

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Evaluación del drenaje pluvial existente en la carretera Santa Clara-
Entronque Vueltas comprendido entre el kilómetro 3 y 4

Diplomante: Daniel Rodríguez Murillo

Tutor: Dr. Ing. René García Depestre

Profesor Consultante: Ing. Adrián Campos González

Santa Clara

2017

Dedicatoria

A mis padres y mi hermano por alentarme en cada momento de flaqueo. A mis amigos por no permitirme caer en el estrés y la fatiga mental, y brindarme su apoyo incondicional en los momentos necesarios. A mis compañeros de año, tanto los de Ingeniería Civil como los de Arquitectura, los que continuaron, y los que no.

Daniel Rodríguez Murillo

Agradecimientos

A mis padres, Mayerling y Daniel, por creer en mí y confiar plenamente en todas mis decisiones, erróneas o no.

A mi hermano Dayron por permitirme tener tiempo para desarrollar el presente trabajo de diploma no distrayéndome de más.

A mis amigos Lenier, Rossana, Lázaro, Darián, y tantos otros que me brindaron tiempo de sus vidas, dejando de lado su disfrute en varias ocasiones para prestarme algo de su valioso tiempo.

A mi tutor Adrián, por la paciencia a la que ha tenido que recurrir conmigo.

A Mirelis, a Diego Abreu, por la cálida atención que recibí en la Empresa de Recursos Hidráulicos, y su más que útil y solidaria hospitalidad hacia mí, que entre tantos ajetreos lograban dedicarme de su tiempo.

Daniel Rodríguez Murillo

Resumen

En la construcción de vías, ya sean urbanas o rurales, uno de los aspectos más importantes que se debe tener en cuenta es la evacuación de las aguas que caen sobre la plataforma de la vía, sus alrededores, la que corre por los cauces naturales del terreno y la que se infiltra y circula en el subsuelo. Con este objetivo se comenzaron a instalar sistemas de drenaje que evitan que el agua de lluvia que cae sobre la vía y la que corría por los cauces naturales del terreno penetrara dentro del suelo de la explanación, con el fin de preservar viales de gran importancia, brindar seguridad vial y estructural. Es necesario aclarar que, debido a su importancia, en la mayoría de los casos el criterio de drenaje rige el diseño geométrico de la vía; además, este aspecto resulta determinante en el caso de que se esté urbanizando una zona construida.

El presente trabajo de diploma pretende analizar desde el punto de vista técnico el sistema de drenaje pluvial existente en el tramo de carretera del kilómetro 3 al 4 en la carretera Santa Clara-Entronque Vueltas, en la urbanización "El Gigante", con el fin de proponer una alternativa de solución a las inundaciones en el tramo de vía a través de un conjunto de medidas estructurales o no estructurales, buscando reducir al máximo posible retardos en el drenaje rural y suburbano existente en la zona, evitando daños a la estructura vial y edificaciones aledañas.

Abstract

At the construction of roads, right now be urban or rural, one of the more important aspects that one must have in account is the evacuation of the waters that fall on the road's platform, your surroundings, the one that runs about the natural cauces of the lot and the one that sneaks in and circulates at the subsoil. With this in view they began to install drainage systems that they avoid than the rainwater that falls on the road and the one that was running about the natural cauces of the lot penetrate within levelling's ground, with the aim of preserving ampoules of vital importance, offering road and structural certainty. It is necessary to become clear than, due to his importance, for the most part the opinion of drainage governs the road's geometric design; besides, this aspect proves to be determining in the event that a constructed zone be urbanized.

The present work of diploma attempts examining from the technical point of view the pluvial existent drainage system at the stretch of road of the kilometer 3 to the 4 at the road Santa Clara-Entronque Vueltas, at the housing development "El Gigante", with the aim of proposing an alternative of solution to the floodings at the stretch of road through a set of measures structural or not structure them, searching to reduce delays at the rural drainage and existent suburbanite at the zone to the possible peak, avoiding damages to the road structure and bordering edifications.

Tabla de Contenidos

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I: ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE TENDENCIAS ACTUALES ACERCA DE LA EVALUACIÓN DEL DRENAJE PLUVIAL.....	15
1.1. Drenaje.....	15
1.2. Sistema de Drenaje	20
1.3. Elementos empleados para el control del drenaje y evacuación de las aguas pluviales.....	24
1.4. Factores de Diseño.....	32
1.5. Evaluación del sistema de drenaje existente.....	35
1.6. Conclusiones parciales.....	36
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DE LOS MÉTODOS Y METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE Y ANÁLISIS DE CUENCAS HIDROLÓGICAS.....	37
2.1. Conceptos básicos.....	37
2.2. Diseño hidrológico.....	38
2.3. Diseño hidráulico	51
2.4. Conclusiones parciales.....	57
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE.....	59
3.1. Características hidrológicas e hidráulicas actuales de la zona de estudio.	59
3.2. Análisis hidrológico de las cuencas aportantes.....	68
3.3. Análisis hidráulico.....	73
3.2.1. Diseño hidráulico de cunetas	74
3.2.2. Diseño hidráulico de sumideros o tragantes	79
3.2.3. Diseño hidráulico del tubo de conducción del agua pluvial	81
3.4. Conclusiones parciales.....	83
Conclusiones Generales	84
Recomendaciones	85
Lista de referencias	¡Error! Marcador no definido.
Anexos	89

INTRODUCCIÓN

Los servicios públicos referentes al drenaje vial y urbano en cualquier región o zona determinada no siempre hacen sentir su presencia mientras el diseño de este sea adecuado y perdure a través del tiempo, pero cuando estos fallan por causas de un mal diseño o causas ajenas al mismo, o son necesarios debido a su falta, se encuentra su utilidad.

Desde la época prehistórica ha surgido la necesidad de controlar las aguas precipitadas en el planeta porque al quedar estancadas producen enfermedades y plagas afectando la salud de una población. Esto motivo a la especie humana incursionar rudimentariamente en el ingenio hidráulico. Al evolucionar el hombre se optimizaron los sistemas para captar aguas y drenarlas seguros como pozos, zanjas, plantas de tratamiento, etc.

Con el transcurso de los años estas incursiones rudimentarias del hombre fueron tomando fundamentos, basados en fuentes confiables debido a rigurosos estudios e investigaciones con el fin de indagar en el tema que refiere a la hidrología en la naturaleza.

