo en el mapa.
Pan	Desplazar	Desplaza la vista a lo largo del mapa.
Zoom in	Acercar	Acerca la vista de una zona del mapa.
Zoom out	Alejar	Aleja la vista de una zona del mapa.
Full Extent	Extensión	Muestra el mapa en toda su extensión.
Query	Consulta	Destaca en el mapa los objetos que cumplen ciertos criterios especificados por el usuario.
Overview	Vista general	Presenta una visión completa del mapa.
Objects	Objetos	Presenta las distintas clases de objetos del mapa.
Legends	Leyendas	Presenta las leyendas del mapa.
Toolbars	Barra de herramientas	Presenta la barra de herramientas.

Fuente: Elaboración Propia

Menú proyectos. - El Menú Proyectos muestra comandos relacionados con el proyecto que se está analizando:

Tabla 14. Menú Proyectos

Comando		Descripción
Summary	Resumen	Muestra un resumen con el número de objetos de cada tipo.
Details	Detalles	Muestra una lista detallada sobre todos los datos del proyecto
Default values	Valores por defecto	Edita las propiedades por defecto del proyecto
Calibration Data	Datos de calibración	Registra los archivos con datos de calibración del proyecto
Run Simulation	Calcular	Pone en marcha la simulación

Fuente: Elaboración propia

Menú Informe. - El Menú Informe consta de comandos que se utilizan para mostrar los resultados del análisis en diversos formatos:

Tabla 15. Menú Informe

Comandos		Descripción
Status	Estado	Presenta un informe del estado de la última simulación realizada
Grafics	Gráficos	Presenta los resultados de la simulación en forma gráfica.
Table	Tabla	Presenta los resultados de la simulación en forma de tabla
Statistics	Estadísticas	Presenta un análisis estadístico de los resultados de la simulación
Options	Personalizar	Controla el estilo de la presentación del gráfico activo en ese momento.

Fuente: Elaboración propia

Menú Herramienta.- El Menú Herramienta contiene los siguientes comandos:

Tabla 16. Menú Herramienta

Comando		Descripción
Preferences	Preferencias del programa	Escoger tipo de letra y precisión de las unidades.
Map options	Opciones del mapa	Estilo del dibujo, tanto como fondos, tipo de línea, etc.
Extension setup	Configurar extensiones	Permite añadir extensiones

Fuente: Elaboración propia

Menú Ventana.- El Menú Ventana contiene comandos para presentar o seleccionar ventanas dentro del espacio de trabajo de SWMM.

Tabla 17. Menú Ventana

Comando		Descripción
Cascade	Cascada	Presenta las ventanas en estilo con el mapa del área de estudio llenando toda la zona de visualización.
Tile	Mosaico	Minimiza el mapa del área de estudio y presenta el resto de ventanas formando un mosaico vertical.
Close all	Cerrar todo	Cierra todas las ventanas abiertas excepto la del mapa de estudio.
Windows list	Mapa del área de estudio	Muestra todas las ventanas abiertas, la ventana seleccionada actualmente aparecerá marcada.

Fuente: Elaboración propia

Menú Ayuda.- El Menú de Ayuda contiene comandos para obtener ayuda sobre el manejo de EPA SWMM.

Tabla 18. Menú ayuda

Comando		Descripción
Help topics	Temas de ayuda	Presenta el índice de contenidos de la ayuda SWMM.
How do I	Como hacer	Presenta las preguntas típicas acerca de las operaciones más comunes.
Measurements units	Unidades de medida	Muestra las unidades de medida para todos los parámetros SWMM.
Error messages	Mensajes de error	Presenta un breve manual que introduce al usuario.
About	Acerca del programa	Información acerca de la versión que está utilizando.

Fuente: Elaboración propia

2.5.4.2 Las barras de herramientas

Las barras de herramientas proporcionan acceso directo a las operaciones más comunes. Hay cuatro tipos de barras de herramientas:

- Barra Estándar
- Barra de Mapa
- Barra de Objeto
- Barra de Animación

Salvo la barra de herramientas de Animación, todas las demás barras de herramientas pueden ser ancladas debajo del Menú Principal, a la derecha del Mapa del Área de Estudio, o en cualquier localización del área de trabajo de EPA SWMM. Cuando no están ancladas, se puede modificar su tamaño.

Las barras de herramientas pueden hacerse visibles o invisibles seleccionado Ver→Toolbars (Ver + Barras de Herramientas) desde el Menú Principal.

- **Barra de herramientas estándar**

La barra de herramientas estándar contiene botones de acceso rápido para las operaciones más comunes que realiza el programa:

-  Crea un nuevo proyecto (**Archivo**→**New**)
-  Abre un proyecto existente (**Archivo**→**Open**)
-  Salva el proyecto actual (**Archivo**→**Save**)
-  Imprime la ventana actual (**Archivo**→**Print**)
-  Copia la selección actual al portapapeles o a un archivo. (**Edit**→**Copy To**)
-  Localiza un objeto específico en el mapa del área de estudio (**Edit**→**Find**)
-  Pone en marcha una simulación (**Proyecto**→**Run Simulation**)
-  Realiza una consulta gráfica en el Mapa del Área de Estudio (**Ver**→**Query**)
-  Crea un nuevo gráfico con los resultados de la simulación (**Informe**→**Gráfico**)
-  Crea una nueva tabla con los resultados de la simulación (**Informe**→**Table**)
-  Presenta un análisis estadístico de los resultados de la simulación (**Informe**→**Statistics**)
-  Modifica las opciones de presentación para la ventana activa (**Ver**→**Options** o **Informe**→**Options**)
-  Arregla las ventanas en forma de cascada, con el Mapa del Área de Estudio llenando toda la zona de visualización (**Archivo**→**New**)

- **Barra de herramientas mapa**

La barra de herramientas Mapa contiene botones para visualizar el área de estudio del mapa:

-  Selecciona un objeto en el mapa
-  Selecciona un vértice de una línea o una cuenca
-  Selecciona una región del mapa
-  Desplazamiento a lo largo del mapa
-  Zoom acercar en el mapa
-  Zoom alejar en el mapa
-  Dibuja el mapa en toda su extensión

- **Barra de herramientas objeto**

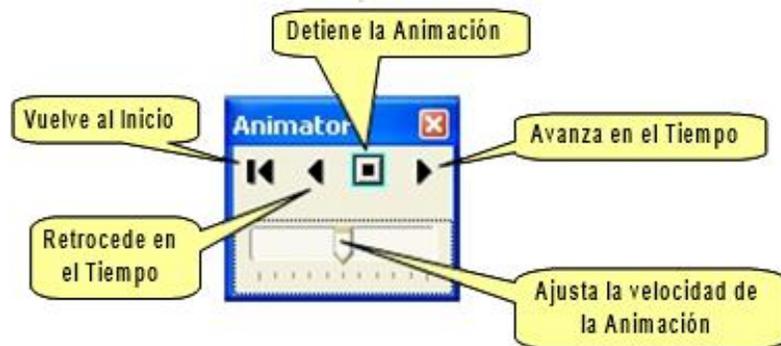
La barra de herramientas Objeto contiene botones para añadir objetos al mapa del área de estudio.

-  Añade un pluviómetro al mapa
-  Añade una subárea de captación (cuenca) al mapa
-  Añade una unión al mapa
-  Añade un desagüe al mapa
-  Añade un divisor de flujo al mapa
-  Añade un depósito de almacenamiento al mapa
-  Añade un conducto al mapa
-  Añade una bomba al mapa
-  Añade un orificio al mapa
-  Añade un vertedero al mapa
-  Añade una descarga al mapa
-  Añade una etiqueta de texto al mapa

- **Barra de animación**

La barra de animación contiene controles para crear animaciones del Mapa del Área de Estudio y todos los gráficos de perfil a través del tiempo, es decir, actualiza automáticamente el código de colores del mapa y el perfil de la lámina de agua conforme el tiempo de simulación avanza o retrocede. En la Figura 13 se muestra la barra de animación y la función de sus distintos controles.

Figura 13. Barra de Animación y descripción de sus controles

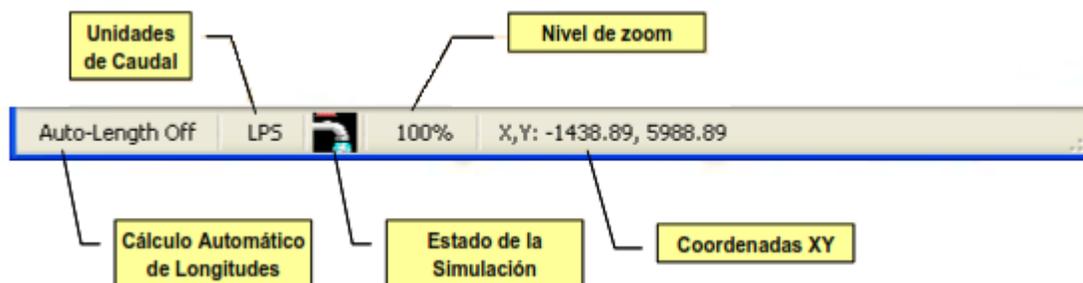


Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

En el arranque del programa, la barra de animación queda oculta. Para hacer la barra visible, se debe seleccionar Ver→Toolbars→Animator (Ver + Barras de Herramientas + Animación) desde el menú principal.

2.5.4.3 Barra de estado

Figura 14. Barra de Estado



Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

La barra de estado aparece al pie de la ventana principal de EPA SWMM y se divide en cuatro secciones:

Auto-Length (Cálculo automático de Longitudes)

Indica si el cálculo automático de la longitud de los conductos y el área de las cuencas se encuentra activado o desactivado. Pulsando el botón derecho del ratón sobre esta sección, se puede activar o desactivar la opción.

Unidades de Caudal

Presenta las unidades de flujo utilizadas.

Estado de la puesta en marcha

Un ícono de grifo muestra:

- Grifo sin agua cuando los resultados del análisis no están disponibles.
- Grifo con agua corriente si los resultados del análisis están disponibles.
- Un grifo roto cuando los análisis de resultados están disponibles, pero pueden no ser válidos porque los datos del proyecto hayan sido modificados.

Nivel de Zoom

Presenta el nivel de Zoom actual en el mapa (100 % corresponde al plano completo)

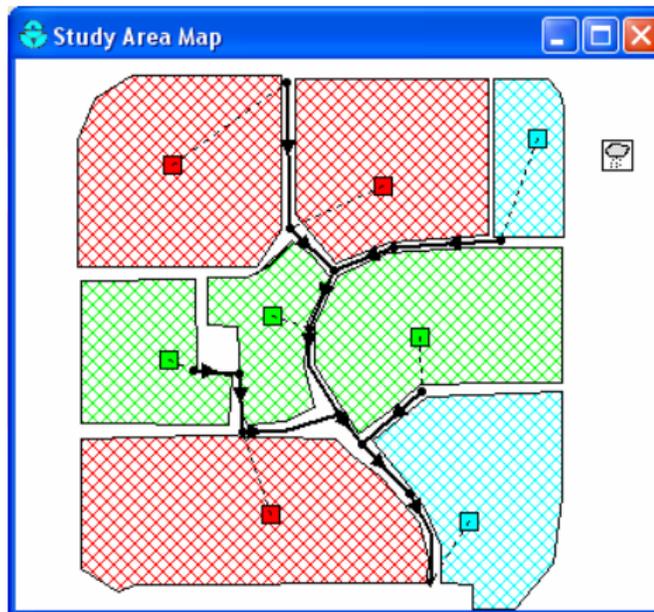
Localización XY

Presenta las coordenadas del mapa en la posición actual del puntero del ratón

2.5.4.4 El mapa del área de estudio

El Mapa Área de Estudio (mostrado abajo) proporciona un plano esquemático de los objetos que componen una cuenca y su sistema de drenaje. Algunas de sus características son:

Figura 15. *Mapa del área de estudio*



Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

La ubicación de los objetos y de las distancias entre ellos no tiene por qué coincidir necesariamente con su escala física.

Las propiedades seleccionadas de estos objetos, como la calidad del agua en los nudos o el caudal en las líneas, pueden ser presentadas siguiendo un código de colores. El código de colores queda descrito en una leyenda que debe ser presentada y editada.

Se puede añadir nuevos objetos al Mapa, y los ya existentes pueden ser editados, borrados o cambiados de posición.

Se puede utilizar imágenes de fondo (como planos callejeros o mapas topográficos) detrás del Mapa para utilizarlas de referencia.

Se puede realizar un zoom a cualquier escala o encuadrar el Mapa desde una posición a otra.

Los nudos y las líneas pueden representarse con distintos tamaños, se pueden representar flechas de dirección del flujo, símbolos de los objetos, etiquetas de los identificativos y los valores numéricos de las distintas variables.

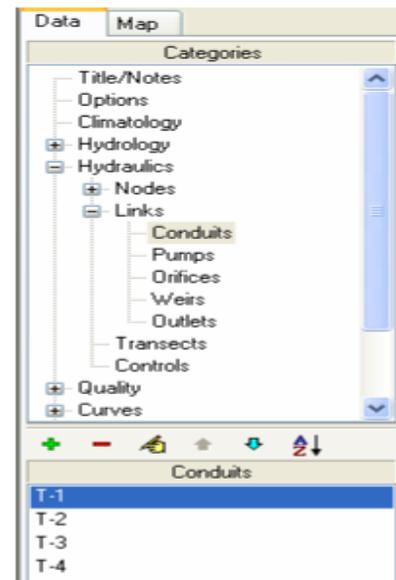
El mapa puede ser impreso, copiado al portapapeles de Windows o exportado como un archivo del tipo DXF o un metaarchivo Windows (EMF).

2.5.4.5 El visor de datos

El Visor de Datos (mostrado abajo) aparece cuando la pestaña de Datos (*Data*) del panel situado a la izquierda de la ventana principal de EPA SWMM se encuentra activa. Proporciona acceso a los datos de todos los objetos del proyecto.

La lista de categorías superior presenta las distintas categorías de objetos disponibles en un proyecto de SWMM.

La lista de la parte inferior enumera todos los objetos de la categoría actualmente seleccionada.



Los botones entre las dos cajas del visor de datos se utilizan como sigue:

-  Añade un nuevo objeto
-  Borra el objeto seleccionado
-  Edita el objeto seleccionado
-  Se desplaza al objeto situado arriba en la lista
-  Se desplaza al objeto situado abajo en la lista
-  Ordena los objetos en orden creciente.

Las selecciones hechas en el Visor de Datos se coordinan con los objetos resaltados en el Mapa y viceversa. Por ejemplo, seleccionar un conducto en el Visor provocará que el conducto se resalte en el Mapa, mientras que seleccionarlo en el Mapa lo hará convertirse en objeto seleccionado del visor.

2.5.4.6 El visor del mapa

El Visor del Mapa (mostrado a continuación) aparece cuando la pestaña de Mapa (Map) del panel situado a la izquierda de la ventana principal de EPA SWMM se encuentra activa. Éste controla las variables y el instante de tiempo presentados en el Mapa.

A continuación, se describen las selecciones posibles desde el Visor del Mapa:

Vista de las Cuencas (**Subcatch View**)- selecciona la variable a presentar para las cuencas mostradas en el Mapa.

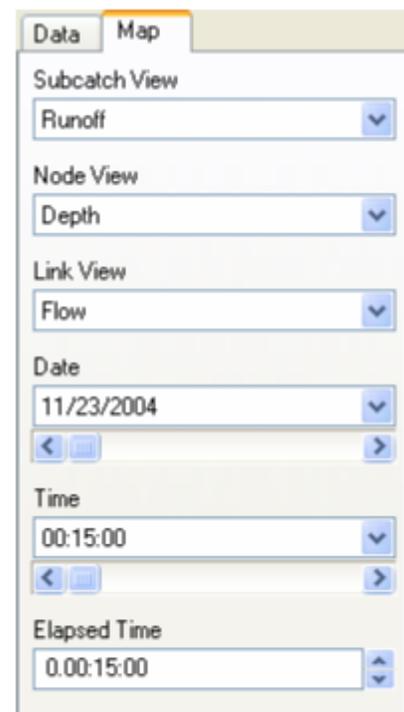
Vista de los Nudos (**Node View**) selecciona la variable a presentar para los nudos del sistema de transporte mostrados en el Mapa.

Vista de las Líneas (**Link View**) selecciona la variable a presentar para las líneas del sistema de transporte mostradas en el Mapa.

Fecha (**Date**) selecciona para qué día del periodo de simulación se están presentando los resultados.

Hora (**Time**) selecciona la hora del día actual para la cual se están presentando los resultados de la simulación.

Tiempo transcurrido (**Elapsed Time**) selecciona el tiempo transcurrido desde el comienzo de la simulación para el cual se están presentando los resultados de la simulación.



2.5.4.7 El editor de propiedades

El Editor de Propiedades (mostrado a continuación) se utiliza para cambiar las propiedades de los objetos que aparecen en el Mapa.

Éste aparece cuando uno de estos objetos es seleccionado (bien en el Mapa, bien en el Visor de Datos) y se pulsa dos veces con el botón izquierdo del ratón (doble clic) o bien al pulsar el botón  en el Visor de Datos.