En la actualidad el ser humano cuenta con ramas profesionales tales como los ingenieros civiles e hidráulicos, que dedican tiempo y estudio, solamente a la investigación y análisis de este tema, y con el fin de hallar soluciones y respuestas cada vez más exactas, factibles y económicas se crean distintos métodos para el diseño de drenajes viales y urbanos, lo cual se traduce a la necesidad de diseñar obras de fábrica, las cuales son las que regulan el recorrido, captación, y saneamiento de las aguas en vías, ciudades, etc.

Existen varios métodos para facilitar el diseño y análisis del drenaje pluvial, actualmente se emplean a nivel internacional una gran cantidad de estos, algunos con nombres distintos pero con los mismos conceptos y objetivos, los más aplicados en los países potencias y vanguardistas en este tema como EE.UU., Brasil, España, Chile, Colombia, etc. cuentan con repertorios bastante amplios, algunos de estos son el método Burkli-Ziegel, el Alexeiev, el Ital-Consult, el Jaritov-Nazarov, y el método Racional, estos los más aplicados a casi todas las situaciones generales posibles, existen otros pero su exactitud y confiabilidad se alejan más de especificaciones constructivas.

A nivel mundial existe una evidente problemática relacionada con el drenaje vial, vinculada a sectores urbanizados de las grandes poblaciones, especialmente en toda la zona referente a Latinoamérica, donde se ha venido incrementando la población y por consiguiente el número

de edificaciones, esto implica que de no considerar una correcta planificación sobre la ubicación de edificaciones aledañas a vías principales pudieran existir dificultades con el drenaje existente. Considerando que en la mayoría de los casos de las construcciones difiere en el cumplimiento de normas o especificaciones reglamentarias expuestas por los organismos establecidos correspondientes, con el específico tema de este estudio, con las normativas relacionadas al sistema de drenaje de las aguas de lluvia o drenaje pluvial en vías (Briceño, Yauhari, 2015).

Actualmente, se ha percibido un considerable incremento de la presencia de fenómenos climáticos que afectan a las distintas urbanizaciones, estos fenómenos traen consigo gran acumulaciones de agua en vías principales y secundarias debido a las incidencias constantes de las precipitaciones, y la falta del drenaje y mantenimiento de los mismos. La incidencia del agua de lluvia es uno de los principales elementos que causan la mayor parte de los problemas en carreteras donde la estructura del pavimento se ve afectada directamente por la acumulación constante de esta, afectándose así los suelos, terraplenes, flujo vehicular, transeúntes, etc. Lo que origina la primordial necesidad de construir obras de drenaje óptimo y adecuado con el fin de disponer de las aguas de lluvias, por esta vía alcanzar la posible solución para evitar las dificultades que traen consigo las escorrentías (Briceño; Yauhari, 2015).

Destacando además que otra causa de la vigente problemática referente al sistema de drenaje vial en la zona de estudio puede ser un mal estudio hidráulico, ya que el mismo cumple con la función de diseñar el conjunto de obras de fábrica para captar, conducir y descargar las aguas de lluvia a su disposición final (Briceño, Yauhari, 2015).

Con este fin, cuando una vía es construida, es exigente la realización de un estudio previo hidráulico ya que el posterior trazado vial acarrea consigo la interrupción del drenaje natural que tenían las aguas anteriormente a la construcción de la misma. Por tanto, el agua que circulaba libremente antes de la construcción del vial debe encausarse de forma adecuada fuera de estas obras, de allí la importancia de las obras de captación y conducción. Resumiendo, con la construcción de un camino se modifican a su vez las condiciones existentes del escurrimiento de las zonas que la vía atravesara, lo que trae consigo problemas como erosiones, inundaciones, daños a la estructura del pavimento, etc., (Briceño Sánchez; Yauhari, 2015).

En el caso particular de Cuba esta realidad no es ajena, ya que se ha podido observar que en las diferentes provincias como La Habana, Santiago de Cuba, Guantánamo, e incluso Villa

Clara, se ha notado la afectación directa de la acumulación del agua de lluvia en sus principales vías a causa de un deficiente sistema de drenaje, ocasionando daños de alta envergadura a la estructura de las vías y a sus alrededores. De la misma manera, se presentan graves casos de inundaciones y crecidas de los cursos naturales del agua cuando se originan ciclos de pluviosidad de respectiva intensidad y duración, lo que conlleva el fallo de los sistemas de drenaje, los cuales para la disposición de las aguas producidas por las precipitaciones no tienen la capacidad requerida.

En el municipio de Santa Clara, provincia Villa Clara, la zona de estudio para el presente trabajo de diploma, se ha notado cada vez con más fuerza esta grave problemática, donde es evidente que existe un drenaje deficiente, debido a la falta de mantenimiento, falta de diseño de un sistema de drenaje adecuado, obstrucción en las cunetas cercanas a la vía, etc., por lo que con las intensas precipitaciones que se han presentado en la actualidad, la vía queda difícilmente transitable por la acumulación de las escorrentías.

Es importante tener en cuenta que en los últimos 30 años la carretera Santa Clara-Entronque Vueltas, ha cobrado una vital importancia para el desarrollo de la provincia Villa Clara, ya que además del servicio de comunicación de la cabecera provincial con tres municipios, es la vía de acceso más rápida al polo turístico de la Cayería Norte de la provincia. Diariamente por este vial circulan una gran cantidad de disímiles tipos vehículos, entre los que se cuentan un gran número de transporte de personal turístico y obrero, además vehículos pesados los cuales llevan una gran variedad de productos para surtir a esta cayería.

Recientemente, a causa de las sistemáticas precipitaciones que ocurren en la zona central del país y en la zona localizada en el tramo de carretera Santa Clara-Entronque Vueltas comprendido entre la Escuela Vocacional "Ernesto Guevara" y la Escuela de Formación de Profesores de Educación Física y Deportes "Manuel Fajardo Rivero", se han presentado varias afectaciones a la vía y al tráfico, procedente de las inundaciones que se presentan, la causa puede ser un mal diseño previo a la explotación de la carretera, la obstrucción en el recorrido de las precipitaciones a través de cunetas, zanjas u obras de fábrica menores existentes, lo cual puede estar afectado por excesos de maleza, pasto, o incluso debido a la negligencia de los residentes en esa población los cuales proceden a la construcción de viviendas sin el conocimiento adecuado de que obstruyen la sección transversal de las cunetas, afectando directamente el drenaje de la zona, y por tanto interfieren en la traslación segura del agua por fuera de la vía.

La carretera Santa Clara-Entronque Vueltas fue diseñada aproximadamente en el año 1930, la zona que presenta dificultades en el drenaje era rural, sin viviendas de ningún tipo, y sabiendo que el método de análisis de las cuencas hidrológicas existentes se realizó mediante la fórmula de Talbot.

Esta fórmula no tiene en cuenta la pendiente del área de drenaje; fue deducida en áreas hidráulicas menores de 20 ha, los resultados no brindan los datos de la frecuencia de inundación requeridas para los estudios económicos, ofrece un sustituto sencillo, pero no exacto del análisis hidrológico y de la ingeniería hidráulica. Cuando fue deducida, prácticamente nada se conocía con relación a la hidrología y al diseño hidráulico, está basada en la precipitación media de una región determinada, lo cual la hace poco general e inexacta por lo que no se aconseja su uso en Cuba (Delgado, 2006).

Los movimientos de tierra, la interrupción de los cauces naturales del terreno, la obstrucción de la cunetas, la pérdida de porosidad del suelo, son de los principales factores que intervienen en el proceso de drenaje natural de la zona, ya que la zona muestra afectaciones debido a que un porcentaje de las precipitaciones que recibe las drena efectivamente, pero queda un porcentaje el cual se traslada de manera no controlada por la superficie y acumulándose sobre la vía creando grandes concentraciones de manera que el tránsito diario se ve completamente afectado.

El estudio del contexto anteriormente señalado y del análisis de variada bibliografía facilita plantear el **problema científico** de este trabajo: ¿Cómo evaluar el drenaje pluvial existente en la carretera Santa Clara-Entronque Vueltas en el tramo comprendido entre los kilómetros 3 y 4?

La respuesta a la anteriormente planteada pregunta quedará reflejada con el siguiente **objeto de estudio**: análisis del drenaje vial para una carretera correspondiente a un vial principal empleando métodos actualmente utilizados a nivel internacional y nacional a aplicar para el problema específico que se plantea, lo cual propicia adentrarse en el **campo de acción** referente al diseño hidráulico.

Fundamentando el problema planteado se contempla que la **hipótesis de investigación** la siguiente: Si al tramo de vía comprendido entre los kilómetros 3 y 4 en la carretera Santa Clara-Entronque Vueltas se evalúa el sistema de drenaje pluvial existente, es posible diseñar la sección de las cunetas y obras de fábricas necesarias en el tramo en cuestión para la evacuación de las aguas pluviales.

Para dar solución al problema científico, este trabajo se propone el siguiente **objetivo general**:
Evaluar el drenaje pluvial existente en la carretera rural de interés nacional Santa Clara-
Entronque Vueltas del tramo entre los kilómetros 3 y 4, aplicando los métodos actuales
correspondientes para el diseño de obras de fábrica y cunetas con el análisis de cuencas
hidrológicas correspondiente.

Y los siguientes **objetivos específicos**:

1. Realizar un análisis bibliográfico sobre los métodos de diseño actuales de obras de drenaje y análisis de cuencas hidrológicas y su adaptabilidad a las condiciones cubanas.
2. Analizar mediante los métodos actuales de diseño de obras de drenaje y cuencas hidrológicas el drenaje vial existente en la carretera tramo de estudio.
3. Proponer variantes para la posterior toma de una medida constructiva o conjunto de ellas para dar respuesta al problema presentado.

El cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación, se ejecutan atendiendo a las siguientes **tareas de investigación**:

1. Revisión bibliográfica preliminar y planteamiento del problema, definición y aprobación del proyecto de investigación y su plan de trabajo.
2. Análisis y síntesis de la literatura científica relacionada con la temática de investigación.
3. Planteamiento de las metodologías a utilizar en la presente investigación.
4. Aplicación de las metodologías a casos reales. Evaluación del tramo de carretera seleccionada.
5. Realización de una comparación entre estas metodologías aplicadas al tramo de carretera arribando a conclusiones.
6. Elaboración y defensa del informe final.

En el desarrollo de la investigación se manejan diferentes **métodos** seleccionados, elaborados y aplicados sobre la base del método materialista dialéctico como, por ejemplo:

Métodos del nivel teórico:

- Inductivo-deductivo, se irá de lo universal, en la aplicación de las metodologías, a lo particular, en su aplicación en carreteras rurales de interés nacional, y se pasará nuevamente a lo universal para arribar a conclusiones.

- Histórico-lógico, para conocer la aplicación de las metodologías y específicamente su aplicación en la provincia, haciéndose una comparación entre estas.
- Analítico-sintético, para poder establecer nexos, determinar aspectos comunes y distintivos en los enfoques metodológicos estudiados y arribar a conclusiones.
- Sistémico-estructural, para analizar la utilización de las metodologías como parte de un sistema que interactúa con la planificación, el diseño y conservación de las carreteras rurales de interés nacional.

Métodos del nivel empírico:

- Análisis de documentos, permite valorar lo establecido al respecto en la aplicación de estas metodologías en Cuba y otros países.
- Observación, del drenaje vial del tramo de vía para así evaluar el estado de la misma.

Métodos del nivel matemático y estadístico:

- Análisis de los métodos y evaluación del seleccionado mediante la implementación estadística inferencial.
- Pruebas estadística descriptiva, para la evaluación de las características superficiales del drenaje vial existente y comparación de los diferentes métodos aplicados en el tramo de vía.

La **novedad científica** de la investigación consiste en la importancia de la aplicación de los conocimientos adquiridos sobre drenaje en un proyecto real presentado como temática para el presente trabajo de diploma y las soluciones o medidas tomadas serán consideradas en empresas de proyecto con la finalidad de implementar las variantes en el tramo de vial afectado y erradicar los problemas existentes.

Aportes científicos:

Práctico: Con la aplicación de la metodología expuesta en el presente documento e identificando las afectaciones que presenta la zona de estudio correspondiente a un tramo de un vial principal, se determinarán las medidas posibles a tomar tras una revisión a las cunetas correspondientes al tramo, chequeo de la eficiencia de las obras de fábrica existentes, revisión de los paseos, etc., se propondrán medidas técnicas constructivas que favorezcan el drene pluvial adecuado, empleando alternativas factibles y económicas.

La aplicación de métodos para el diseño de obras de fábrica, cunetas y análisis de cuencas hidrológicas adaptable a las condiciones cubanas permitiendo evaluar el drenaje pluvial existente en el tramo de vía Santa Clara-Entronque Vueltas en el tramo de carretera del kilómetro 3 al 4, cuyo resultado puede ser aplicado a cualquier otro caso similar existente bajo las mismas o similares condiciones.

La estructura de este trabajo de diploma guarda una estrecha relación con el diseño y metodología de la investigación establecida. Se encuentra estructurada de la siguiente forma:

- **Resumen**
- **Introducción**
- **Desarrollo**
- **Capítulo I:** Estado del conocimiento sobre tendencias actuales acerca de la evaluación del drenaje pluvial.