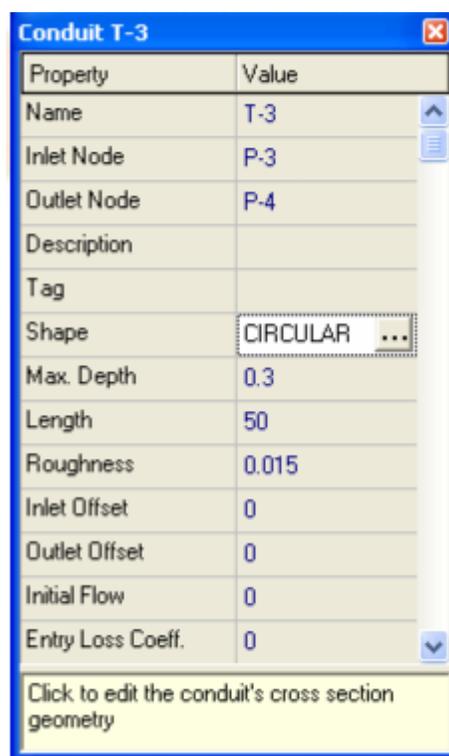
Las características más importantes del Editor de Propiedades incluyen:

El editor es una tabla con dos columnas: una para el nombre de las propiedades y otra para su valor.

El tamaño de las columnas puede cambiarse cambiando con el ratón el tamaño del encabezado en la fila superior.

En la parte inferior del Editor aparece un área informativa con una descripción más completa de la propiedad seleccionada. El tamaño de esta área puede alterarse desplazando la barra que se encuentra encima de la misma.

La ventana del Editor puede ser movida o cambiada de tamaño por los métodos normales de Windows.



Las propiedades que tienen un asterisco al lado son propiedades necesarias para el cálculo y no pueden dejarse en blanco.

Dependiendo de la propiedad, el campo de valores puede ser uno de los siguientes:

Un cuadro de texto donde se escribe el valor.

Un cuadro desplegable donde se selecciona un valor de una lista de opciones.

Un cuadro desplegable donde se puede escribir un valor o seleccionar de una lista de opciones.

Un botón que al ser pulsado abre un editor específico.

La propiedad seleccionada en el Editor será resaltada con un fondo blanco.

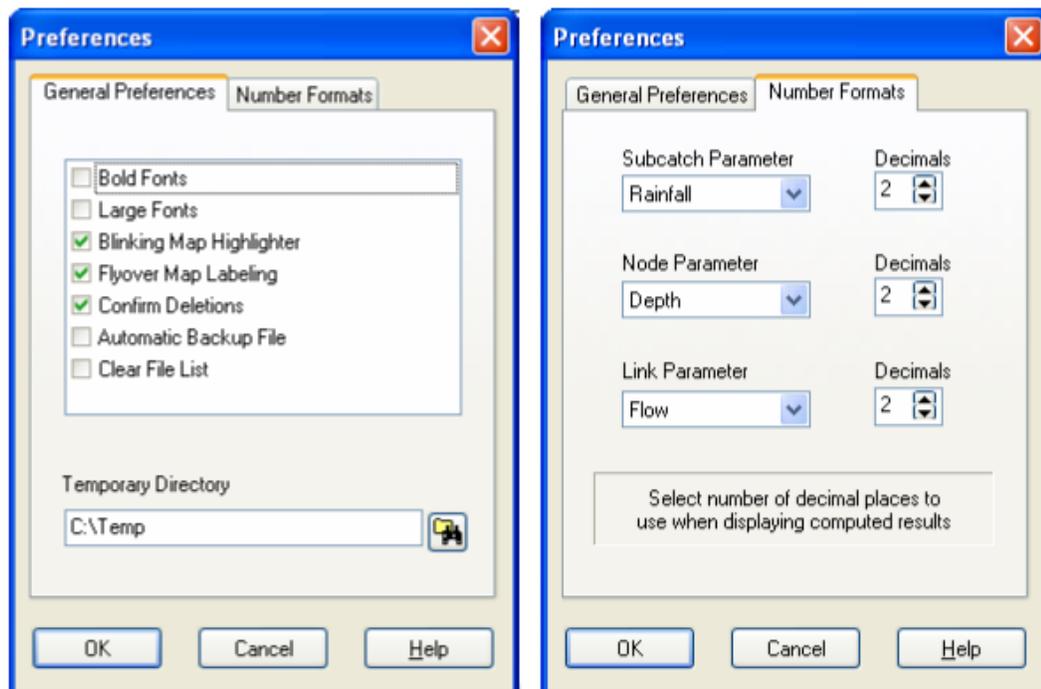
Se pueden utilizar tanto el ratón como las teclas flecha en el teclado (↑ ↓) para desplazarse entre las distintas propiedades.

Para editar la propiedad resaltada, se comienza a escribir un valor o se presiona la tecla Intro (Enter).

Para hacer que el programa acepte los datos introducidos en una propiedad, se presiona la tecla Intro (Enter) o se mueve a otra propiedad. Para cancelar estos cambios, se presiona la tecla Esc.

2.5.4.8 Fijar las preferencias del programa

Las preferencias del programa permiten al usuario personalizar ciertas características del mismo. Para fijar las preferencias del programa, seleccione **Archivo**→**Preferences** (Archivo + Preferencias) desde el Menú Principal. Aparecerá un formulario para las preferencias con dos pestañas (presentado en la siguiente figura): una para Preferencias Generales y otra para Formatos de Número.



Preferencias generales

La página de preferencias generales del formulario de Preferencias permite al usuario modificar las siguientes preferencias del programa:

Tabla 19. Preferencias en el programa

Preferencias		Descripción
Bold Fonts	Fuentes en negrita	Utilizar fuentes en negrita en todas las ventanas
Large Fonts	Fuentes grandes	Utilizar fuentes grandes en todas las ventanas
Blinking Map Highlighter	Resaltar los objetos en el mapa	Resaltar el objeto seleccionado en el mapa mediante un parpadeo
Flyover Map Labeling	Etiquetas de vista rápida	Presentar el identificativo y el valor de la propiedad actual en un cuadro que aparece cuando el ratón se coloca sobre un objeto del mapa
Confirm Deletions	Confirmar borrado	Pedir confirmación antes de borrar cualquier objeto.
Automatic Backup	Copia de seguridad	Salvar una copia de seguridad del proyecto recién abierto, nombrándolo con la extensión bak.
Clear File List	Limpiar archivos recientes	Limpia la lista de archivo recientes abiertos que se presenta cuando se hace Archivo + Reabrir
Temporary Directory	Directorio temporal	Nombre del directorio (carpeta) donde EPA SWMM escribe sus archivos temporales.

Fuente: Elaboración propia

El directorio temporal debe ser un directorio (carpeta) en el cual el usuario tenga privilegios de escritura y debe tener espacio suficiente para almacenar archivos que pueden crecer fácilmente hasta las decenas de megabytes para redes grandes. El directorio temporal por defecto es el de Windows (C:\Windows\Temp).

Formato de números

La página de formato de números del formulario de Preferencias de Programa controla el número de decimales que se emplea para dar los resultados numéricos del programa. Se utilizan los cuadros desplegables para seleccionar los parámetros de una Cuenca (Subcatchment), un Nudo (Node) o una Línea (Link), entonces se utilizan los cuadros de edición situados al lado para seleccionar el número de decimales utilizados cuando se

presentan los resultados del cálculo para cada parámetro. El número de decimales presentados para cada parámetro de diseño (como pendiente, diámetro, longitud, etc.) es el que fija el usuario.

2.5.4.9 Modelo conceptual utilizado por SWMM

Describe cómo SWMM modela los objetos y parámetros operacionales que constituyen un sistema de drenaje de aguas pluviales. También una visión general de los fundamentos de cálculo computacional que SWMM utiliza para simular los fenómenos hidrológicos, hidráulicos y del comportamiento y transporte de la calidad del agua de un sistema de drenaje.

SWMM representa el comportamiento de un sistema de drenaje mediante una serie de flujos de agua y materia entre los principales módulos que componen un análisis medioambiental. Estos módulos y sus correspondientes objetos de SWMM son los siguientes:

El Módulo Atmosférico, desde la cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto Pluviómetro (**Rain Gage**) para representar las entradas de lluvia en el sistema.

El Módulo de Superficie del Suelo, que se representa a través de uno o más objetos cuenca (**Subcatchment**). Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve y generan flujos de salida en forma de infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.

El Módulo de Aguas Subterráneas recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte. Este módulo se modela utilizando los objetos **Aquifers** (Acuíferos).

El Módulo de Transporte contiene una red con elementos de transporte (canales, tuberías, bombas y elementos de regulación) y unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el agua hacia los Nudos de Vertido (**Outfall**) o las estaciones de tratamiento.

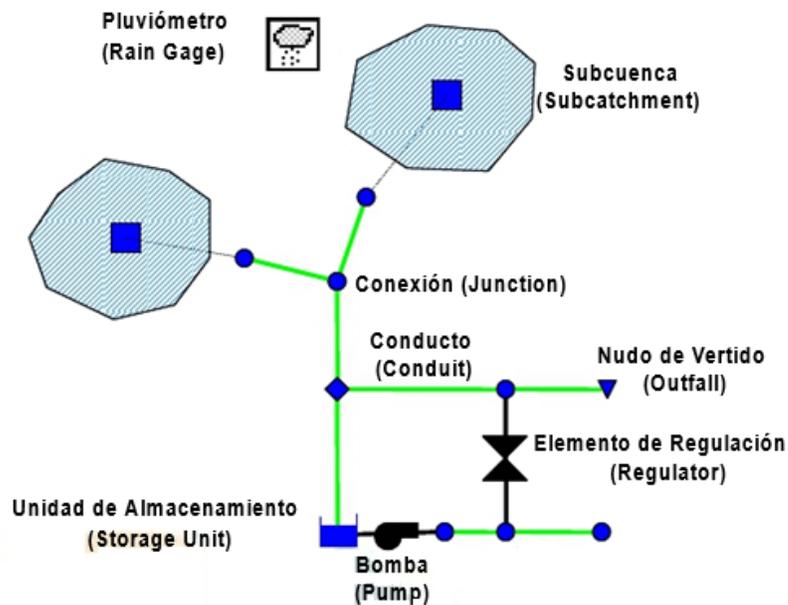
Los flujos de entrada de este Módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de la interacción con el flujo subterráneo, de los caudales sanitarios correspondientes a periodos sin lluvia, o de hidrógramas de entrada definidos por el usuario. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos Nudos y Líneas.

En un determinado modelo de SWMM no es necesario que aparezcan todos los Módulos descritos anteriormente. Por ejemplo, un modelo puede tener tan solo el Módulo de Transporte, utilizando como entradas unos hidrógramas previamente definidos.

2.5.4.9.1 Componentes físicos (Visual objects)

La Figura N° 14 representa los componentes físicos que pueden presentarse en un sistema de drenaje de aguas pluviales. Estos componentes u objetos pueden representarse dentro del mapa de SWMM. Los siguientes apartados describen cada uno de estos objetos.

Figura 16. Componentes físicos de un Sistema de Drenaje



Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

2.5.4.9.1.1 Pluviómetros (Rain Gages)

Los Pluviómetros (*Rain Gages*) suministran los datos de entrada de las precipitaciones que ocurren sobre una o varias de las cuencas definidas en el área de estudio. Los datos de lluvia pueden ser definidos por el usuario mediante series temporales de datos o provenir de un archivo externo al programa. En la actualidad, SWMM dispone de diferentes formatos de archivos de datos de lluvia, así como un formato estándar definido por el usuario.

Las propiedades principales de entrada de un pluviómetro son:

Tipo de datos de lluvia (por ejemplo, intensidad de lluvia, volumen o volumen acumulado).

Intervalo de tiempo de los datos (por ejemplo, cada hora, cada 15 minutos, etc.)

Origen de los datos de lluvia (especificando si es una serie temporal o un archivo externo).

Nombre del origen de datos de lluvia.

2.5.4.9.1.2 Subcuencas (Subcatchments)

Las cuencas son unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia un punto de descarga. El usuario del programa es el encargado de dividir el área de estudio en el número adecuado de cuencas e identificar el punto de salida (outlet) de cada una de ellas. Los puntos de salida (outlets) de cada una de las cuencas pueden ser bien nudos del sistema de drenaje o bien otras cuencas.

Las cuencas pueden dividirse en subáreas permeables y subáreas impermeables. La escorrentía superficial puede infiltrarse en la parte superior del terreno de las subáreas permeables, pero no a través de las subáreas impermeables. Las áreas impermeables pueden dividirse, a su vez, en dos subáreas: una que contiene el almacenamiento en depresión y otra que no lo contempla. El flujo de escorrentía desde un subárea de la cuenca puede fluir hacia otra subárea o, por el contrario, dos subáreas pueden drenar directamente hacia la salida de la cuenca.

La infiltración de lluvia de las zonas permeables de una determinada cuenca sobre la parte superior del suelo no saturado puede describirse utilizando tres modelos diferentes:

- El modelo de infiltración de Horton.
- El modelo de infiltración de Green-Ampt.
- El modelo de infiltración basado en el Número de Curva del SCS

Para modelar la acumulación, redistribución y deshielo de las precipitaciones que caen en forma de nieve en una cuenca, es necesario crear un objeto de Modelación de Nieve (Snow Pack Object). Para modelar el flujo de aguas subterráneas entre un acuífero situado por debajo de la cuenca y un nudo del sistema de drenaje, es necesario establecer los parámetros de Aguas Subterráneas (Groundwater Parameters) de la cuenca. La acumulación y el arrastre de contaminantes desde las cuencas pueden asociarse con los Usos del Suelo (Land Uses) asignados a la cuenca.

El resto de los parámetros principales de entrada de una cuenca son:

- El pluviómetro asignado
- El nudo o la cuenca donde descarga la cuenca representada
- Los usos del suelo asignados
- Las áreas y superficies tributarias
- El porcentaje de impermeabilidad
- La pendiente de la cuenca
- La anchura característica del flujo en superficie
- Valor del coeficiente de Manning n para el flujo superficial tanto para áreas permeables como para áreas impermeables.
- El almacenamiento en depresión tanto para áreas permeables como áreas impermeables.
- El porcentaje de suelo impermeable carente de almacenamiento en depresión.

2.5.4.9.1.3 Nudos de conexión (Junction)

Las conexiones son nudos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. Físicamente pueden representar la confluencia de canales superficiales naturales, pozos de registro (manholes) del sistema de drenaje, o elementos de conexión de tuberías. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones. El exceso de agua en un nudo se traduce en un flujo parcialmente presurizado mientras las conducciones conectadas se encuentren en carga. Este exceso de agua puede perderse completamente del sistema o, por el contrario, estancarse en la parte superior para posteriormente entrar de nuevo en la conexión.

Los parámetros principales de entrada de una conexión son:

- Cota de fondo o fondo del pozo que puede encontrarse en la conexión.
- Profundidad del pozo.
- Área superficial del área estancada cuando se produce un fenómeno de inundación; es un parámetro opcional de entrada.
- Datos de aportes externos de caudal. Es también otro parámetro opcional.

2.5.4.9.1.4 Nudos de vertido (Outfall Nodes)

Los Nudos de Vertido son nudos terminales del sistema de drenaje utilizados para definir las condiciones de contorno finales aguas abajo del sistema en el caso de utilizar el modelo de flujo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave). Para otros tipos de flujo, los nudos de vertido se comportan como conexiones. Una restricción del modelo es que solo es posible conectar una línea con un Nudo de Vertido.

Las condiciones de contorno en los Nudos de Vertido pueden describirse mediante una de las siguientes relaciones:

- El calado crítico o el calado uniforme en la conexión con el conducto.
- Un nivel fijo de agua.
- El nivel de mareas representado como los diferentes niveles de la misma a lo largo del día.

- Una serie temporal que represente el nivel de agua en el punto de descarga a lo largo del tiempo.

Los parámetros de entrada principales de un Nudo de Vertido son:

- La cota de fondo.
- La descripción del tipo y estado de la condición de contorno.
- La presencia de una válvula de compuerta (Flat Valve) para prevenir el flujo inverso desde el Nudo de Vertido.

2.5.4.9.1.5 Conductos (Conduit)

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal en las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa. Asimismo, el programa permite también definir áreas de sección transversal irregular permitiendo representar con ello cauces naturales.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por el conducto (Q), la sección del mismo (A), su radio hidráulico (Rh) y la pendiente (S), tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos. En unidades anglosajonas, la ecuación de Manning se escribe:

$$Q = \frac{1.49}{n} * A * R^{2/3} * \sqrt{S}$$

Asimismo, dicha ecuación en unidades del Sistema Internacional se expresa como:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{2/3} * \sqrt{S}$$

Donde:

n = Es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Para el caso del Flujo Uniforme (Steady Flow) y para el caso del Análisis mediante la Onda Cinemática (Cinematic Wave)

S = Se interpreta como la pendiente de la conducción.

En el caso de emplear el Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave) se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la pérdida por unidad de longitud).

Los principales parámetros de entrada para las conducciones son:

- Nombres de los nudos de entrada y salida
- Alturas del conducto respecto de la cota de fondo de los nudos inicial y final
- Longitud del conducto
- Coeficiente de Manning
- Geometría de la sección transversal del conducto
- Coeficiente de pérdidas tanto para la entrada como para la salida del conducto
- Presencia de una válvula de compuerta para prevenir el flujo inverso

Figura 17. Diferentes secciones transversales de conductos disponibles

Nombre	Parámetros	Forma	Nombre	Parámetros	Forma
Circular	Profundidad		Circular Relleno	Profundidad, profundidad del relleno	
Rectangular Cerrado	Profundidad, ancho		Rectangular Abierto	Profundidad, ancho	
Trapezoidal	Profundidad, ancho en la parte superior, pendiente lateral		Triangular	Profundidad, ancho en la parte superior	
Elipse Horizontal	Profundidad		Elipse Vertical	Profundidad	
Arco	Profundidad		Parabólica	Profundidad, ancho en la parte superior	
Potencial	Profundidad, Ancho en la parte superior, exponente		Rectangular – Triangular	Profundidad, ancho	
Rectangular Redondeada	Profundidad, ancho		Cesta de mano modificada	Profundidad, ancho	
Huevo	Profundidad		Huella de caballo	Profundidad	
Gótico	Profundidad		Catenaria	Profundidad	
Semiéptica	Profundidad		Cesta de mano	Profundidad	
Semicircular	Profundidad				

Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

2.5.4.9.2 Métodos computacionales

SWMM es un modelo de simulación basado en fenómenos físicos que utiliza una solución discreta en el tiempo del fenómeno. En su formulación emplea los principios de conservación de la masa, de la energía y de la cantidad de movimiento siempre que es posible. En este apartado se describen brevemente los diferentes métodos empleados por SWMM para modelar tanto la cantidad como la calidad de la escorrentía derivada de la lluvia a lo largo de los siguientes procesos físicos:

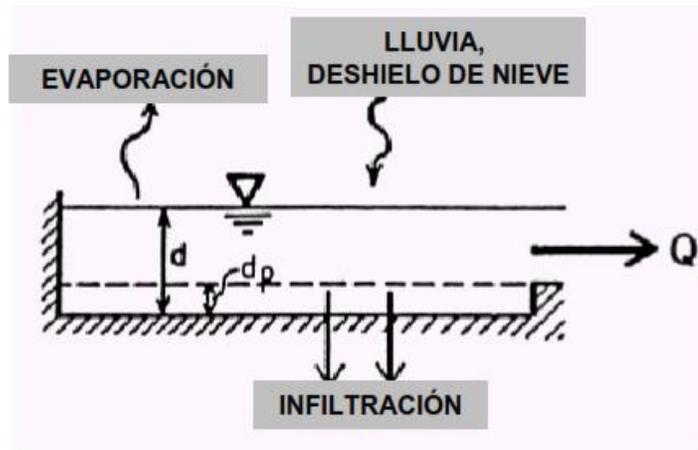
- Escorrentía superficial
- Infiltración
- Aguas subterráneas
- Deshielo de nieves
- Comportamiento hidráulico del sistema
- Inundaciones en la superficie del terreno
- Comportamiento y evolución de la calidad del agua

2.5.4.9.2.1 Escorrentía superficial

La visión conceptual del fenómeno de la escorrentía utilizado por SWMM se ilustra en la Figura 18.

Cada una de las cuencas se trata como un depósito no lineal. Los aportes de caudal provienen de los diferentes tipos de precipitación (lluvia, nieve) y de cualquier otra cuenca situada aguas arriba. Existen diferentes caudales de salida tales como la infiltración, la evaporación y la escorrentía superficial. La capacidad de este “depósito” es el valor máximo de un parámetro denominado almacenamiento en depresión, que corresponde con el máximo almacenamiento en superficie debido a la inundación del terreno, el mojado superficial de la superficie del suelo y los caudales interceptados en la escorrentía superficial por las irregularidades del terreno. La escorrentía superficial por unidad de área, Q , se produce únicamente cuando la profundidad del agua en este “depósito” excede el valor del máximo almacenamiento en depresión, dp , en cuyo caso, el caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning. La profundidad o calado de agua en la cuenca (d expresado en pies) se actualiza continuamente en cada uno de los instantes de cálculo (con el tiempo expresado en segundos) mediante la resolución numérica del balance de caudales en la cuenca.

Figura 18. Visión conceptual del fenómeno de la escorrentía en SWMM



Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

Infiltración (Infiltration)

La infiltración es el fenómeno por el cual el agua de lluvia penetra la superficie del terreno de los suelos no saturados de las áreas permeables de la cuenca. SWMM permite seleccionar tres modelos diferentes de infiltración:

La ecuación de Horton: este método se basa en observaciones empíricas y propone que la infiltración decrece exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta un cierto valor mínimo a lo largo del evento de lluvia. Los parámetros de entrada necesarios para este modelo son los valores de infiltración máxima y mínima, el coeficiente de decaimiento que describe lo rápido que se produce la disminución de la infiltración a lo largo del tiempo y el tiempo necesario para saturar completamente un suelo que inicialmente estaba completamente seco.

El método Green-Ampt: para modelar el fenómeno de la infiltración, este método asume la existencia de un frente húmedo brusco (sharp wetting front) que separa el suelo con un determinado contenido inicial de humedad del mismo completamente saturado de la parte superior. Los parámetros necesarios son el valor del déficit inicial de humedad del suelo, la conductividad hidráulica del suelo y la altura de succión en el frente húmedo.

El método del Número de Curva: es una aproximación adoptada a partir del denominado número de Curva de NRCS (SCS) para estimar la escorrentía. Se asume así que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una tabla de Números de Curva tabulados. Durante un evento de lluvia, esta capacidad se representa como una función de la lluvia acumulada y de la capacidad de infiltración restante. Los parámetros de entrada para este método son el número de curva, la conductividad hidráulica del suelo (utilizada para estimar un tiempo de separación mínimo entre los distintos eventos de lluvia) y el tiempo que tarda el suelo en saturarse completamente cuando inicialmente era un suelo completamente seco.

Tabla 20. Dimensiones de tipo de suelos según el NRCS

Tipo	Descripción	K (mm/h)
A	Bajo potencial de escorrentía. Suelos con una alta tasa de infiltración incluso cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en arenas y gravas con drenaje profundo entre bueno y excesivo.	11
B	Suelos con tasa de infiltración media cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en suelos con drenaje profundo a moderado y textura de grano mediano. Ejemplos: marga arenosa o loess poco profunda.	3,75 – 7,50
C	Suelos con tasa de infiltración baja cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en suelos con una capa que impide el flujo de agua hacia abajo, o suelos con textura de grano fino. Ejemplos: marga arcillosa o marga arenosa poco profunda.	1,25 – 3,75
D	Alto potencial de escorrentía. Suelos con tasa de infiltración muy baja cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en suelos arcillosos con un alto potencial de expansión, con un nivel freático permanentemente alto, con cubierta de arcilla en o cerca de la superficie y suelos poco profundos con una capa impermeable cerca de la superficie.	1,25

K: Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)

Fuente: SCS Urban Hydrology for Small Watersheds, 2ª Ed., (TR-55), Junio 1986

Tabla 21. Número de Curva para escorrentía (CN) Según SCS

Descripción del uso del suelo	Tipo de suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastos y prados				
En malas condiciones	68	79	86	89
En buenas condiciones	39	61	74	80
Pradera				
En buenas condiciones	30	58	71	78
Terreno boscoso				
Poco denso, cubierta forestal pobre o inexistente	45	66	77	83
Buena cubierta forestal ²	25	55	70	77
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.)				
En buenas condiciones (75 % o más de hierba)	39	61	74	80
En pobres condiciones (50-75 % de hierba)	49	69	79	84
Zonas comerciales (85 % impermeable)	89	92	94	95
Polígonos industriales (72 % impermeable)	81	88	91	93
Zona residencial ³				
Tamaño medio de la parcela ⁴ (% Impermeabilidad ⁵)				
< 500 m ² (65 %)	77	85	90	92
1000 m ² (38 %)	61	75	83	87
1500 m ² (30 %)	57	72	81	86
2000 m ² (25 %)	54	70	80	85
4000 m ² (20 %)	51	68	79	84
Aparcamientos pavimentados, tejados, caminos asfaltados, etc. ⁶	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentados con cunetas y colectores de drenaje	98	98	98	98
Caminos de grava	76	85	89	91
Sucios	72	82	87	89

Fuente: SCS Urban Hydrology for Small Watersheds, 2ª Ed., (TR-55), Junio 1986

¹ N.d.T. SCS: *Soil Conservation Service*

² Se entiende por buena cubierta la que esta protegida del pastoreo y la basura; y dispone de arbustos.

³ Los números de la curva se calculan asumiendo que la escorrentía de casa y vías se dirigen hacia la calle, con una mínima aportación del tejado a la zona ajardinada, donde ocurrirá una infiltración adicional.

⁴ N.d.T. Al pasar las unidades del original en acres a m², se han realizado algunos redondeos mínimos a la baja. Para ver los valores del manual original, se recomienda consultar la guía del programa o la fuente referida.

⁵ El área permeable restante se considera a efectos del cálculo del número de curva como si fuese pasto en buenas condiciones.

⁶ Para áreas con un clima templado, se puede utilizar un número de curva de 95.

2.5.4.9.2 Aguas subterráneas (Groundwater)

La Figura 19 muestra de forma esquemática el modelo de aguas subterráneas de dos zonas utilizado por SWMM. La parte superior es una zona no saturada en la cual existe un contenido de mezcla variable de valor θ . La parte inferior se encuentra completamente saturada y, por ello, su contenido de mezcla es fijo para una determinada porosidad del suelo Φ . Los diferentes flujos, mostrados en la figura, expresados en volumen por unidad de área y de tiempo, son los siguientes:

f_i = Infiltración desde la superficie.

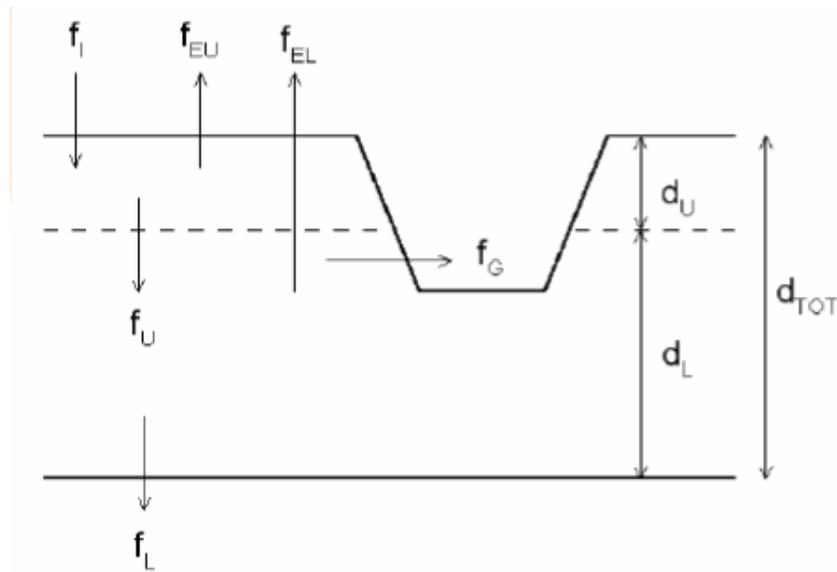
f_{EU} = Evapotranspiración desde la zona superior, que es una fracción fija de la evaporación superficial no usada

f_U = Filtración desde la zona superior a la inferior, que depende del contenido de humedad de la zona superior θ y de la profundidad d_U .

f_{EL} = Evapotranspiración desde la zona inferior, que es una función de la profundidad de la zona superior d_U .

- f_L = Filtración desde la zona inferior hacia las aguas subterráneas profundas que depende de la profundidad de la zona inferior d_L .
- f_G = Interacción lateral de las aguas subterráneas con el sistema de saneamiento, que depende de la profundidad de la zona inferior d_L , así como del calado en el conducto o nudo receptor.

Figura 19. Modelo de las aguas subterráneas de dos zonas



Fuente: Tutorial SWMM (Modelo de gestión de aguas pluviales) 5.0vE

Después de calcular los flujos de agua que se producen en un determinado instante de tiempo, se realiza un balance de masa para cambiar los volúmenes acumulados en cada una de las zonas de forma que puede calcularse en el siguiente instante de tiempo una nueva tabla de valores de la profundidad y del contenido de humedad de la zona no saturada.

2.5.4.9.2.3 Deshielo (Snowmelt)

Las rutinas para el cálculo del deshielo de nieve en SWMM forman parte del proceso de modelación de la escorrentía. Para ello, se actualiza el estado del módulo de nieve asociado con cada cuenca mediante la contabilización de la acumulación de nieve experimentada, la nueva redistribución de nieve derivada de la reducción de área de nieve

y de las operaciones de eliminado de la misma, y los fenómenos de deshielo mediante balances térmicos. Cualquiera de los flujos de agua de salida del módulo de nieve se considera como entradas de lluvia adicional de la cuenca a la que se encuentra asociada.

En cada uno de los instantes de cálculo de la escorrentía, se realizan los siguientes cálculos computacionales:

1. Se actualizan los coeficientes de temperatura del aire y el deshielo de acuerdo a la fecha del calendario del instante de cálculo.
2. Cualquier precipitación que se produzca en forma de nieve se añade al módulo de nieve.
3. Cualquier exceso de la profundidad de nieve en la zona de nieve acumulada en surcos (plowable area) se redistribuye de acuerdo a los parámetros de eliminación definidos en el módulo.
4. Se reducen las áreas cubiertas de nieve tanto de la zona permeable como de la zona impermeable de acuerdo con la curva de variación de la superficie de nieve en función de la profundidad de la misma.
5. La cantidad de nieve dentro del módulo que se derrite y se convierte en agua líquida se determina mediante:
 - a. Una ecuación de intercambio de energía durante los periodos de lluvia, donde la velocidad con que se derrite la nieve aumenta con la temperatura y velocidad del aire, así como con la intensidad de la lluvia.
 - b. Una ecuación de grados-día durante los periodos sin lluvia, en los cuales la velocidad con la que se derrite la nieve es igual al producto del coeficiente de deshielo y de la diferencia de temperaturas entre el aire y la temperatura de deshielo del montón de nieve.
6. Si no ocurre ningún efecto derivado de la nieve al derretirse, se ajusta el valor de la temperatura del montón de nieve con el producto de la diferencia de temperaturas del aire entre el valor actual y el valor anterior y el coeficiente de deshielo ajustado. Si por el contrario ocurre un fenómeno de deshielo de la nieve, la temperatura del montón de nieve se aumenta en un calor equivalente al necesario para alcanzar la temperatura de deshielo

de la base. Cualquier cantidad de líquido generada durante este proceso se convierte en escorrentía de salida del montón de nieve.

7. La cantidad de deshielo de nieve se reduce entonces en una cantidad igual a la capacidad de mantener agua libre en el montón de nieve. El deshielo restante se trata de forma similar a como si fuese una lluvia que cae sobre una cuenca.

2.5.4.9.2.4 Modelo hidráulico de transporte (Flow routing)

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos representados en SWMM está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio (es decir, las ecuaciones de Saint Venant). El usuario de SWMM puede seleccionar el nivel de sofisticación con que desea resolver estas ecuaciones.

Por ello, existen tres modelos hidráulicos de transporte:

El Flujo Uniforme

La Onda Cinemática

La Onda Dinámica

Modelo de Flujo Uniforme (Steady State Routing)

El modelo de flujo uniforme representa la forma más simple de representar el comportamiento del agua en el interior de los conductos. Para ello, se asume que en cada uno de los incrementos de tiempo de cálculo, considerados el flujo, es uniforme. De esta forma, el modelo simplemente traslada los hidrógramas de entrada en el nudo aguas arriba del conducto hacia el nudo final del mismo, con un cierto retardo y cambio en el aspecto del mismo. Para relacionar el caudal con el área y el calado en el conducto, se emplea la ecuación de Manning. Este tipo de modelo hidráulico no puede tener en cuenta el almacenamiento de agua que se produce en los conductos, los fenómenos de resalto hidráulico, las pérdidas a la entrada y salida de los pozos de registro, el flujo inverso o los fenómenos de flujo presurizado. Solo puede utilizarse en sistemas ramificados, donde cada uno de los nudos tiene únicamente una única línea hacia la que vierte sus aguas (a menos que el nudo sea un divisor, en cuyo caso requiere de dos tuberías de salida). Este

modelo de análisis es insensible al incremento de tiempo seleccionado y únicamente es apropiado para realizar análisis preliminares utilizando simulaciones continuas de escalas de tiempo grandes.

Modelo de la Onda Cinemática (Kinematic Wave)

Este modelo hidráulico de transporte resuelve la ecuación de continuidad junto con una forma simplificada de la ecuación de cantidad de movimiento en cada una de las conducciones. Esta última requiere que la pendiente de la superficie libre del agua sea igual a la pendiente de fondo del conducto.

El caudal máximo que puede fluir por el interior de un conducto es el caudal a tubo lleno determinado por la ecuación de Manning. Cualquier exceso de caudal sobre este valor en el nudo de entrada del conducto se pierde del sistema o bien puede permanecer estancado en la parte superior del nudo de entrada y entrar posteriormente en el sistema cuando la capacidad del conducto lo permita.