Este capítulo constará con una revisión bibliográfica relacionada con el tema de la investigación, con el fin de conocer el estado actual del conocimiento sobre las tendencias vigentes en la actualidad sobre la evaluación del drenaje pluvial en vías rurales o suburbanas, lo cual permite confirmar la hipótesis anteriormente planteada para constituir a partir de esta la línea de trabajo a arribar. Se abordarán diversos conceptos y definiciones, clasificaciones, importancia y objetividad de la evaluación vial del drenaje pluvial, factores que inciden directa o indirectamente, etc.

- **Capítulo II:** Planteamiento de los métodos y metodologías para el diseño de obras de drenaje y análisis de cuencas hidrológicas.

Este capítulo contará con el desarrollo de los distintos métodos a emplear para el análisis de las cuencas hidrológicas de la zona de estudio, comprendida una longitud de dos kilómetros de vía a analizar, además de los coeficientes y tablas que intervienen en cada uno de los métodos, para aplicarlo en el caso específico vigente bajo las condiciones de un país tropical como Cuba.

- **Capítulo III:** Análisis y comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías de evaluación, diseño y análisis de cuencas hidrológicas para el drenaje vial en la zona de estudio.

El desarrollo de este capítulo es crucial para el arribo de conclusiones y resultados lógicos con el fin de proponer medidas estructurales o no estructurales, a la investigación llevada a cabo en

este trabajo de diploma. Se mostrará el análisis de las cuencas tributarias y gastos máximos para las condiciones más críticas de intensidad de lluvia. Se concluirá con las variantes de las medidas a proponer, con la justificación correspondiente para cada caso específico, suponiendo que este así lo requiera.

- **Conclusiones**
- **Recomendaciones**
- **Referencias bibliográficas**
- **Anexos**

CAPÍTULO I: ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE TENDENCIAS ACTUALES ACERCA DE LA EVALUACIÓN DEL DRENAJE PLUVIAL.

Este capítulo constará con una revisión bibliográfica relacionada con el tema de la investigación, con el fin de conocer el estado actual del conocimiento sobre las tendencias vigentes en la actualidad sobre la evaluación del drenaje pluvial en vías rurales o suburbanas, lo cual permite confirmar la hipótesis anteriormente planteada para constituir a partir de esta la línea de trabajo a arribar. Se abordarán diversos conceptos y definiciones, clasificaciones, importancia y objetividad de la evaluación vial del drenaje pluvial, factores que inciden directa o indirectamente, etc.

1.1. Drenaje.

En ingeniería el término **drenaje** no es más que el sistema de tuberías, sumideros o trampas, con sus conexiones, que permite el desalojo de líquidos, generalmente pluviales, de una población. De manera específica, el término **drenaje pluvial**: es el sistema de drenaje que conduce el agua proveniente de lluvia, a lugares donde se organiza su aprovechamiento (Briceño, Yauhari, 2015).

Importancia del drenaje en vías

Según se plantea en el Documento 1073.II. “Drenaje Superficial en Carreteras” para el diseño hidrológico, “Con la ejecución de un proyecto de viales uno de los aspectos más importantes e imperante a tener en cuenta es la evacuación de las aguas que caen sobre la plataforma de la vía, sus alrededores, la que corre por los cauces naturales del terreno y la que se infiltra y circula en el subsuelo. Ya desde los comienzos de la construcción de carreteras quedó plenamente establecido que su estabilidad sólo podría mantenerse a través del tiempo, si la explanación se mantenía en un estado relativamente seco durante toda la vida útil de la obra. Con este objetivo se comenzaron a instalar zanjas de drenaje que evitaban que el agua de lluvia que cae sobre la vía y la que corre por los cauces naturales del terreno, penetrara dentro del suelo de la explanación”.

Si después de construida la carretera la explanación gana o pierde humedad, se puede producir el deterioro del pavimento motivado por el hinchamiento o retracción de la explanación. Así por ejemplo, cuando la explanación de una carretera es construida de arcilla, el deterioro del pavimento puede ser ocasionado por la pérdida de resistencia que sigue a un aumento relativamente pequeño de la humedad.

La **figura 1.1** muestra la relación entre la resistencia a compresión y la humedad para una arcilla pesada; por otra parte, la desecación del suelo de cimentación durante un período anormal de sequía, puede producir asentamiento de la vía, y por lo tanto, una rotura longitudinal en la superficie del pavimento.

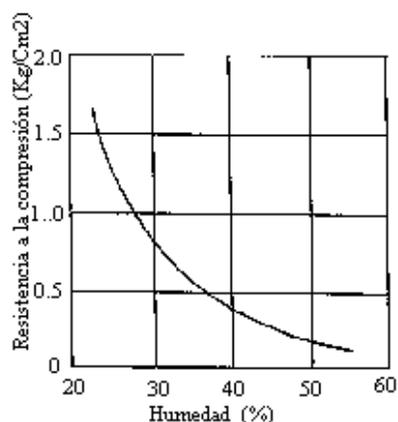


Figura 1.1. Relación entre la resistencia a compresión y la humedad para una arcilla pesada

Entre los principales efectos que provoca el agua en las vías de comunicación se señala:

- Cuando varía la proporción del agua en el suelo, varía también su resistencia con esfuerzo cortante, que trae como resultado deformaciones en el pavimento y corrimiento en los taludes.
- Como existe una relación entre la resistencia y la cantidad de agua que posee el suelo, si esta no es uniforme su resistencia tampoco lo será, por lo que se pueden producir asentamientos diferenciales que provocan alteraciones en la rasante y en última instancia, la rotura del pavimento.
- Si el suelo de la explanación está conformado por ciertos tipos de arcilla, si la proporción de agua aumenta, se pueden producir los fenómenos de hinchamiento con los resultados negativos que pueden provocar en el pavimento.
- Cuando el agua corre por la superficie de los taludes se puede originar erosión en los mismos, dando como resultado la deposición de los materiales producto de la erosión en las cunetas, provocando su mal funcionamiento.
- El agua en contacto con las diferentes capas estructurales del pavimento, puede producir su ruina por desagregación de su masa, especialmente cuando se trata de pavimentos bituminosos contruidos con áridos que desplacen el betún por el agua.

Existen otros fenómenos que causa el agua en contacto con las vías de comunicación los cuales no forman parte importante de la presente investigación por tanto será irrelevante su desarrollo.

En la **figura 1.2** se muestran los principales **movimientos del agua** que pueden producir cambios en la humedad de la explanación.