El modelo de la onda cinemática permite que tanto el caudal como el área varíen espacial y temporalmente en el interior del conducto. Esto origina una atenuación y retraso en los hidrógramas de salida respecto de los caudales de entrada en los conductos. No obstante, este modelo de transporte no puede considerar efectos como el resalto hidráulico, las pérdidas en las entradas o salidas de los pozos de registro, el flujo inverso o el flujo presurizado, así como su aplicación está restringida únicamente a redes ramificadas. Como práctica general puede mantener una estabilidad numérica adecuada con incrementos de tiempo de cálculo relativamente grandes, del orden de 5 a 15 minutos. Si algunos de los efectos especiales mencionados con anterioridad no se presentan en el sistema o no son significativamente importantes en el mismo, el modelo de la onda cinemática es una alternativa suficientemente precisa y eficiente para el modelo de transporte con tiempos de simulación largos.

Modelo de la Onda Dinámica (Dynamic Wave)

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.

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 tubo completamente lleno obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad (calado) 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.

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. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nudos y los caudales en las conducciones, puede aplicarse para cualquier tipo de configuración de red de saneamiento, incluso en el caso de que contengan nudos con múltiples divisiones del flujo aguas abajo del mismo, o incluso mallas en su trazado. Se trata del método de resolución adecuado para sistemas en los que los efectos de resalto hidráulico, originados por las restricciones del flujo aguas abajo y la presencia de elementos de regulación tales como orificios y vertederos, sean importantes. El precio que generalmente es necesario pagar por el empleo de este método es la necesidad de utilizar incrementos de tiempo de cálculo mucho más pequeños, del orden de 1 minuto o menos. Durante el cálculo SWMM reducirá automáticamente el incremento de tiempo de cálculo máximo definido por el usuario si es necesario para mantener la estabilidad numérica del análisis.

2.5.4.9.2.5 Acumulación agua en superficie (Surface ponding)

El modelo de calidad del agua en el interior de los conductos asume que éstos se comporten como un tanque de mezcla completa (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR). Aunque la consideración de un reactor de flujo en pistón pueda parecer una suposición más realista, las diferencias entre ambos modelos son pequeñas si los tiempos

de viaje del agua a lo largo del conducto son del mismo orden de magnitud que el incremento de tiempo del modelo hidráulico de transporte. La concentración de un determinado constituyente en el extremo final de un conducto en un determinado instante de tiempo se obtiene mediante la integración de la ecuación de conservación de la masa, utilizando valores medios para las magnitudes que varían a lo largo del tiempo, tales como el caudal y el volumen de agua en el conducto.

La modelación de la calidad del agua dentro de los nudos con unidades de almacenamiento emplea las mismas aproximaciones que las realizadas para los cálculos en conductos. Para otros tipos de nudos que no tienen volumen, la calidad del agua que sale del nudo es simplemente la mezcla de concentraciones de agua que entre en el mismo.

Figura 21. Provincia Cercado - Tarija



Fuente: N. Estefani Cruz L.

Figura 22. Carretera de Tarija a San Pedro de Sola



Fuente: Google Earth, captura de pantalla

Figura 23. Tramos en estudio



Fuente: Google Earth, captura de pantalla

3.2 Características del área de Aplicación

3.2.1 Aspectos climatológicos

Las temperaturas mensuales medias tienen un promedio anual de 17.70 °C. En general, la temperatura en los valles centrales de la provincia Cercado puede alcanzar valores máximos extremos de hasta 39 °C en los meses de septiembre a diciembre y mínimos extremos de hasta -8 °C en los meses de junio a agosto cuando se presentan los surazos.

En el sector del camino, la estación meteorológica más cercana es la de San Andrés dentro de la cual se encuentran registrados datos como del clima que predomina en la zona próxima al camino; su ubicación geográfica es 21°37'24" de Latitud Sur y 64°48'54" de Longitud Oeste y una altura de 1987 m s. n. m. De acuerdo a la información recabada de la estación, existen registros desde el año 1975 hasta el 2022, de los cuales, para el análisis, se tomó en cuenta solo los que tengan registro completo de las lluvias máximas diarias producidas durante todo el año.

A continuación, se muestra un resumen de la estación de San Andrés y sus aspectos climatológicos

Tabla 22. Resumen Climatológico

Estación:	San Andrés		Latitud S.:	21° 37' 24"
Provincia:	Cercado		Longitud W.:	64° 48' 54"
Departamento:	Tarija		Altura:	1.987 m s. n. m.

Indice	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Annual
Temp. Max. Media	°C	25,87	25,47	25,04	25,15	24,45	25,43	25,61	26,93	27,06	27,19	26,15	26,05	25,87
Temp. Min. Media	°C	14,15	13,82	13,05	10,84	6,29	2,89	2,85	4,68	7,39	11,07	12,56	13,81	9,45
Temp. Media	°C	20,01	19,64	19,05	18,00	15,37	14,16	14,23	15,81	17,23	19,13	19,35	19,93	17,66
Temp.Max.Extr.	°C	37,00	36,00	36,00	39,00	39,00	37,00	38,00	39,00	40,00	40,00	39,00	38,00	40,00
Temp.Min.Extr.	°C	8,00	7,00	4,00	-3,00	-4,00	-8,50	-10,00	-6,00	-5,00	-2,50	2,00	4,00	-10,00
Días con Helada		0,00	0,00	0,00	0,12	1,41	6,59	8,14	4,54	1,48	0,15	0,00	0,00	22,42
Humed. Relativa	%	74,31	75,48	75,97	74,16	69,21	62,89	60,63	60,70	61,41	67,42	71,01	72,91	68,84
Nubosidad Media	Octas	5,18	5,26	4,97	3,88	2,68	1,79	1,55	1,63	2,45	3,81	4,35	4,75	3,53
Evapo. Media	mm/día	4,06	3,98	3,30	2,87	2,63	2,56	2,97	4,11	4,56	4,56	4,54	4,17	3,69
Precipitación	mm	202,40	189,26	163,87	43,93	8,57	1,86	2,23	6,88	16,72	76,38	127,87	196,36	1036,32
Pp. Max. Diaria	mm	88,00	143,80	98,00	48,60	20,50	11,50	10,60	25,00	32,70	150,30	81,00	106,50	150,30
Días con Lluvia		15,09	14,53	13,83	6,11	2,11	0,68	0,98	1,79	3,17	8,38	11,32	14,08	92,06
Días con Granizo		0,02	0,06	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,26	0,19	0,17	0,89

Fuente: Datos del SENAMHI-TARIJA

3.2.2 Recursos Hídricos superficiales

En Bolivia, existen tres cuencas principales denominadas: del Amazonas, del Plata y Cerrada o del Altiplano; a pesar que la disponibilidad de agua superficial no ha sido debidamente estudiada, se estima que por la cuenca del Amazonas fluyen 180 mil millones de m³/año; por la cuenca del Plata, 22.000 millones de m³/año y por la cuenca Cerrada, 1.600 millones de m³/año.

En el Departamento de Tarija, se presentan dos sistemas hidrográficos de características muy distintas, sistema del río Pilcomayo y el sistema del río Bermejo, ambos pertenecientes a la gran cuenca del Río de La Plata. El Proyecto se encuentra en su totalidad en el sistema del río Bermejo, en el subsistema del río Tarija, mismo que se describe con mayor detalle en los párrafos siguientes.

El área del proyecto, sector que corresponde a la subcuenca del río Tarija, presenta, en general, un relieve accidentado por donde los ríos se desplazan en las cabeceras en forma restringida o encajonada (con una sección en forma de “V”), con taludes muy pronunciados y gradientes entre 10 % a 15 %. Los principales ríos que forman esta cuenca son: San Andrés, Chorro, y afluentes dirigidos al río El Molino; estos ríos forman valles por lo general más amplios.

3.2.3 Patrones de comportamiento regional de la precipitación

El proyecto se encuentra al sur de Bolivia en la región sureste del territorio tarijeño, en la provincia Cercado, donde se tiene un clima tropical húmedo.

Las precipitaciones se manifiestan fundamentalmente durante el verano, generando meses húmedos desde octubre a marzo, siendo enero el mes de máxima precipitación, esto, producto de la influencia del movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que se introduce notablemente en el territorio boliviano, llegando a 17° y 18° de la latitud sur en la parte central del territorio. La interacción de las zonas de baja presión, que irrumpen al sur con las zonas de alta presión ubicadas en territorio argentino y océano Atlántico, origina movimientos atmosféricos que actúan sobre la zona cordillerana y de valles.

El desplazamiento de la ZCIT permite la formación de frentes y de procesos de convección. Los frentes fríos provenientes del sur actúan con masas de aire caliente, originando tormentas de tipo frontal.

En invierno, la zona tiene una época seca con una menor cantidad de humedad, la precipitación media mínima mensual se presenta en el mes de junio.

Se eligió aquellas estaciones pluviométricas próximas a las cuencas de aporte que inciden sobre el proyecto vial, y que son representativas de las cuencas de aporte de los cursos más importantes que cruzan la carretera.

De la estación considerada en el estudio, se rescatan los siguientes datos de precipitaciones máximas en 24 horas.

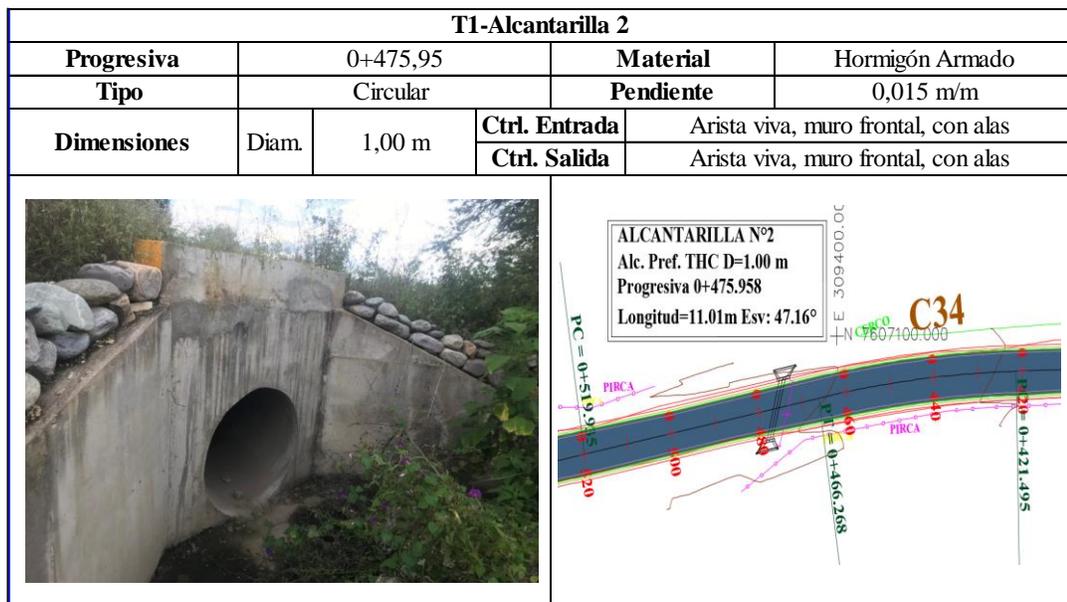
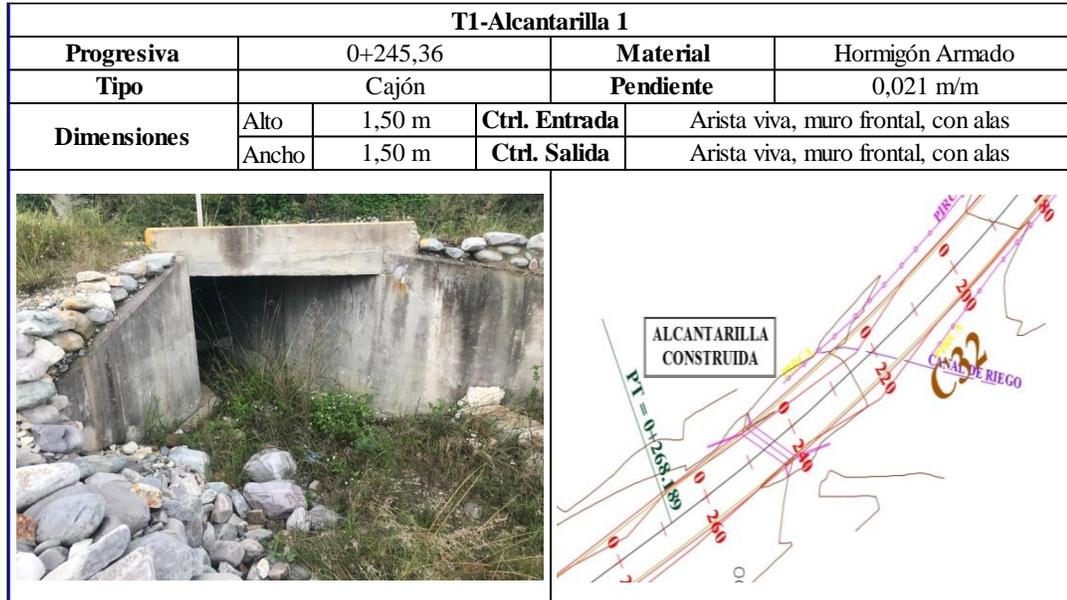
Tabla 23. Precipitaciones Máximas Diarias (mm)

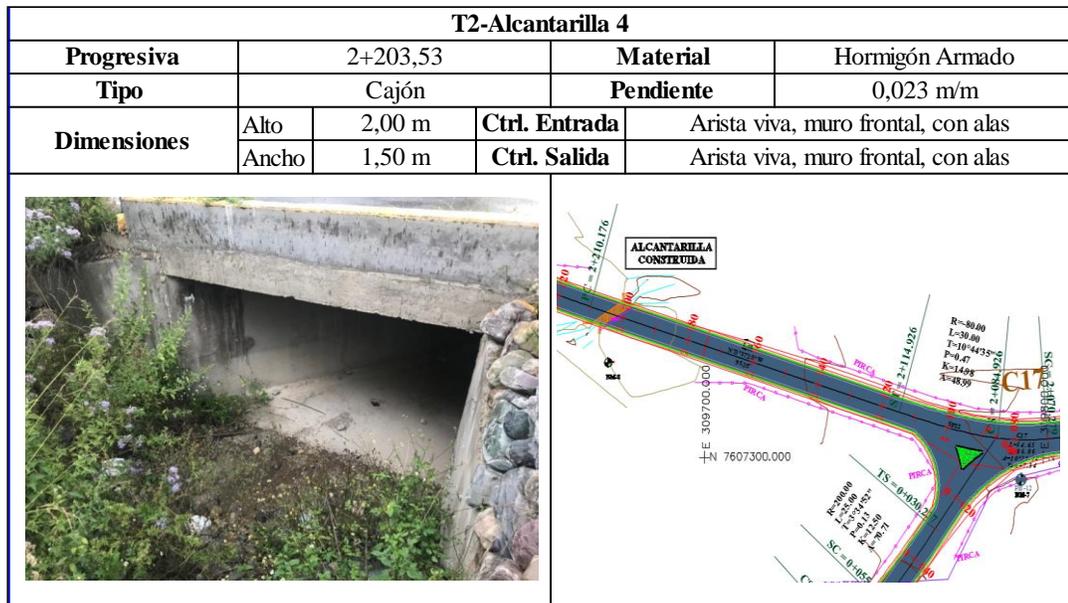
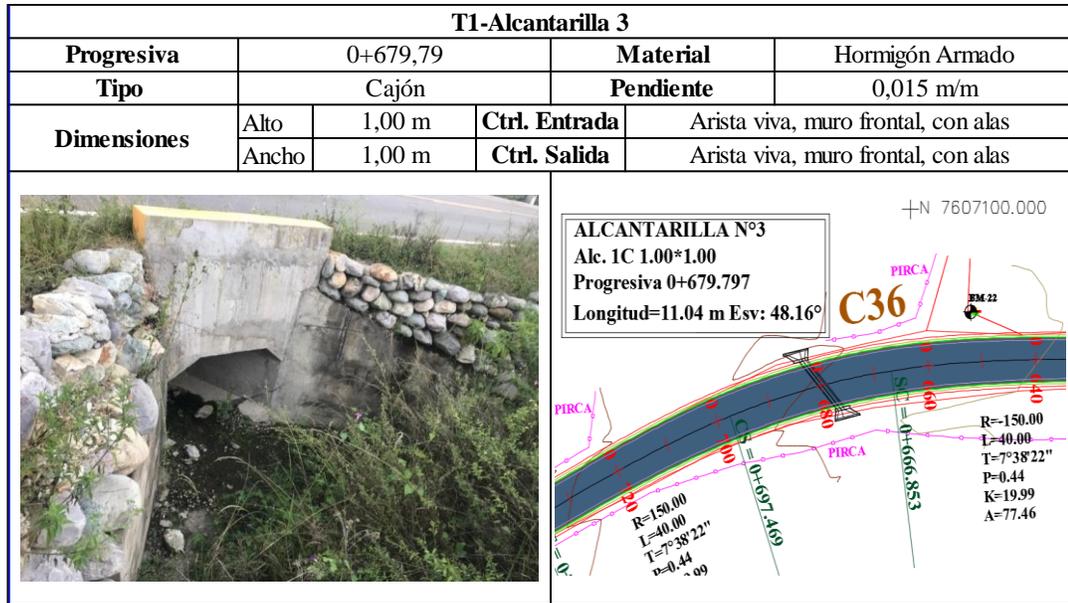
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Maxima
1975							0,00	1,00	15,00	19,50	20,00	21,00	
1976	18,50	20,00	25,00	20,00	8,50	0,20	0,50	0,00	5,00	8,00	24,50	25,50	25,50
1977	32,50	38,00	45,00	43,00	12,00	0,00	0,00	25,00	16,00	19,00	28,00	41,00	45,00
1978	43,50	54,50	25,00	22,50	10,00	0,00	0,00	0,00	18,50	18,50	29,00	31,50	54,50
1979	60,20	54,50	49,80	14,00	8,00	2,00	10,60	8,40	2,70	11,70	48,70	106,50	106,50
1980	50,70	108,50	57,20	11,70	6,60	0,70	0,20	8,00	0,00	62,10	47,40	20,00	108,50
1981	50,70	49,50	48,30	29,40	0,00	0,00	0,70	3,70	6,50	21,00	81,00	71,00	81,00
1982	48,80	28,50	30,40	21,20	8,70	0,00	0,00	1,00	12,70	9,70	50,70	45,90	50,70
1983	27,90	16,60	19,10	5,20	6,20	1,50	2,60	3,50	4,90	40,00	24,50	29,00	40,00
1984	60,00	67,30		18,50	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	38,00	18,00	82,50	
1985	70,10	60,70	49,90	30,00	0,00	0,00	4,40	20,20	11,20	12,40	60,70	44,00	70,10
1986	30,70	43,40	40,10	28,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	30,00	37,00	50,10	50,10
1987	40,50	50,70	20,00	10,20	0,00	0,00	0,00	0,00	8,10	28,00	37,40	30,10	50,70
1988	70,20	19,20	40,50	20,00	5,10	0,00	8,50	0,40	5,00	30,30	20,20	40,10	70,20
1989	36,20	49,00	59,00	35,20	0,20	11,50	2,10	0,00	4,50	65,30	70,60	50,20	70,60
1990	65,20	40,10	35,00	7,70	4,10	0,00	1,40	6,20	6,80	40,10	50,10	40,00	65,20
1991	47,40	65,40	50,80	27,10	3,90	0,00	0,00	14,50	4,30	32,00	24,20	67,00	67,00
1992	38,10	40,10	33,90	10,20	0,00	0,00	2,20	2,10	5,00	8,30	41,20	60,80	60,80
1993	50,20	18,10	78,00	14,10	14,00	1,60	3,10	4,60	0,00	35,50	58,50	44,20	78,00
1994	88,00	29,50	20,20	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	23,00	43,30	33,00	37,00	88,00
1995	33,00	22,50	83,30	1,00	3,00	0,00	0,00	7,00	17,00	36,50	39,00	34,00	83,30
1996	39,50	35,30	98,00	17,50	19,50	0,00	0,00	5,00	11,90	4,30	50,20	34,00	98,00
1997	14,60	30,00	50,50	16,00	3,20	0,00	0,00	1,80	8,30	8,30	38,00	43,50	50,50
1998	30,70	20,20	44,90	17,50	8,10	10,50	2,00	7,00	3,50	29,50	36,00	51,20	51,20
1999	37,00	48,20	61,80	12,60	7,00	3,00	2,50	3,80	21,00	35,00	25,00	40,70	61,80
2000	70,90	50,20	23,50	12,40	1,70	0,00	0,00	2,50	2,50	6,00	22,00	86,50	86,50
2001	87,70	27,70	28,00	14,30	4,70	4,20	1,40	6,20	5,50	37,00	40,30	67,50	87,70
2002	35,20	63,00	70,90	14,50	6,20	0,00	1,50	1,00	5,00	150,30	38,60	40,00	150,30
2003	44,20	30,70	52,00	14,10	2,70	3,50	0,00	0,00	1,00	30,60	30,00	40,20	52,00
2004	41,20	28,50	33,00	29,00	11,60	2,20	2,60	4,40	30,40	11,40	34,80	47,30	47,30
2005	50,80	40,90	46,00	26,10	0,30	0,00	2,50	2,90	4,00	16,50	62,00	34,00	62,00
2006	57,00	47,00	33,00	11,00	9,50	0,00	0,50	1,00	1,00	11,20	31,00	50,00	57,00
2007	60,00	36,00	72,00	15,50	5,50	0,00	0,00	2,00	12,00	24,50	35,00	54,00	72,00
2008	34,00	46,00	44,00	16,00	0,00	0,00	0,00	2,50	4,00	29,00	50,00	67,00	67,00
2009	38,00	39,00	69,70	30,90	4,50	0,00	0,00	0,00	15,00	4,50	45,00	70,00	70,00
2010	30,40	81,00	34,00	10,00	9,50	2,00	0,00	1,00	1,40	8,70	5,50	64,00	81,00
2011	49,00	45,00	40,00	16,70	4,00	7,50	0,00	0,00	32,70	19,00	21,50	64,50	64,50
2012	70,50	47,50	43,50	47,10	1,50	2,00	2,00	3,20	4,50	43,10	25,50	36,20	70,50
2013	65,50	24,00	11,50	9,40	2,80	0,00	0,00	2,70	1,50	8,00	17,50	70,30	70,30
2014	54,50	24,90	30,00	5,50	0,00	8,00	0,50	4,00	2,00	46,00	20,00	34,50	54,50
2015	44,50	88,00	50,50	10,50	20,50	1,30	5,50	0,00	3,50	20,00	25,50	40,00	88,00
2016	28,00	28,50	8,50	7,10	4,10	0,00	0,00	20,00			42,00	40,00	
2017	20,00	20,00	18,00	10,00	1,00	1,00	0,00	1,50	6,00	32,00	20,00	38,50	38,50
2018	48,50	22,60	20,50	14,10	15,50	0,00	3,50	10,50	28,00	16,50	17,60	49,50	49,50
2019	29,80	25,30	57,50	48,60	4,60	0,00	4,50	8,50	0,50	46,80	48,00	28,00	57,50
2020	29,50	143,80	30,20	18,50	5,50	0,00	0,00	0,00	28,50	28,50	25,00	42,60	143,80
2021	48,50	31,00	40,60	15,30	3,50	0,50	2,60	0,00	11,00	10,80	56,30	42,70	56,30
2022	44,50	42,10	25,00	15,70	2,70	0,00	1,20	3,50	5,20	4,10		36,50	
2023													
MEDIA	88,00	143,80	98,00	48,60	20,50	11,50	10,60	25,00	32,70	150,30	81,00	106,50	150,30

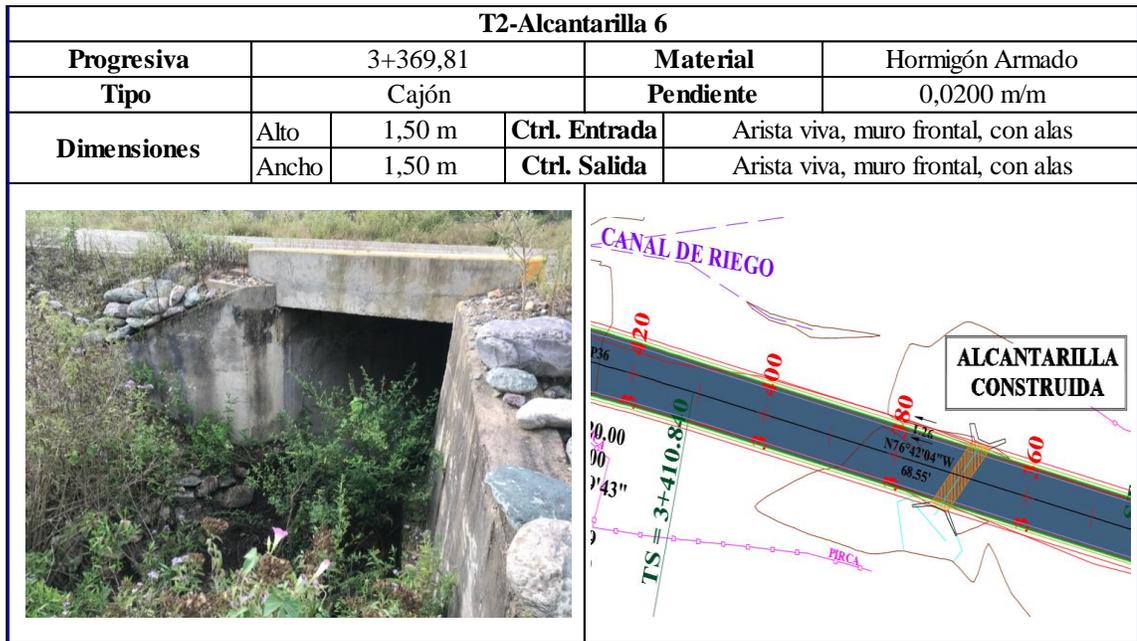
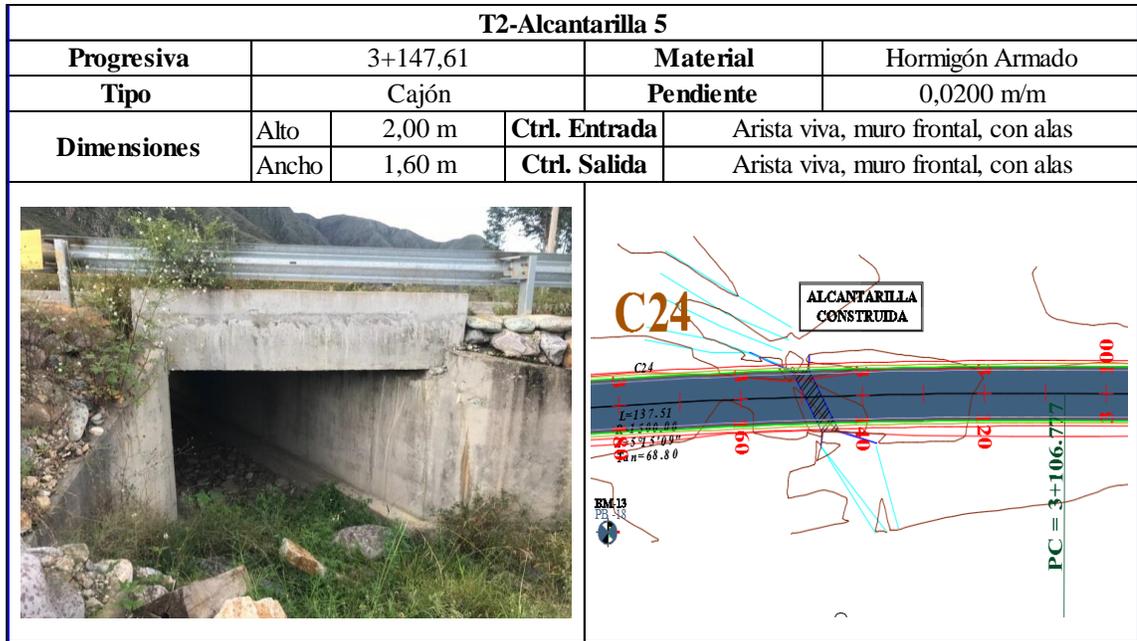
Fuente: Estación de San Andrés

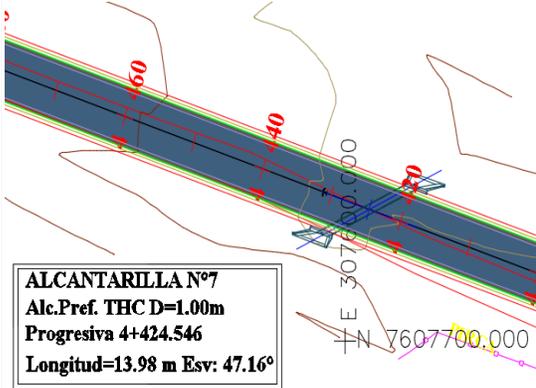
3.3 Inventario de Alcantarillas Construidas

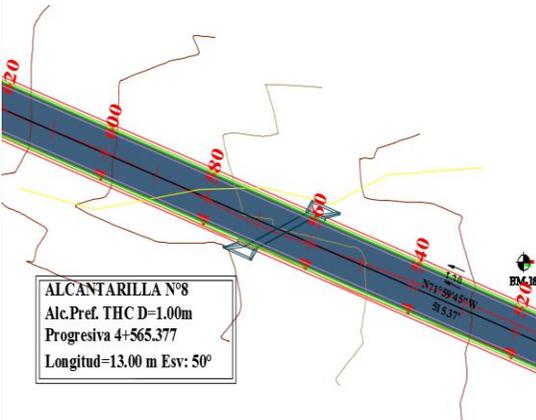
A continuación, se muestra un inventario mediante cuadros de las alcantarillas de estudio que se encuentran construidas, cuadros de elaboración propia.



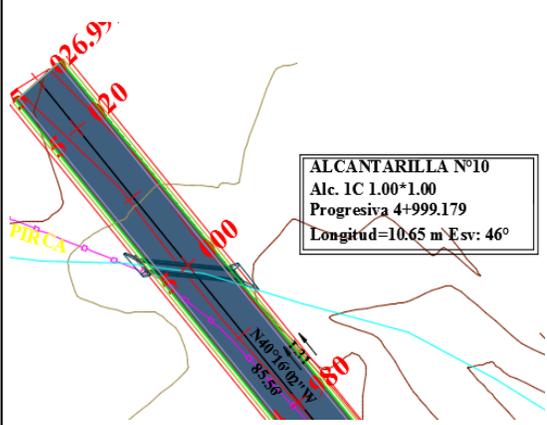




T2-Alcantarilla 7				
Progresiva	4+424,54		Material	Acero corrugado
Tipo	Circular		Pendiente	0,0200 m/m
Dimensiones	Diam.	1,00 m	Ctrl. Entrada	Arista viva, muro frontal, con alas
			Ctrl. Salida	Arista viva, muro frontal, con alas
				

T2-Alcantarilla 8				
Progresiva	4+565,37		Material	Acero corrugado
Tipo	Circular		Pendiente	0,0200 m/m
Dimensiones	Diam.	1,00 m	Ctrl. Entrada	Arista viva, muro frontal, con alas
			Ctrl. Salida	Arista viva, muro frontal, con alas
				

T2-Alcantarilla 9				
Progresiva	4+848,74		Material	Acero corrugado
Tipo	Circular		Pendiente	0,0200 m/m
Dimensiones	Diam.	1,00 m	Ctrl. Entrada	Arista viva, muro frontal, con alas
			Ctrl. Salida	Arista viva, muro frontal, con alas
				

T2-Alcantarilla 10				
Progresiva	4+999,17		Material	Hormigón Armado
Tipo	Circular		Pendiente	0,0100 m/m
Dimensiones	Alto	1,00 m	Ctrl. Entrada	Arista viva, muro frontal, con alas
	Ancho	1,00 m	Ctrl. Salida	Arista viva, muro frontal, con alas
				

3.3.1 Resumen de las características de las alcantarillas

En el siguiente resumen, se muestra una tabla de las características de las alcantarillas en el lugar de estudio.

Tabla 24. Características de las alcantarillas

Progresiva	Alcantarillas	Tipo	Base	Altura	Diametro	Longitud tubería [m]	Pendiente de la tubería [%]	Δ Cotas tubería [m]	Coef de Manning [m]
			b (m)	h (m)	D (m)				
0+245,36	T1-ALCANT 1	rectangular	1,50	1,50		11,00	1,00%	0,11	0,013
0+475,95	T1-ALCANT 2	circular			1,00	11,01	1,50%	0,17	0,013
0+679,79	T1-ALCANT 3	rectangular	1,00	1,00		11,04	1,50%	0,17	0,013
2+203,53	T2-ALCANT 4	rectangular	1,50	2,00		11,00	2,30%	0,25	0,013
3+147,61	T2-ALCANT 5	rectangular	1,60	2,00		11,00	2,00%	0,22	0,013
3+369,81	T2-ALCANT 6	rectangular	1,50	1,50		11,00	2,00%	0,22	0,013
4+424,54	T2-ALCANT 7	circular			1,00	13,98	2,00%	0,28	0,021
4+565,37	T2-ALCANT 8	circular			1,00	13,00	2,00%	0,26	0,021
4+848,74	T2-ALCANT 9	circular			1,00	13,40	2,00%	0,27	0,021
4+999,17	T2-ALCANT 10	rectangular	1,00	1,00		11,00	1,00%	0,11	0,013

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Alcantarillas con sus diferentes caudales de diseño por SEDECA

En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los caudales obtenidos del estudio hidrológico propuesto por SEDECA, donde no se aprecian algunos datos debido a que las alcantarillas propuestas en el estudio fueron modificadas durante su construcción.

Tabla 25. Caudales de diseño por SEDECA

Progresiva	Alcantarillas	Caudal (m ³ /s)
0+245,36	T1-alcantarilla 1	
0+475,95	T1-alcantarilla 2	2,020
0+679,79	T1-alcantarilla 3	3,270
2+203,53	T2-alcantarilla 4	
3+147,61	T2-alcantarilla 5	
3+369,81	T2-alcantarilla 6	
4+424,54	T2-alcantarilla 7	1,160
4+565,37	T2-alcantarilla 8	0,980

4+848,74	T2-alcantarilla 9	1,060
4+999,17	T2-alcantarilla 10	1,300

Fuente: Elaboración propia

3.4 Características de las cuencas para diferentes alcantarillas

Figura 24. Imagen satelital de las cuencas



Tabla 26. Características de las cuencas

Alcantarillas	Progresiva	Longitud del cauce	Pendiente del terreno	Altura media del terreno	Área de la cuenca
		[m]	[m/m]	[m]	[km ²]
T1-alcantarilla 1	0+245,36	338,00	0,021	7,00	0,097
T1-alcantarilla 2	0+475,95	426,87	0,019	8,00	0,068
T1-alcantarilla 3	0+679,79	443,03	0,027	12,00	0,102
T2-alcantarilla 4	2+203,53	319,98	0,019	6,00	0,040
T2-alcantarilla 5	3+147,61	233,14	0,021	5,00	0,022

T2-alcantarilla 6	3+369,81	188,52	0,032	6,00	0,007
T2-alcantarilla 7	4+424,54	470,51	0,028	13,00	0,062
T2-alcantarilla 8	4+565,37	464,92	0,039	18,00	0,046
T2-alcantarilla 9	4+848,74	422,18	0,081	34,00	0,043
T2-alcantarilla 10	4+999,17	539,30	0,093	50,00	0,091

Fuente: Elaboración propia

3.5 Análisis de consistencia de los datos de precipitación

Para el análisis de consistencia de los datos de precipitación, se utilizó el programa Hydrognomon versión 4 de la National Technical University of Athens - Itia Research Team.