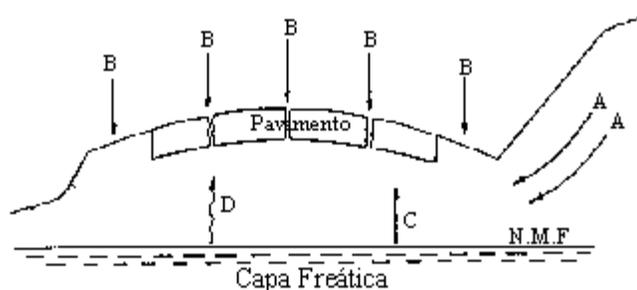


Figura 1.2. Principales movimientos del agua en la explanación

- 1. Filtración del agua desde terrenos más altos adyacentes a la vía.** Este tipo de situación se presenta frecuentemente en zonas montañosas, cuando una capa de suelo permeable se encuentra situada sobre una capa de suelo impermeable; el agua puede aproximarse a la vía desde cualquier dirección, trayendo como resultado complicaciones notables en el sistema de drenaje.
- 2. Filtración del agua a través de la superficie de la vía.** El agua puede penetrar en la explanación de la carretera a través de las grietas y juntas del pavimento, bien sea este flexible o rígido respectivamente, por la superficie de los paseos, por la unión entre el paseo y el pavimento, por el separador central y por los taludes. Para atenuar este tipo de infiltración, además de una adecuada calidad de los materiales utilizados en los pavimentos y paseos y de una adecuada construcción, es necesario suministrar cierta pendiente transversal cuyo valor dependerá del tipo de material que se utilice.
- 3. Elevación o descenso del nivel del manto freático.** En Cuba por lo general, el manto freático se encuentra profundo, por lo que la fluctuación de su nivel con los diferentes cambios estacionales no afecta las condiciones de humedad de la explanación. Esto no obvia la posibilidad de la existencia en el país de zonas con manto freático alto, como por ejemplo en llanuras bajas, donde existe poca escorrentía lateral. Se considera como norma que para mantener la explanación estable, el nivel del manto freático debe estar como mínimo a una profundidad de (1,2-1,5 m) por debajo del nivel inferior de la explanación.

4. Movimiento del agua desde o hacia las capas inferiores del suelo. Este fenómeno es motivado por la ascensión capilar del manto freático, que puede contaminar la explanación de la vía, etc.

Factores que afectan el drenaje vial

Los factores que afectan el drenaje vial son la urbanización, las inundaciones y las restricciones por el tránsito (Riccardi, 1997).

Urbanización. De acuerdo a estudios el clima de una cuenca se altera en la medida en que se urbaniza. Se han observado incrementos de precipitaciones del orden del 5 al 15% debido al aumento de temperatura de los ambientes urbanos (0,5°-3,0°C) y a cambios de los vientos dominantes y otros factores climatológicos. Las redes de desagües rurales se convierten en redes de conductos subterráneos, canales artificiales, pudiendo quedar también ciertos cursos naturales. Las condiciones de borde de la cuenca y las subcuencas incluidas pueden ser alteradas en forma importante (Riccardi, 1997).

El escurrimiento en regiones urbanas por lo general se conforma por dos componentes que si bien están interconectados, su funcionamiento es bien diferenciado. Uno de los componentes es el escurrimiento superficial que ocurre en techos, veredas, parques, calzadas, zanjas, cunetas, áreas impermeables, etc. , que puede fluir hacia las obras de captación del sistema de conductos, hacia sistemas de drenajes abiertos (canales urbanos) o fluir directamente hacia el cuerpo receptor. El segundo componente es el que transporta el agua captada del sistema superficial por medio de obras de captación (sumideros, captaciones de zanjas, etc.) denominado sistema de conductos de drenaje. Este sistema drena en general hacia el cuerpo receptor, pudiendo presentarse casos de afluencia a sistemas de drenajes abiertos. Los sistemas de conductos en general se han diseñado con una capacidad de conducción que permita el drenaje del escurrimiento directo de lluvias (en algunos casos crecidas) de 2 a 10 años de período medio de retorno, sin producir anegamiento en el sistema superficial (Riccardi, 1997).

Para los eventos de recurrencias superiores a la de diseño, la red artificial drenará una parte y será superada, en tanto que la mayor parte del escurrimiento drenará por el sistema superficial (calles y sistemas de drenajes abiertos). Este excedente causará inundaciones y la tendencia del movimiento del flujo será la de escurrir por las antiguas vías naturales, si la topografía no fue sustancialmente modificada. El funcionamiento hidrodinámico del sistema se complejiza puesto que se producen tras-bases de cuencas superficiales e interacción continua entre los

sistemas mayores y menores, éstos últimos trabajando a presión. Al sistema de conductos se lo denomina sistema menor y al superficial que transporta los excedentes sistema mayor de desagües pluviales. La concentración del flujo crece en la medida que la urbanización se desarrolla. Asimismo la velocidad de escurrimiento también aumenta, produciendo un descenso del intervalo de tiempo *lag*, factor de mayor importancia causante del incremento del caudal máximo. Esta aligeración limita la atenuación de flujo y lleva a las cuencas a ser más sensibles a tormentas intensas de corta duración (Riccardi, 1997).

La calidad del escurrimiento especialmente en los cuerpos receptores también sufrirá desmejoras, debido al incremento de nutrientes, contaminación fecal y la introducción de contaminantes como metales pesados, hidrocarburos, herbicidas y pesticidas. La dimensión del impacto sobre el ciclo hidrológico causado por los procesos de urbanización y desarrollo depende de un importante número de factores físicos y culturales. El clima, la topografía, la geología, los tipos de suelos y vegetación tienen una importante influencia del mismo modo que la historia, los patrones y densidades establecidos para el desarrollo y la tipología de la red de drenaje pluvial (Riccardi, 1997).

Esto se explica que en las cuencas rurales en lluvias de baja intensidad gran parte del agua precipitada se pierde en las pérdidas iniciales y la infiltración y el escurrimiento solo ocurre cuando estas demandas son excedidas por la lluvia, en tanto que en cuencas urbanas con gran área impermeabilizada existe escurrimiento en todas las lluvias, con lo que el incremento relativo en caudal es elevado. En tormentas de larga duración, en las que toda la superficie permeable de la cuenca llega a un estado de humedad elevada el caudal es bastante similar entre el producido en superficies permeables y el correspondiente a superficie impermeables. Dado que las pérdidas (intercepción, almacenamiento superficial, infiltración) decrecen a medida que la superficie de la cuenca se impermeabiliza, y que un gran margen de incertidumbre tiene que ver precisamente con la evaluación de esas pérdidas es esperable en superficies impermeables una respuesta más predecible que desde superficies permeables, por lo que también en los modelos, en teoría, se incrementaría la confiabilidad de los resultados a medida que crece el porcentaje de superficie impermeable (Riccardi, 1997).