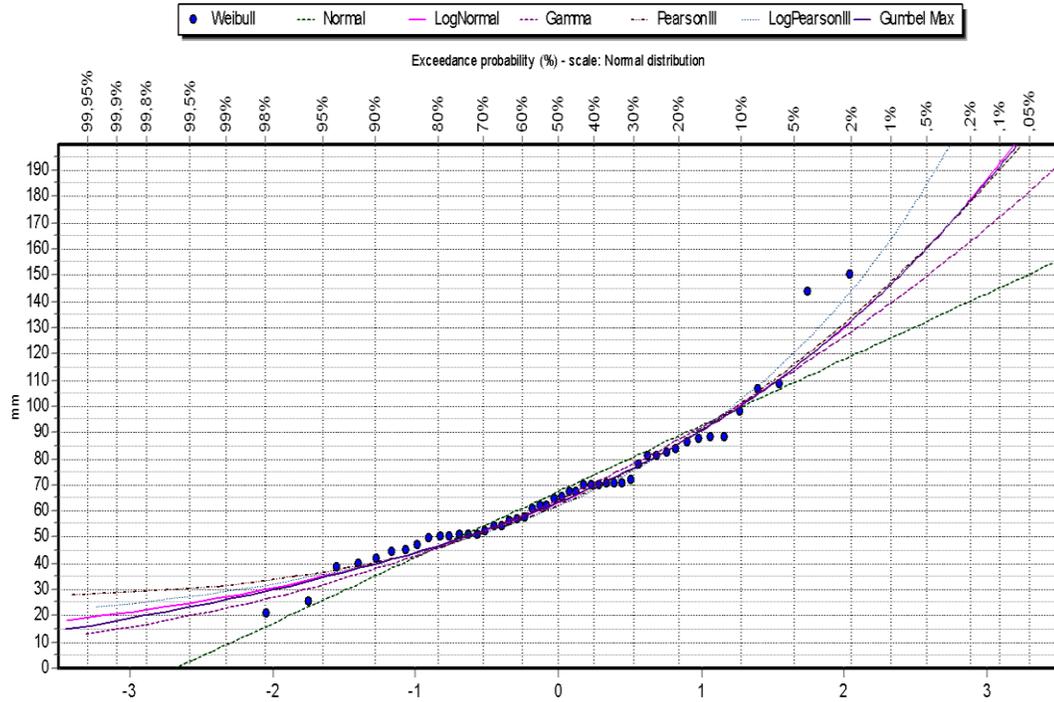
Tabla 27. Test de bondad de ajuste

Test de bondad de ajustes	Nivel de significancia			% de Similitud Attained a	Delta Teórico DMax
	a=1%	a=5%	a=10%		
Kolmogorov-Smirnov test for: All data					
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	42,91 %	0,12562
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	45,94 %	0,12268
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98,84 %	0,0639
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98,98 %	0,06318
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	77,69 %	0,09464
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74,29 %	0,09769
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93,11 %	0,07759
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94,68 %	0,075
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92,23 %	0,07888
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99,34 %	0,0609
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	64,28 %	0,10634
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	5,50 %	0,19289
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	52,57 %	0,11654
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99,56 %	0,05901
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	86,10 %	0,08638
Pareto	REJECT	REJECT	REJECT	%	0,63096
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99,81 %	0,05575
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93,57 %	0,07687
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99,83 %	0,05536
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	59,37 %	0,11056
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	5,69 %	0,19197
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	50,42 %	0,11849
Pareto (L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0,00 %	0,38986
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90,60 %	0,08109
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	17,79 %	0,15815
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92,50 %	0,0785
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19,35 %	0,15538

Fuente: Resultados Estadísticos del Software HYDROGNOMON

Como se puede apreciar en la tabla, los datos se ajustan mejor a la distribución de la precipitación máxima anual es EV1-Máx. (Gumbel) con un 99,34 %.

Gráfica 1. Probabilidades de distribución



Fuente: Resultados Estadísticos Software HYDROGNOMON

3.6 Determinación del caudal de aporte

$$Q_a = CU \frac{C_E * i * A}{3.6}$$

$$CU = 1 + \frac{Tc^{1,25}}{Tc^{1,25} + 14}$$

Donde:

QT = Caudal modificado (m³/s)

CE = Coeficiente de escorrentía

i: = Máxima intensidad media de precipitación, correspondiente al periodo de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración (mm/hr.)

A = Superficie de la cuenca (km²)

CU = Coeficiente de uniformidad, tiene en cuenta la falta de uniformidad en la distribución del aguacero (adm.)

Tc = Tiempo de concentración (hr.)

3.6.1 Determinación del periodo de retorno

El riesgo de falla admisible en función del periodo de retorno y vida útil de la obra está dado por:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Donde:

n = Vida útil de la obra

n = 50 años

T = Periodo de retorno

T = 50 años

R = Riesgo de falla admisible

R = 63,58 %

Tabla 28. Periodo de retorno

Tipo de obra	Tipo de ruta	Periodo de retorno (T años)		Vida útil en (años)	Riesgo de falla (%)	
		Diseño (3)	Verificación (4)		Diseño	Verificación
puentes y viaductos (1)	Carretera	200	300	50	22	15
	Camino	100	150	50	40	28
Alcantarillas (S>1,75 m2) o Hterra≥ 10m y estructuras enterradas (2)	Carretera	100	150	50	40	28
	Camino	50	100	30	45	26
Alcantarillas (S<1,75m2)	Carretera	50	100	50	64	40
	Camino	25	50	30	71	45
Drenaje de plataforma	Carretera	10	25	10	65	34
	Camino	5	10	5	67	41
Defensas de riberas	Carretera	100	-	20	18	-
	Camino	100	-	20	18	-

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras Vol.2 - 1.2 Elección del periodo de retorno,

Págs. 9/313

3.6.2 Altura de lluvias máximas

Usando la distribución de máximos valores según la Ley de Gumbel, se obtienen las precipitaciones correspondientes a tiempos inferiores a 24 hrs., utilizando la ecuación que relaciona la moda de los valores máximos diarios, con la moda correspondiente a otros valores.

Para los cálculos, se utilizaron las precipitaciones máximas diarias de la estación de estudio.

Donde se obtiene lo siguiente:

Valor promedio	67,571	X Prom
Desv. Est.	25,195	DesvEst.
Moda Ponderada	56,082	Ed
Característica Ponderada	0,807	Kd

Tabla 29. Precipitaciones máximas diarias

Periodo de Retorno T (Años)	Precipitación máxima diaria ht (mm)
1,11	58,13
1,25	60,46
1,43	63,10
1,67	66,15
2	69,69
2,5	74,08
3,33	79,71
5	87,69
10	101,31
25	119,31
50	132,93
100	146,54
150	154,511

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Precipitaciones máximas horarias (mm)

Periodo de Retorno	t=0.5h	t=1h	t=2h	t=3h	t=4h	t=6h	t=12h
T (años)	0,5	1	2	3	4	6	12
1,11	30,79	35,37	40,62	44,06	46,67	50,61	58,13
1,25	32,02	36,79	42,25	45,82	48,54	52,64	60,47
1,43	33,42	38,39	44,10	47,83	50,66	54,94	63,11
1,67	35,04	40,25	46,23	50,14	53,11	57,59	66,16
2	36,91	42,40	48,71	52,82	55,95	60,68	69,70
2,5	39,23	45,07	51,77	56,14	59,47	64,49	74,08
3,33	42,22	48,50	55,71	60,41	63,99	69,39	79,71
5	46,45	53,35	61,29	66,46	70,40	76,35	87,70
10	53,66	61,64	70,80	76,78	81,33	88,20	101,32
25	63,19	72,59	83,38	90,42	95,78	103,87	119,32
50	70,40	80,87	92,90	100,74	106,71	115,72	132,93
100	77,61	89,15	102,41	111,06	117,64	127,58	146,55

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Intensidad de la precipitación

En la literatura se han propuesto diversas fórmulas para definir las curvas IDF que pretenden tener validez universal, entre las que destaca la denominada fórmula de Grunsky que se presenta de la siguiente forma:

$$i_t = i_{24} \sqrt{24/t} \left(\frac{mm}{hr} \right)$$

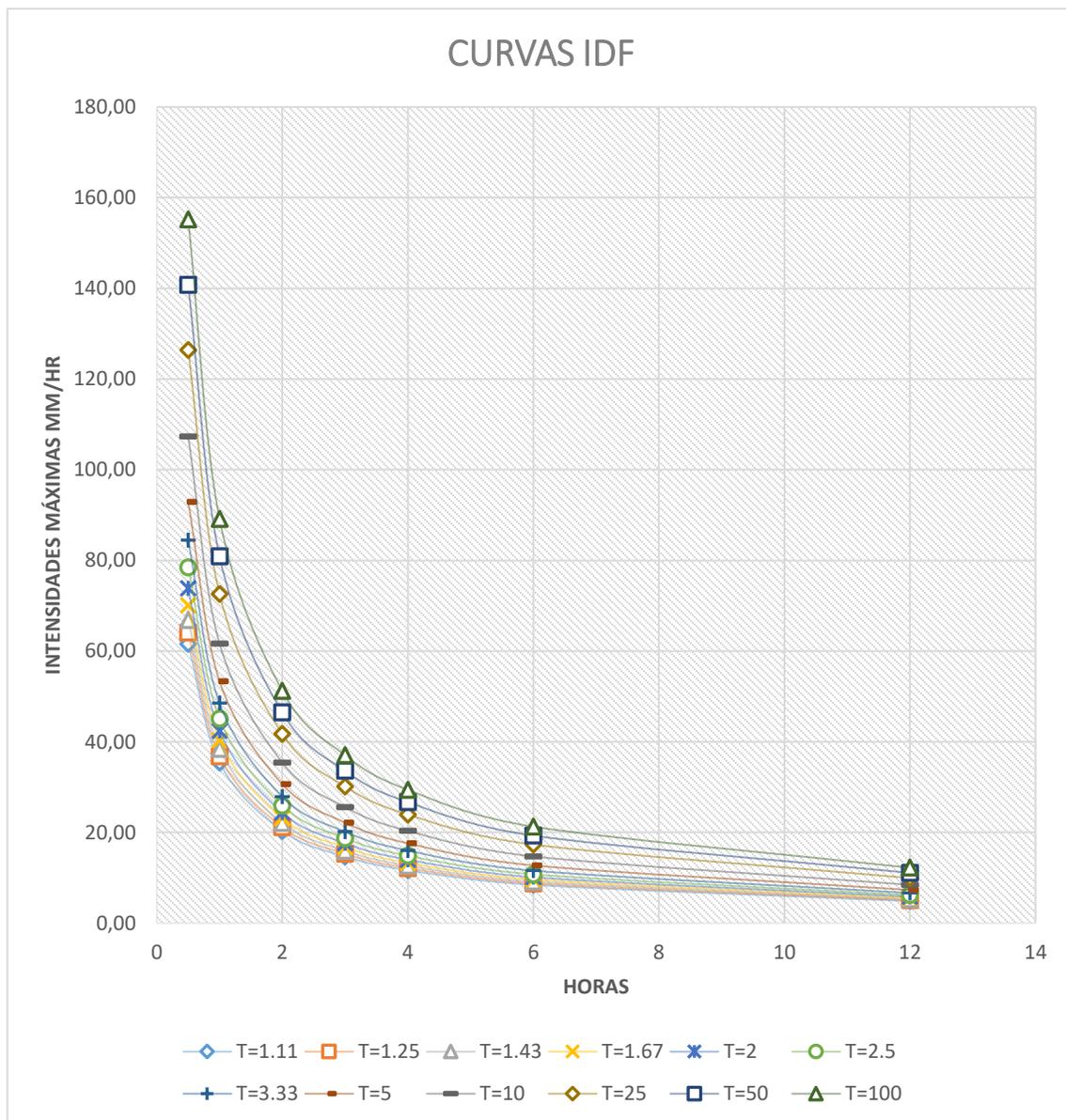
Tabla 31. Intensidades máximas horarias (mm)

Periodo de Retorno	t=0.5h	t=1h	t=2h	t=3h	t=4h	t=6h	t=12h
T (años)	0,5	1	2	3	4	6	12
1,11	61,57	35,37	20,31	14,69	11,67	8,43	4,84
1,25	64,05	36,79	21,13	15,27	12,13	8,77	5,04
1,43	66,85	38,39	22,05	15,94	12,66	9,16	5,26
1,67	70,07	40,25	23,12	16,71	13,28	9,60	5,51
2	73,83	42,40	24,35	17,61	13,99	10,11	5,81
2,5	78,47	45,07	25,89	18,71	14,87	10,75	6,17
3,33	84,43	48,50	27,85	20,14	16,00	11,57	6,64
5	92,89	53,35	30,64	22,15	17,60	12,72	7,31
10	107,32	61,64	35,40	25,59	20,33	14,70	8,44
25	126,38	72,59	41,69	30,14	23,94	17,31	9,94
50	140,80	80,87	46,45	33,58	26,68	19,29	11,08
100	155,23	89,15	51,21	37,02	29,41	21,26	12,21

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran las curvas IDF para los diferentes periodos de retorno.

Gráfica 2. Curvas IDF para diferentes periodos de retorno



3.6.4 Tiempo de concentración

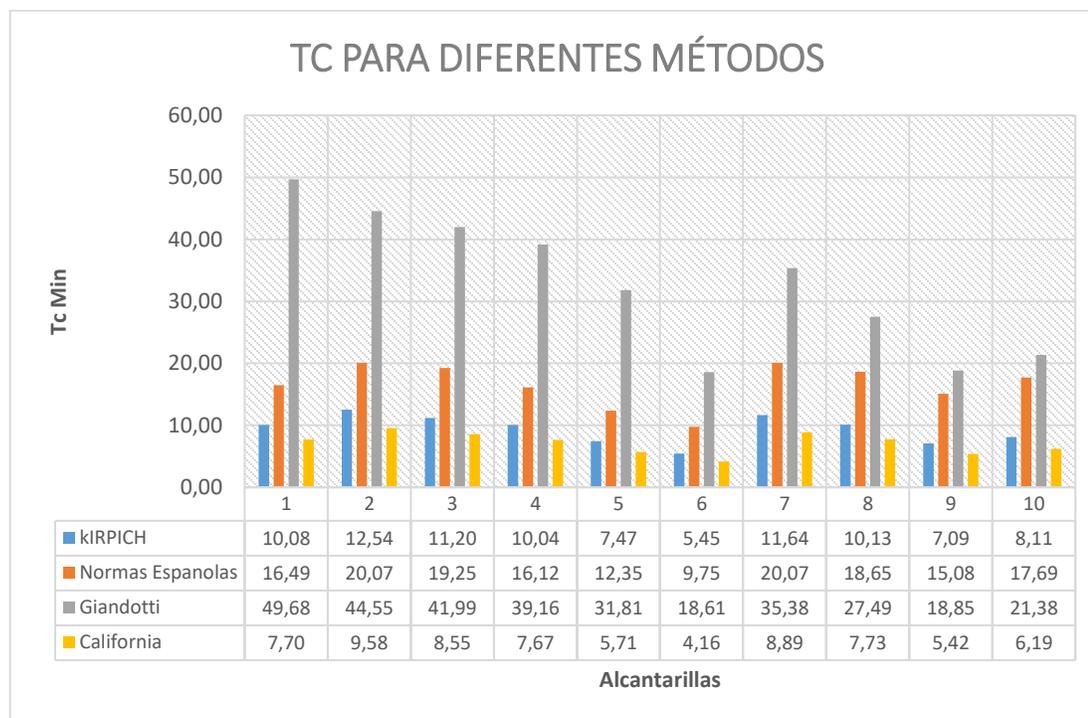
De las fórmulas empíricas para el tiempo de concentración de la Tabla 2, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 32. Tiempos de concentración

Alcantarillas	Progresiva	Longitud del cauce	Pendiente del terreno	Altura media del terreno	Área de la cuenca	Kirpich	Normas Españolas	Giandotti	California Highway & Public Work
		[m]	[m/m]	[m]	[km2]	Tiempo min	Tiempo min	Tiempo min	Tiempo min
T1-alcantarilla 1	0+245,36	338,00	0,021	7,00	0,097	10,08	16,49	49,68	7,70
T1-alcantarilla 2	0+475,95	426,87	0,019	8,00	0,068	12,54	20,07	44,55	9,58
T1-alcantarilla 3	0+679,79	443,03	0,027	12,00	0,102	11,20	19,25	41,99	8,55
T2-alcantarilla 4	2+203,53	319,98	0,019	6,00	0,040	10,04	16,12	39,16	7,67
T2-alcantarilla 5	3+147,61	233,14	0,021	5,00	0,022	7,47	12,35	31,81	5,71
T2-alcantarilla 6	3+369,81	188,52	0,032	6,00	0,007	5,45	9,75	18,61	4,16
T2-alcantarilla 7	4+424,54	470,51	0,028	13,00	0,062	11,64	20,07	35,38	8,89
T2-alcantarilla 8	4+565,37	464,92	0,039	18,00	0,046	10,13	18,65	27,49	7,73
T2-alcantarilla 9	4+848,74	422,18	0,081	34,00	0,043	7,09	15,08	18,85	5,42
T2-alcantarilla 10	4+999,17	539,30	0,093	50,00	0,091	8,11	17,69	21,38	6,19

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Tiempos de concentración por diferentes métodos



Como norma general, el tiempo de concentración no debe ser inferior a 10 minutos, salvo que se tengan mediciones en terreno que justifiquen adoptar valores menores; asimismo, las fórmulas de Kirpich y Giandotti se encuentran calibradas para cuencas menores; por esto, se opta por utilizar el tiempo de concentración obtenido de la fórmula de Giandotti,

3.6.5 Coeficiente de escorrentía

De acuerdo a la Tabla 3 Coeficientes de escorrentía, se adopta un Coeficiente de escorrentía = 0.5

3.6.6 Caudal de aporte Método Racional

Se determina el caudal de diseño por el método racional modificado, de acuerdo al punto 2.3.1; también se realiza una comparación de caudales calculados en este proyecto con los caudales obtenidos del proyecto del SEDECA.

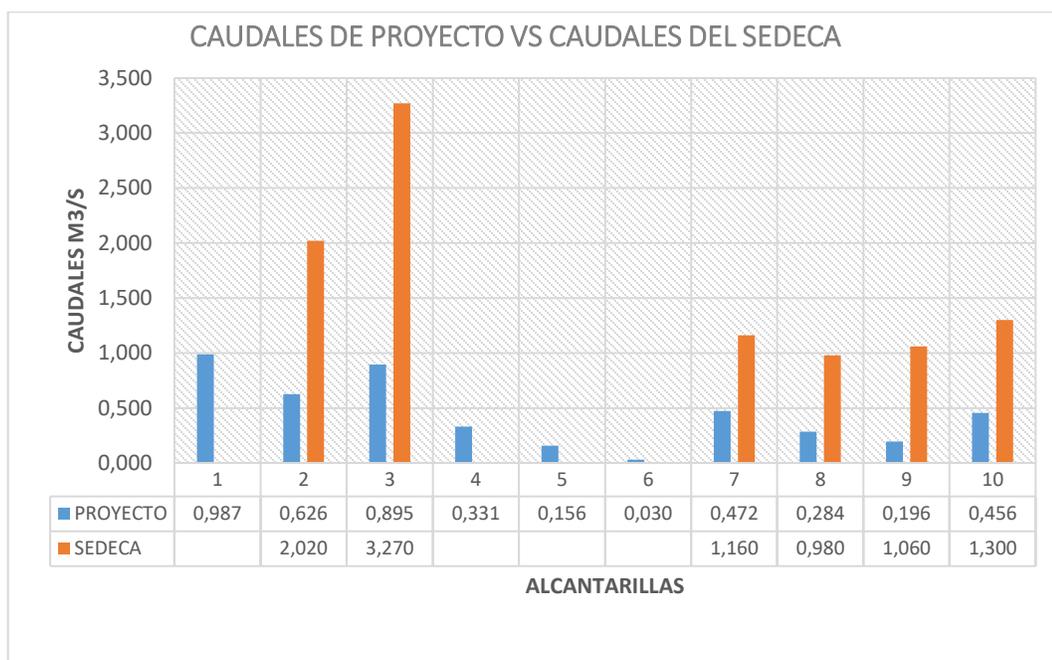
La intensidad utilizada es para 1 Hr. de $80,87 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$

Tabla 33. Caudales de diseño, método racional

Alcantarillas	Proyecto	SEDECA
	m ³ /s	m ³ /s
T1-ALCANTARILLA 1	0,987	
T1-ALCANTARILLA 2	0,626	2,020
T1-ALCANTARILLA 3	0,895	3,270
T2-ALCANTARILLA 4	0,331	
T2-ALCANTARILLA 5	0,156	
T2-ALCANTARILLA 6	0,030	
T2-ALCANTARILLA 7	0,472	1,160
T2-ALCANTARILLA 8	0,284	0,980
T2-ALCANTARILLA 9	0,196	1,060
T2-ALCANTARILLA 10	0,456	1,300

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4. Caudales de proyecto vs. caudales del SEDECA



3.6.7 Cálculo de caudales por SWMM (modelo de gestión de aguas pluviales)

Para el uso del programa, se necesitaron parámetros que se muestran en la Tabla 24 respecto a las características de las alcantarillas construidas y de la Tabla 26 características de las cuencas.

Se utiliza la misma intensidad para el Método Racional.

Tabla 34. Resultados proporcionados por SWMM

Alcantarilla	Línea Caudal (m ³ /s)	Altura normal (m)	Velocidad (m/s)	Froude Adm.
ALC-1	0,71	0,25	1,88	1,19
ALC-2	0,41	0,31	1,98	1,34
ALC-3	0,68	0,3	2,26	1,32
ALC-4	0,29	0,11	1,75	1,67
ALC-5	0,21	0,08	1,59	1,78
ALC-6	0,07	0,04	1,16	1,79
ALC-7	0,40	0,32	1,84	1,22
ALC-8	0,33	0,29	1,75	1,22
ALC-9	0,41	0,36	1,88	1,15
ALC-10	0,79	0,38	2,1	1,09

Fuente: Elaboración Propia

En Anexos, se puede revisar el informe completo que presenta el programa EPA SWMM.

3.7 Determinación de tirantes normales

3.7.1 Determinación de tirantes normales en las alcantarillas diseñadas por SEDECA

Para determinar las alturas dentro de las alcantarillas, es necesario apoyarse en el software “Hydraulic Design of Highway Culverts”, un programa que usa conceptos y fórmulas de la Norma Boliviana de Hidráulica ya que ésta es una copia de la Norma Americana.

En la siguiente Tabla, se muestran los resultados que se presentan con el caudal de cálculo del estudio realizado por SEDECA.

El tirante normal va permitir ver la altura del agua a través de la alcantarilla.

Tabla 35. Tirantes por HY-8 para las alcantarillas diseñadas por SEDECA

	Caudal de descarga	Altura de control de entrada	Tipo de Flujo	Tirante normal	Yc (m)	Profundidad a la Salida	Velocidad de Salida
Alcantarillas	(m³/s)	h (m)		h (m)	h (m)	h (m)	(m/s)
T1-ALCANTARILLA 2	2,020	1,51	5-S2n	0,6	0,82	0,68	2,48
T1-ALCANTARILLA 3	3,270	2,19	5-S2n	0,76	1,00	0,85	3,83
T2-ALCANTARILLA 7	1,160	1,03	5-S2n	0,53	0,62	0,53	2,71
T2-ALCANTARILLA 8	0,980	0,91	1-S2n	0,48	0,57	0,48	2,6
T2-ALCANTARILLA 9	1,060	0,96	1-S2n	0,5	0,59	0,51	2,66
T2-ALCANTARILLA 10	1,300	0,94	1-S2n	0,44	0,56	0,47	2,77

Fuente: Elaboración Propia

3.7.2 Determinación de tirantes normales en las alcantarillas del PROYECTO

Tabla 36. Tirantes proporcionados por HY-8 para las alcantarillas del proyecto

	Caudal de descarga	Altura de control de entrada	Tipo de Flujo	Tirante normal	Yc (m)	Profundidad a la Salida	Velocidad de Salida
Alcantarillas	(m ³ /s)	h (m)		h (m)	h (m)	h (m)	(m/s)
T1-ALCANTARILLA 1	0,987	0,6	1-S2n	0,26	0,35	0,28	2,38
T1-ALCANTARILLA 2	0,626	0,64	1-S2n	0,31	0,45	0,34	2,64
T1-ALCANTARILLA 3	0,895	0,73	1-S2n	0,29	0,43	0,32	2,79
T2-ALCANTARILLA 4	0,331	0,29	1-S2n	0,1	0,17	0,1	2,17
T2-ALCANTARILLA 5	0,156	0,17	1-S2n	0,06	0,1	0,06	1,58
T2-ALCANTARILLA 6	0,030	0,06	1-S2n	0,02	0,03	0,02	1,2
T2-ALCANTARILLA 7	0,472	0,57	1-S2n	0,32	0,39	0,32	2,16
T2-ALCANTARILLA 8	0,284	0,43	1-S2n	0,25	0,3	0,25	1,86
T2-ALCANTARILLA 9	0,196	0,36	1-S2n	0,21	0,25	0,21	1,67
T2-ALCANTARILLA 10	0,456	0,47	1-S2n	0,21	0,28	0,22	2,08

Fuente: Elaboración Propia

3.7.3 Determinación de tirantes normales en las alcantarillas por el método SWMM (modelo de gestión de aguas pluviales)

Para el uso del programa se necesitaron los parámetros que se muestran en la Tabla 24 Características de las alcantarillas construidas y de la Tabla 26 Características de las cuencas.

Se utiliza la misma intensidad de lluvia que por el método racional.

Tabla 37. Resultados proporcionados por SWMM

	Línea Caudal	Altura normal	Velocidad	Froude
Alcantarilla	(m³/s)	(m)	(m/s)	
ALC-1	0,71	0,25	1,88	1,19
ALC-2	0,41	0,31	1,98	1,34
ALC-3	0,68	0,3	2,26	1,32
ALC-4	0,29	0,11	1,75	1,67
ALC-5	0,21	0,08	1,59	1,78
ALC-6	0,07	0,04	1,16	1,79
ALC-7	0,40	0,32	1,84	1,22
ALC-8	0,33	0,29	1,75	1,22
ALC-9	0,41	0,36	1,88	1,15
ALC-10	0,79	0,38	2,1	1,09

Fuente: Elaboración Propia

3.8 Análisis comparativo de los resultados

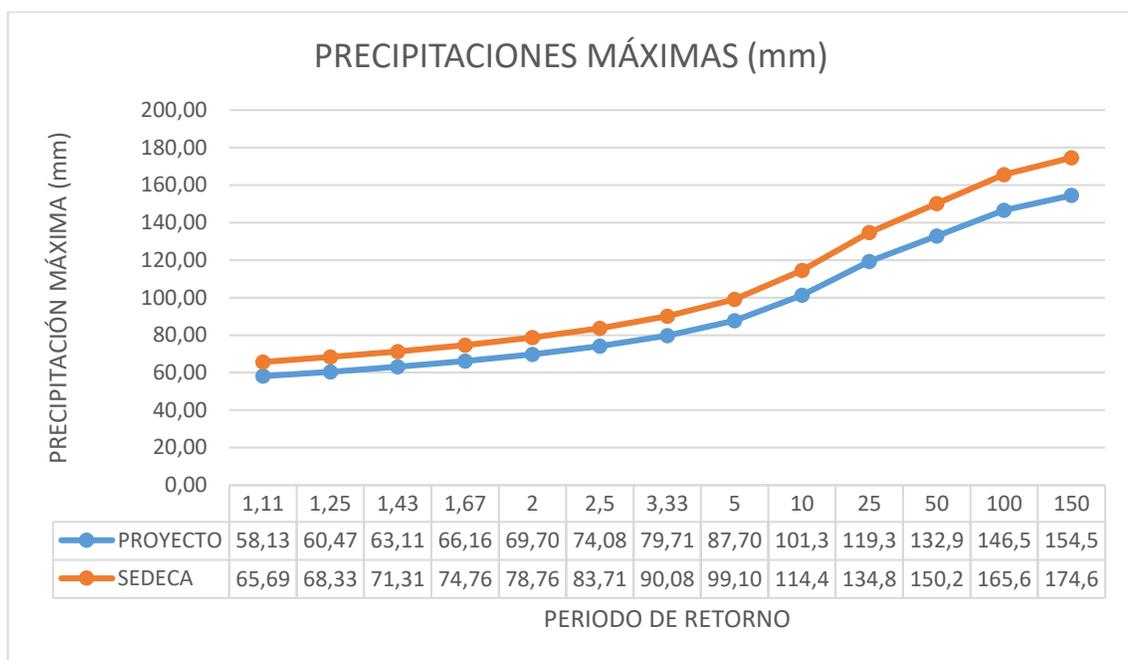
3.8.1 Comparación y análisis de altura de lluvias máximas

Tabla 38. Precipitación máxima diaria, Método Gumbel

	Proyecto	SEDECA
Periodo de Retorno T (Años)	Precipitación máxima diaria ht (mm)	Corrección por Intervalo Fijo (Weiss)
1,11	58,13	65,69
1,25	60,47	68,33
1,43	63,11	71,31
1,67	66,16	74,76
2	69,70	78,76
2,5	74,08	83,71
3,33	79,71	90,08
5	87,70	99,10
10	101,32	114,49
25	119,32	134,83
50	132,93	150,21
100	146,55	165,60
150	154,51	174,60

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 5. Precipitación máxima diaria del PROYECTO vs. SEDECA



Se puede ver en la Gráfica 4 que las alturas de lluvias máximas en 24 horas calculadas por el SEDECA son más altas respecto a las calculadas en este proyecto.

La variación de las alturas puede haber variado por la cantidad de datos que utilizamos en este proyecto, el SEDECA utiliza una serie de datos hasta el 2013 y en este proyecto utilizamos una serie hasta el 2022.

3.8.2 Comparación y análisis de la intensidad

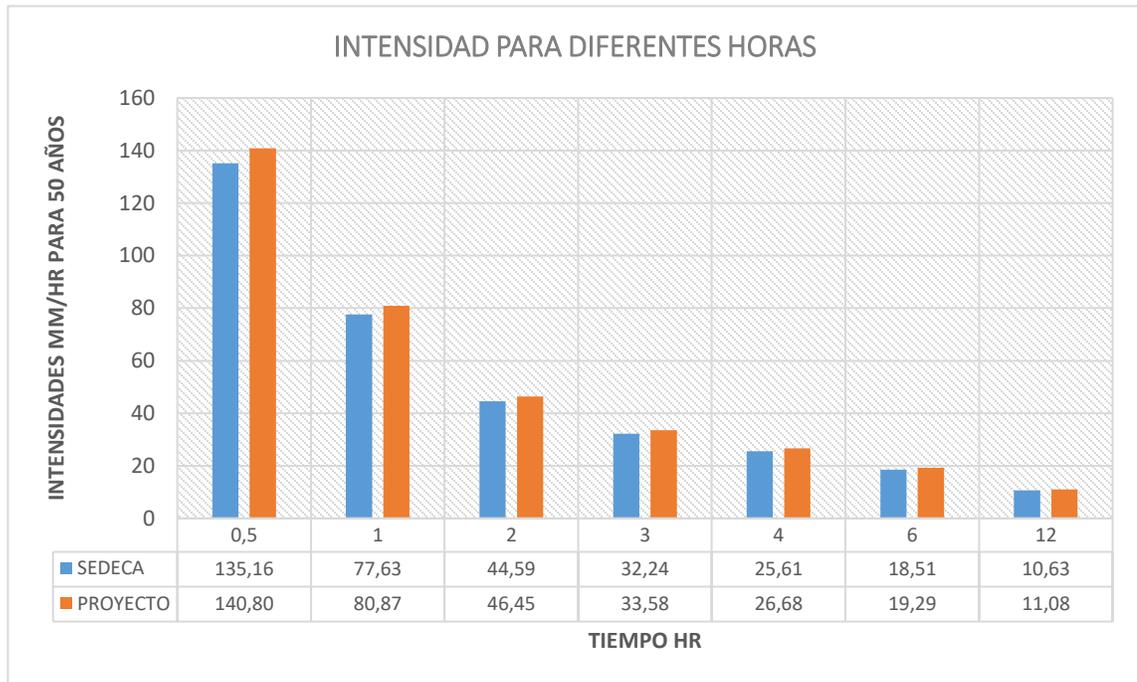
A continuación, se muestra una Tabla donde se refleja las intensidades calculadas en este PROYECTO y las calculadas por el SEDECA para un periodo de retorno de 50 años.

Tabla 39. Intensidad máxima para un periodo de retorno de 50 años

	Periodo de Retorno	t=0.5h	t=1h	t=2h	t=3h	t=4h	t=6h	t=12h
	T (años)	0,5	1	2	3	4	6	12
Proyecto	50	140,80	80,87	46,45	33,58	26,68	19,29	11,08
SEDECA	50	135,16	77,63	44,59	32,24	25,61	18,51	10,63

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 6. Intensidad para periodo de retorno de 50 años



Aquí se puede apreciar las intensidades mayores del PROYECTO comparadas con las del SEDECA.

La variación de estas intensidades se debe a que ya existe variación en los cálculos de las precipitaciones máximas diarias.