Inundaciones. Las inundaciones es un fenómeno que se produce cuando se originan eventos naturales que conllevan a que las aguas de los ríos, lagos y mares salgan de su cauce natural para ocupar otros espacios o terrenos ausente de ella. Las lluvias también generan estas acciones cuando interviene en cierta forma la actividad humana en su afán o necesidad de

realizar obras cercanas a los cauces de la misma y en muchas ocasiones ha traído consecuencias graves tales como: pérdida de sus enseres, hasta incluso pérdidas humanas (Briceño, Yauhari, 2015).

Estas son situaciones en las que se produce una sumersión temporal de terrenos normalmente secos como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de un volumen de agua superior al que es habitual en una zona determinada (Delgado, 2006).

Las inundaciones son producto de una combinación de factores de precipitación y limitaciones topográficas, y las afectaciones al drenaje por lo general ocurren mediante la relación interna de estos factores, algunos los cuales se pueden destacar: la topografía plana, restricciones del perfil del suelo, suelos poco permeables, aportes por la capa freática, altas precipitaciones, poca capacidad de los cauces debido a las limitaciones de pendientes o por sedimentación, etc. (Briceño, Yauhari, 2015).

Restricciones del tráfico. Para este caso particular, se refiere a restricción del tránsito cuando las aguas de lluvia crean un caudal o cañada que obstaculiza el paso tanto vehicular como peatonal en las arterias viales, debido a que sube el nivel de agua, en ocasiones estos niveles son tan altos que no solo obstaculizan el paso sino que además provocan inundaciones de vivienda donde los afectados no solamente son los transeúntes sino los habitantes de esa comunidad (Briceño, Yauhari, 2015).

En Cuba, estos problemas se hacen presentes constantemente tras cada período de lluvia, la acumulación de escorrentías en calles, carreteras, y caminos afectando el tránsito seguro de vehículos y peatones. La urbanización desmedida, las inundaciones constantes, y el aumento del tránsito son aspectos reales y actuales que influyen y afectan directamente en el incorrecto drene de las precipitaciones en vías.

1.2. Sistema de Drenaje

Un sistema de drenaje es aquel cuya misión es evacuar los caudales de escorrentía generados por la lluvia caída en medios urbanos, suburbanos y rurales, para luego el adecuado escurrimiento hacia los puntos colectores naturales o diseñados (Briceño, Yauhari, 2015).

Precipitación, intensidad y duración.

Según el documento Normas y Lineamientos Técnicos para las instalaciones de Agua Potable, Agua Tratada, Drenaje Sanitario y Drenaje Pluvial de los Fraccionamientos y Condominios de

las Zonas Urbanas del Estado de Querétaro (2013), se llama precipitación a aquellos procesos mediante los cuales el agua cae de la atmósfera a la superficie de la tierra, en forma de lluvia (precipitación pluvial), nieve o granizo. La precipitación es la componente principal en la generación del escurrimiento superficial y subterráneo.

La magnitud de los escurrimientos superficiales está ligada proporcionalmente a la magnitud de la precipitación pluvial. Por este motivo, los estudios de drenaje parten del estudio de la precipitación para estimar los gastos de diseño que permiten dimensionar las obras de drenaje.

La medición de la precipitación se ha llevado a cabo principalmente con aparatos climatológicos conocidos como pluviómetros y pluviógrafos. Ambos se basan en la medición de una lámina de lluvia (mm), la cual se interpreta como la altura del nivel del agua que se acumularía sobre el terreno sin infiltrarse o evaporarse sobre un área unitaria. La diferencia entre los dispositivos de medición consiste en que el primero mide la precipitación acumulada entre un cierto intervalo de tiempo de lectura (usualmente 24 horas) y el segundo registra en una gráfica (pluviograma) la altura de la lluvia acumulada de acuerdo al tiempo, lo que es más útil para el diseño de obras de drenaje.

La ventaja de usar los registros de los pluviógrafos con respecto a los pluviómetros radica en que se pueden calcular intensidades máximas de lluvia para duraciones predeterminadas, que posteriormente pueden ser transformadas a gastos de diseño para estructuras de drenaje.

La intensidad de lluvia y la duración son dos conceptos asociados entre sí.

- **Intensidad:** Se define como la lámina o altura de lluvia acumulada por unidad de tiempo usualmente se especifica en mm/h.
- **Duración:** Es el intervalo de tiempo que dura la lluvia, definiéndose en minutos.

Escurrecimiento.

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca según Normas y Lineamientos Técnicos para las instalaciones de Agua Potable, Agua Tratada, Drenaje Sanitario y Drenaje Pluvial de los Fraccionamientos y Condominios de las Zonas Urbanas del Estado de Querétaro (2013).

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la

cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

Según Normas y Lineamientos Técnicos para las instalaciones de Agua Potable, Agua Tratada, Drenaje Sanitario y Drenaje Pluvial de los Fraccionamientos y Condominios de las Zonas Urbanas del Estado de Querétaro (2013), define el escurrimiento como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca, ya sea a un cuerpo de agua o al mar. Antes de que ocurra el escurrimiento superficial, la lluvia debe satisfacer las demandas inmediatas de infiltración, evaporación, intercepción y almacenamientos superficiales denominados vasos o cauces.

Se considera que el escurrimiento superficial toma la forma de escurrimiento laminar que se puede medir en cm. A medida que el flujo se mueve por una pendiente y se va acumulando, su profundidad aumenta y deberá descargar en un canal natural o artificial. Con el escurrimiento superficial se forman almacenamientos en las depresiones y almacenamiento por detención superficial proporcional a la profundidad del mismo flujo superficial.

La cuenca es la entidad que transforma la lluvia en escurrimiento.

Cuenca hidrológica.

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial (Arocha, 1983).

De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable.

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (Aparicio, 1997).

La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio de la hidrología, además ha sido definida como:

La totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, tales que todo el escurrimiento originado en tal área es descargado a través de una única salida (Campos, 1992)

Características de la cuenca hidrológica.

Se define que la cuenca hidrológica está formada principalmente por las condiciones topográficas y geológicas del terreno (Aparicio, 1997).

- **Topográficas:** tamaño, forma, pendiente, elevación, red de drenaje, ubicación general, uso y cubiertas de la tierra, lagos y otros cuerpos de agua, drenaje artificial, orientación, canales (tamaño, sección transversal, pendiente, rugosidad, longitud).
- **Geológicas:** tipo de suelo, permeabilidad, formación de aguas freáticas, estratificación.