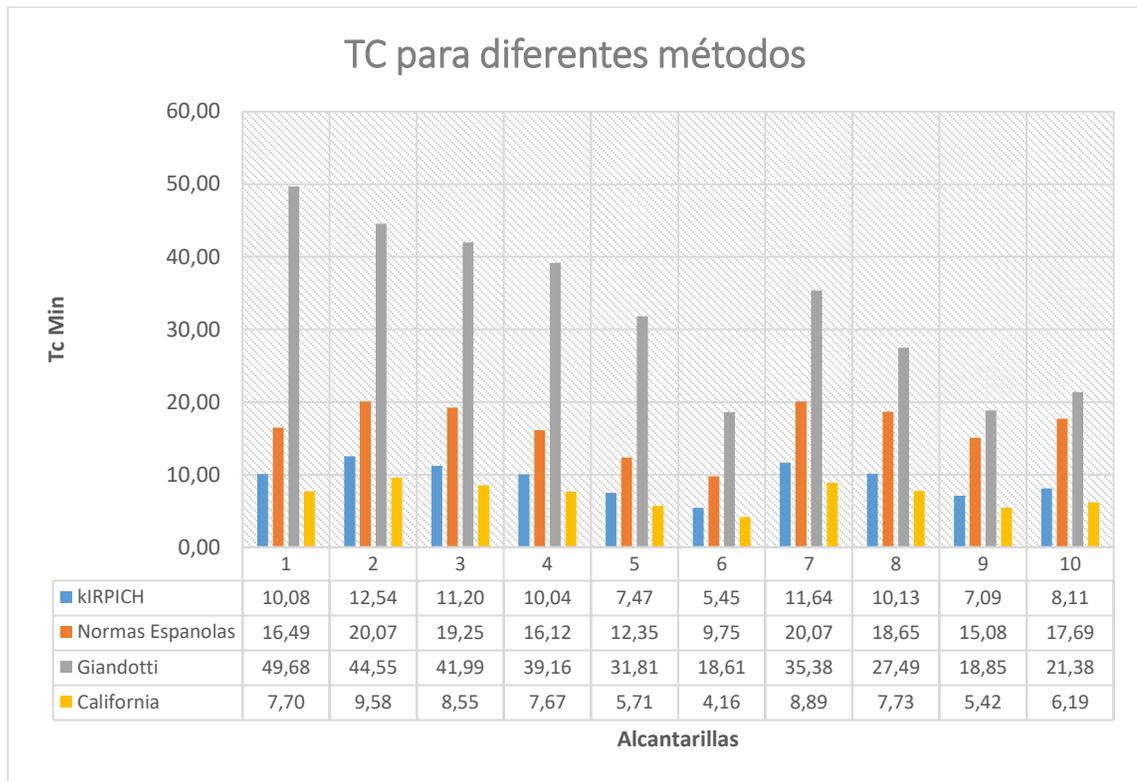
Pero se aprecia que la variación no es superior al 6 % entre ambos cálculos.

3.8.3 Comparación y análisis del Tiempo de concentración

En la Gráfica 6 se aprecia la variación que existe en el cálculo de los tiempos de concentración; en el proyecto se utilizan los tiempos de concentración de Giandotti por las siguientes razones.

- Giandotti es utilizado para cuencas con áreas menores a 10 Km²
- Al tener un Tc mayor se tiene un margen de seguridad mayor

Gráfica 7. Tiempos de concentración por diferentes métodos



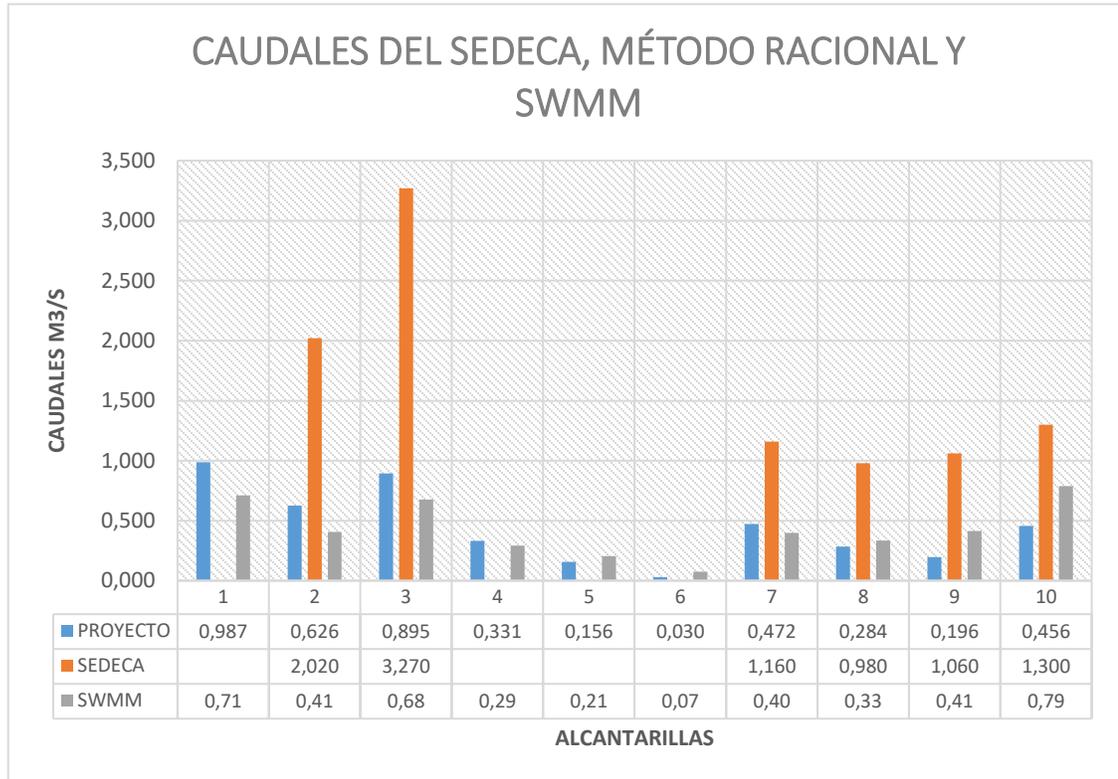
3.8.4 Comparación y análisis de caudales

Tabla 40. Comparación de caudales

	Alcantarillas	Q m ³ /s		
		Proyecto	SEDECA	Programa
		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
0+245,36	T1-ALCANTARILLA 1	0,987		0,711
0+475,95	T1-ALCANTARILLA 2	0,626	2,020	0,406
0+679,79	T1-ALCANTARILLA 3	0,895	3,270	0,677
2+203,53	T2-ALCANTARILLA 4	0,331		0,292
3+147,61	T2-ALCANTARILLA 5	0,156		0,206
3+369,81	T2-ALCANTARILLA 6	0,030		0,074
4+424,54	T2-ALCANTARILLA 7	0,472	1,160	0,398
4+565,37	T2-ALCANTARILLA 8	0,284	0,980	0,334
4+848,74	T2-ALCANTARILLA 9	0,196	1,060	0,413
4+999,17	T2-ALCANTARILLA 10	0,456	1,300	0,789

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8. Caudales del SEDECA vs. Método Racional y el SWMM



Fuente: Elaboración propia

Existe similitud en los valores obtenidos por el método racional y, con el método de modelación hidrodinámica, la variación puede estar en:

El SWMM utiliza métodos de infiltración y escorrentía diferentes al método racional, teniendo esta mayor cantidad de parámetros, como, por ejemplo, método de infiltración del SCS, solicita mayor información sobre áreas permeables y tipos de suelo.

El método racional solo permite utilizar el valor de la escorrentía tabulado, ya sea ponderado por áreas o uno general del terreno.

El método racional utiliza la intensidad máxima por hora obtenida de métodos estadísticos, es un método muy utilizado y válido, a diferencia del software que permite introducir hietogramas y pluviogramas. Por esto, mientras mayor exactitud se quiera dar al análisis de lluvia, métodos más exactos de obtención de datos deberán ser utilizados.

Los resultados obtenidos del SEDECA tienen una diferencia considerable en las alcantarillas 2 y 3; la diferencia puede generarse por diferentes parámetros de cálculos que se desconocen en su totalidad en el proyecto.

3.8.5 Comparación de alturas normales en las alcantarillas y análisis

Tabla 41. Análisis de dimensionamientos de alcantarillas

Progresiva	Alcantarillas	Tipo				SWMM	Proyecto	SEDECA
			Base	Altura	Diametro	Profundidad normal	Profundidad normal	Profundidad normal
			b (m)	h (m)	D (m)	h (m)	h (m)	h (m)
0+245,36	T1-ALCANT 1	rectangular	1,50	1,50		0,25	0,26	
0+475,95	T1-ALCANT 2	circular			1,00	0,31	0,31	0,60
0+679,79	T1-ALCANT 3	rectangular	1,00	1,00		0,30	0,29	0,76
2+203,53	T2-ALCANT 4	rectangular	1,50	2,00		0,11	0,10	
3+147,61	T2-ALCANT 5	rectangular	1,60	2,00		0,08	0,06	
3+369,81	T2-ALCANT 6	rectangular	1,50	1,50		0,04	0,02	
4+424,54	T2-ALCANT 7	circular			1,00	0,32	0,32	0,53
4+565,37	T2-ALCANT 8	circular			1,00	0,29	0,25	0,48
4+848,74	T2-ALCANT 9	circular			1,00	0,36	0,21	0,50
4+999,17	T2-ALCANT 10	rectangular	1,00	1,00		0,38	0,21	0,44

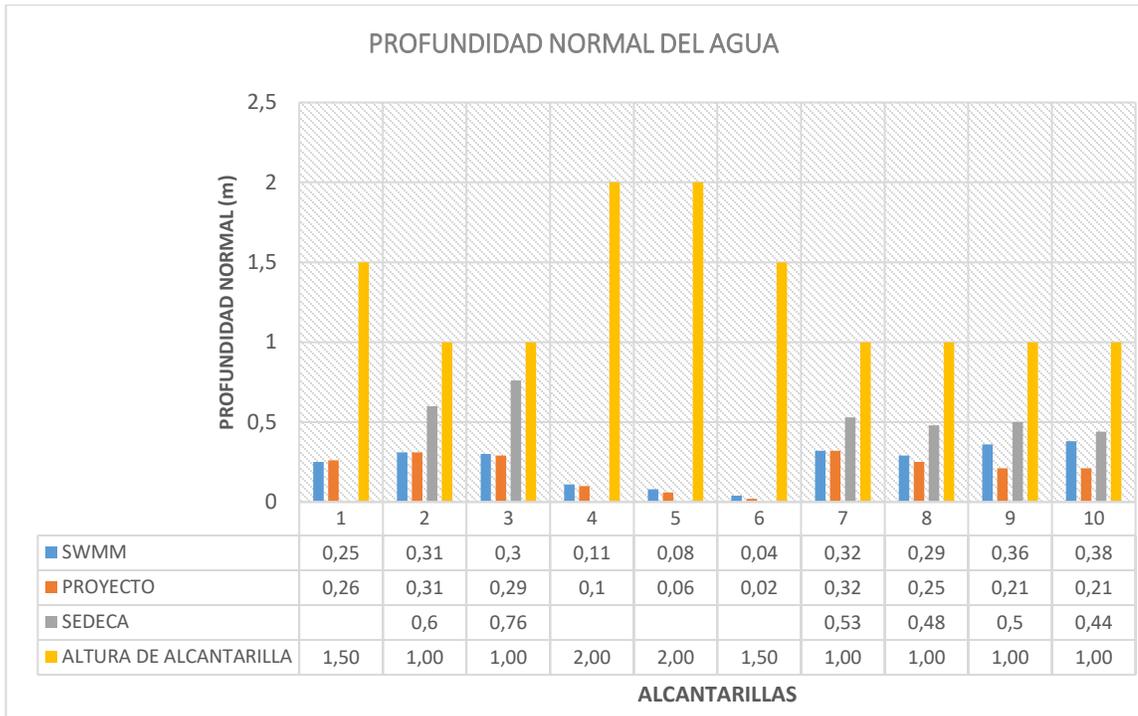
Fuente: Elaboración propia

* Es importante mencionar que estas alcantarillas fueron construidas como se muestra en el reporte fotográfico.

La diferencia que existe entre los tirantes obtenidos por los diferentes métodos de las alcantarillas construidas con las obtenidas con el programa es evidente, la capacidad de las alcantarillas construidas, mostrada la Gráfica 8, en especial en las alcantarillas 4, 5, 6, al parecer se adaptaron más al terreno para que funcionaran como estructuras de la vía.

Un parámetro importante bajo el cual se construyeron las alcantarillas es que no sean menores a un metro de diámetro.

Gráfica 9. Tirantes normales respecto a la altura de la alcantarilla



De acuerdo a los resultados obtenidos por el programa, no existen inundaciones en los conductos; cumple la condición de revancha, con un espacio libre como mínimo de 20 cm para el paso de objetos flotantes.

Es importante resaltar que el programa no realiza automáticamente el dimensionamiento de la tubería, este valor deberá ser verificado por el usuario.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se realizó satisfactoriamente la comparación entre los dos métodos, Racional y Modelación Hidrodinámica utilizando el software SWMM (*Storm Water Management Model*).
- Se realizó la modelación hidrodinámica de manera satisfactoria con el software SWMM mediante el cual se obtuvieron los caudales (mostrados en la Tabla 40) y los tirantes (mostrados en la Tabla 41) para su adecuada comparación.
- Se obtuvieron los caudales de diseño mediante el método racional de manera satisfactoria utilizando métodos estadísticos para la obtención de la intensidad; es importante mencionar que se realizó, además, la actualización de los datos de lluvias, mediante la cual se establecieron las diferencias en los caudales de diseño por el método racional.

Como se muestra en la Gráfica 4, la diferencia que existe entre la intensidad obtenida por el SEDECA es menor en comparación con la intensidad obtenida con datos actualizados.

- Se puede concluir que la variación principal en la obtención de caudales reside en diferentes factores que se mencionan a continuación:
 - El programa SWMM utiliza como dato de entrada principal tormentas obtenidas mediante pluviógrafos.
 - El programa utiliza diferentes factores para determinar la capacidad de escorrentía de la cuenca como: área impermeable de la cuenca, coeficientes de permeabilidad e impermeabilidad, depósitos de almacenamiento e infiltración por el método del número de curva por el SCS, tabulado en la publicación “Urban Hydrology for Small Watersheds”.
- Se puede ver, en la Tabla 40, las diferencias en el valor de los caudales obtenidos por los dos métodos, siendo, el caudal determinado por el SEDECA mayor al

caudal obtenido en este PROYECTO y al determinado por la modelación hidrodinámica a través del software SWMM.

- Los tirantes obtenidos mediante el método racional fueron determinados haciendo uso del software HY-8, un software especializado para diseño de alcantarillas que utiliza el manual de Hidrología y Drenaje para el diseño de carreteras en Bolivia.

Los tirantes calculados mediante el software SWMM que se muestran en la Tabla 41 tienen similitud con los obtenidos en este PROYECTO y no así con los obtenidos por el SEDECA,

La comparación realizada en la Tabla 41 muestra una diferencia significativa entre los tirantes obtenidos por el SEDECA y los obtenidos en el PROYECTO y por el software SWMM, encontrándose similitudes entre los dos últimos ya que usó la misma fuente de datos.

- Se concluye también que, al utilizar el programa SWMM, se analiza simultáneamente el caudal de diseño y el comportamiento del flujo dentro de la alcantarilla.
- Al finalizar el análisis con el programa, se identificó que el inconveniente que presenta del SWMM es que éste no realiza controles de entrada y de salida.
- Además, es importante ultimar que el programa es más eficiente con hietogramas o pluviogramas, información que no está disponible en Tarija; los registros de tormenta permiten realizar un diseño más exacto, ya que se trabaja con intervalos de tiempo menores.
- Ninguna alcantarilla -por el método racional ni por el método de modelación hidrodinámica- trabaja con inundaciones en la entrada y/o en la salida; este es un dato importante a considerar, ya que si algún extremo trabaja inundado, se deberá tomar en cuenta en el diseño estructural de la carretera.
- Los datos o parámetros requeridos para el estudio mediante este método no incrementan el costo del mismo, ya que se utiliza la misma información que para el método racional y el software es de distribución gratuita.

4.2 Recomendaciones

- Implementar nuevos tipos de registros pluviométricos, ya que, al contar con este Software que analiza tormentas, es posible mejorar el diseño de alcantarillas.
- Para que no se presenten dificultades en la introducción de datos relacionados con el tipo de suelo, vegetación y cauces, es necesario recopilar información precisa, en lo posible, imágenes satelitales y visitas al campo con registros fotográficos de la zona.
- Es importante leer el informe presentado por el programa, especialmente los reportes de velocidad del caudal y tirante máximo, ya que se deben controlar estos dos, ya que el programa no permite poner límites que alerten al proyectista si se salen de los rangos que la norma exige.
- El programa *Storm Water Management Model (SWMM)* es un método confiable ya que es rápido, de simple introducción de datos, salida de datos, se puede editar en cualquier momento y recalcular, permite ver simulaciones del perfil longitudinal de las alcantarillas y la evolución del caudal durante el tiempo de tormenta, además de la utilización de diferentes tipos de sección de tubería, incluso, la creación de perfiles longitudinales basados en secciones irregulares.
- Se recomienda realizar los controles de entrada y de salida de manera separada al utilizar el software ya que este no realiza dicha verificación.