Cuenca urbana.

Es la cuenca hidrográfica donde se originan procesos urbanísticos de asentamientos humanos con actividades sociales, económicas, políticas y culturales, apoyadas en sistemas tecnológicos artificiales que se desarrollan a expensas del sistema natural (Riccardi, 1997).

La cuenca urbana es la unidad básica territorial que desde las dimensiones político-social, ambiental, económica y físico espacial permite la sustentabilidad de la ciudad, a partir de la compatibilidad en el uso de las fuentes de agua, energéticas y el patrimonio natural que ella contiene, procurando la equidad de la población urbana, que proyecte calidad de vida a las futuras generaciones (Campos, 1992).

Toda cuenca urbana ha sido en algún momento de la historia una cuenca rural, con lo cual puede considerarse a las cuencas urbanas como el efecto de una continua perturbación debido al impacto sobre el medio ambiente natural provocado por los procesos dinámicos de urbanización llevados a cabo por el hombre. Las modificaciones fundamentalmente se manifestaron y manifiestan en cambios en la superficie de la cuenca y las vías de escurrimiento natural del flujo. La impermeabilización de parte de la superficie de la cuenca implica reducción en áreas de infiltración con lo que aumenta el escurrimiento superficial y se reduce la infiltración, percolación, el escurrimiento sub-superficial y subterráneo. Todas las acciones de suavizamiento de la superficie como pavimentaciones, nivelaciones, etc. (implicando una disminución importante de la resistencia al flujo) y las redes artificiales de drenaje aceleran el flujo, pudiendo en casos existir la alternativa de retardo y amortiguamiento debido a terraplenes de defensa, rutas, embalses de retención (Riccardi, 1997).

1.3. Elementos empleados para el control del drenaje y evacuación de las aguas pluviales.

Es necesario conocer los elementos o parámetros que definen un correcto drenaje de las aguas pluviales, además de los elementos útiles a conocer para el posterior empleo en obra. Las obras de drenaje, obras de fábrica, drenaje subterráneo y superficial son aspectos cruciales a tener en cuenta.

Obra de drenaje. Una obra de drenaje como tal, es un dispositivo utilizado para dar paso al agua, restituyendo la continuidad de la trayectoria de los cauces interceptados principalmente por las obras lineales: carretas, ferrocarriles, etc. Originalmente este tipo de obras se denominaban alcantarillas, y se empleaban tres formas geométricas para construirlas: circular, rectangular y abovedada (Campos, 1992)

Las circulares, estaban constituidas por tubos de hormigón en masa de reducidas dimensiones; las rectangulares, más conocidas como tajeas u obra de paso, alcanzaban dimensiones mayores a la de tubos; y las abovedadas, realizadas comúnmente de fábrica de ladrillo, alcanzaban grandes dimensiones, hasta incluso tener la envergadura de puentes pequeños. Actualmente, predomina la tendencia a las obras de drenaje realizadas en hormigón armado, tanto circulares como rectangulares (marcos) o abovedadas (bóvedas), construidas in situ o bien prefabricadas (Aparicio, 1997).

Obra de fábrica. Una obra de fábrica no puede considerarse como una estructura independiente, sino que forma parte de otra obra, una carretera o vía férrea, en la cual realiza una función específica, dar tránsito a las aguas de una corriente, cruzar sobre otra vía o salvar un vano. Una obra de fábrica está condicionada por las características de la vía, es decir, la ubicación, alineación y altura; lo cual indica el empleo de estudios topográficos que aseguren que la misma tenga dentro del conjunto de la obra la posición idónea (Taylor, Valdés, 1987).

Las obras de fábrica pueden tener dos tendencias generales de trabajo. Si se parte de que la obra de fábrica puede solamente evacuar una cantidad menor de agua que la que llega a ella, se creará un aumento del nivel de las aguas delante de la misma, generándose un embalse. La ventaja de este embalse es que atenúa grandemente las resistencias adicionales al movimiento de agua y aumenta la velocidad de circulación dentro de la obra de fábrica (Taylor, Valdés, 1987).

Drenaje subterráneo. El agua subterránea es de gran importancia, especialmente en aquellos lugares secos donde el escurrimiento fluvial se reduce mucho en algunas épocas del año.

Se estima que en Estados Unidos, de toda el agua que se usa al año, una sexta parte es agua subterránea. En Lima, por otro lado, del total de agua que se consume un 40% proviene del subsuelo. Las aguas del subsuelo, como las aguas superficiales, provienen de las lluvias. No son independientes unas de otras, sino que, por el contrario, están muy ligadas entre sí. Muchas corrientes superficiales reciben agua del subsuelo y, a su vez, el agua del subsuelo se realimenta de las aguas superficiales (Chereque, 1990).

Drenaje superficial. Según el concepto planteado en el documento “Proyecto de carreteras”, (Benítez, 1986), el drenaje superficial comprende la remoción, control y disposición del agua que ha caído directamente sobre la superficie de la vía y sus alrededores con el fin de evitar: la acumulación del agua sobre la carretera y zonas adyacentes, el arribo a la carretera del agua proveniente de fuentes laterales, la erosión del pavimento y de los taludes de la sección vial, la interrupción de cauces naturales, y el ataque químico, por el agua, de los materiales constitutivos de la capa de rodadura.

De acuerdo a la dirección que sigue el drenaje superficial con relación al eje vial, se pueden distinguir dos tipos de drenaje:

- 1 Drenaje superficial longitudinal.
- 2 Drenaje superficial transversal.

Drenaje superficial longitudinal.

El sistema de drenaje superficial longitudinal puede quedar conformado por uno o varios de los dispositivos que de acorde a lo estipulado (Benítez, 1986), se enumeran a continuación los que cumplen una específica función para el drenaje rural:

1. Pendientes del pavimento y paseos
2. Cajas tragantes
3. Canales de drenaje
4. Cunetas
5. Alcantarillas (obras de fábrica)
6. Tragantes o sumideros

Pendientes del pavimento y paseos: Las pendientes longitudinales y transversales de las vías deben asegurar el drenaje superficial del agua pluvial, de manera que el espesor de la lámina de agua no rebase el límite a partir del cual los neumáticos pueden disminuir su rozamiento, favoreciendo así al surgimiento del fenómeno conocido por hidrodeshlizamiento.

A medida que la pendiente longitudinal sea la menor posible, dentro de los rangos admisibles, la solución de drenaje será mejor, ya que el bombeo tiene un valor pequeño de pendiente y debe tratarse que este sea mayor o igual que la pendiente longitudinal para que las aguas tiendan a salir más rápidamente de la vía y evitar así el fenómeno de hidrodeshlizamiento.

Las pendientes en la sección transversal a drenar dependen, en primera instancia, del material que constituye el pavimento, de la porosidad y de la resistencia a la erosión, y en segunda instancia, de la categoría de la vía y sus parámetros de diseño. En general, en la medida en que aumenta la calidad, desde el punto de vista impermeabilizante de los materiales utilizados, menor la pendiente de los elementos componentes de la sección transversal de la vía.

A continuación en la tabla 1.1 se indican los valores de pendiente transversal que se recomiendan:

Tabla 1.1: Valores recomendados de pendientes transversales

Para pavimentos de hormigón hidráulico	1-1,5%
Para pavimentos de hormigón asfáltico	2%
Para tratamiento superficial	3%.
Para los paseos	4-6%
Para la superficie de la explanación	≥4%

Cajas tragantes: Se utilizan en tramos de cortes muy largos de vías rurales donde el gasto a evacuar exige el diseño de una cuneta con dimensiones muy grandes resultando peligroso para el tránsito. Estas se pueden encontrar en: en los tramos de vía a media ladera, y en los tramos de vía en corte.

En el primer caso se debe colocar una obra de fábrica menor, conocida como tocola, la cual atravesará parte de la sección transversal de la vía, vertiendo el agua recolectada por el talud del terraplén. En el segundo caso es más difícil, necesariamente se tiene que colocar una tubería colectora debajo de la cuneta hasta la terminación del corte. En ambos casos la caja

tragante es el elemento de transición entre la cuneta y el dren o conducto soterrado utilizado para evacuar el agua (Benítez, 1986).

Canales de drenaje: En zonas de topografía muy accidentada, en ocasiones resulta muy costoso construir las estructuras de drenaje transversal en la vía debido a su frecuencia y pequeño caudal o gasto máximo que escurre.

En estos casos se recomienda unir varias cunetas en una sola para de esta forma reducir el número de estructuras de drenaje transversal a la carretera, cuidando siempre no concentrar en un solo canal de drenaje un gasto demasiado grande ya que esto ocasionará perturbaciones hidráulicas no deseables, además de incrementar el tamaño de la estructura de drenaje transversal hasta hacer más costosa la solución con una estructura que con el grupo de pequeñas estructuras de drenaje presentes en la situación original (Briceño, Yauhari, 2015).

Pendiente del canal: La pendiente longitudinal del canal por lo general está dada por la topografía, para ello debe aplicarse de manera efectiva diferentes procedimientos, porque son necesarios para calcular exitosamente el canal, muchas veces la pendiente depende del objetivo del canal ya que pueden ser para aguas de lluvia, servidas, tratadas, potable entre otros. La pendiente de los taludes laterales de los canales depende del tipo de material, existen tablas que dan valores de pendientes laterales apropiadas para canales construidos en diferentes clases de material. Otros factores que deben considerarse para determinar las pendientes laterales, son el método de construcción, la condición de pérdidas por infiltración, los cambios climáticos, el tamaño del canal, la altura de la terraza, etc. (Briceño, Yauhari, 2015).

Cunetas: Aunque las cunetas son también canales, se acostumbra a denominarlas así por sus pequeñas dimensiones. Estas obras, generalmente paralelas al eje de la vía, tienen la función de recoger y eliminar por gravedad las aguas pluviales que llegan desde la calzada y los taludes de corte. Si además recogen el agua infiltrada en el suelo de cimentación entonces la última capa drenante del pavimento (subbase) deben extenderse hasta los taludes laterales, y el fondo de la cuneta debe estar como mínimo a 0,40 m por debajo de la intersección del nivel inferior de la subbase con el talud, de lo contrario se tratará de una cuneta reducida y el agua que se infiltra se evacua con un drenaje que se denomina dren del firme, según Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, de Perú.

Las cunetas en forma triangular tienen la ventaja de que su forma se aproxima a la de un badén común, por lo que si se amplía la calzada de la carretera hasta incorporar el paseo

entonces, con poco trabajo, se podría transformar la cuneta en un badén. No es aconsejable el empleo de cunetas de sección transversal rectangular porque muy pocas veces conservan sus taludes verticales cuando no están recubiertas artificialmente, además de afectar la seguridad vial, dada la mayor posibilidad de vuelco de un vehículo que caiga accidentalmente en ella.

Es conveniente emplear una sección de cuneta constante, no sólo por la buena apariencia, sino también con el fin de facilitar su construcción y conservación. En cada caso, la sección de cuneta escogida estará en función del gasto de agua a evacuar. Las cunetas pueden estar o no revestidas. La necesidad de revestirlas será mayor donde:

- La velocidad del agua sea elevada o muy baja.
- Se desea evitar las infiltraciones.
- La conservación resulte difícil o costosa.

Cuando la pendiente longitudinal requerida en la cuneta sea muy fuerte otra solución sería construirla en forma escalonada, lo que favorece la disipación de la energía cinética del agua.

De acuerdo al lugar donde se emplace, las cunetas pueden clasificarse como:

- Cuneta lateral en zona del corte.
- Cuneta de protección o de pie de talud.
- Cuneta de guarda o cresta.
- Cuneta en la berma del corte.
- Cuneta en el separador central.
- Cuneta en los paseos.

Alcantarillas: Se define como alcantarilla a la estructura cuya luz sea menor a 6.0 m y su función es evacuar el flujo superficial proveniente de cursos naturales o artificiales que interceptan la carretera.

Según el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, de Perú, la densidad de alcantarillas en un proyecto vial influye directamente en los costos de construcción y de mantenimiento, por ello, es muy importante tener en cuenta la adecuada elección de su ubicación, alineamiento y pendiente, a fin de garantizar el paso libre del flujo que intercepta la carretera, sin que afecte su estabilidad.

La ubicación óptima de las alcantarillas depende de su alineamiento y pendiente, la cual se logra proyectando dicha estructura siguiendo la alineación y pendiente del cauce natural. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el incremento y disminución de la pendiente influye en

la variación de la velocidad de flujo, que a su vez incide en la capacidad de transporte de materiales en suspensión y arrastre de fondo.

En la proyección e instalación de alcantarillas el aspecto técnico debe prevalecer sobre el aspecto económico, es decir que no pueden sacrificarse ciertas características hidráulicas sólo con el objetivo de reducir los costos. Sin embargo, es recomendable que la ubicación, alineamiento y pendiente que se elija para cada caso, estará sujeta al buen juicio del especialista, quien deberá estudiarlos aspectos hidrológicos, hidráulicos, estructurales y fenómenos de geodinámica externa de origen hídrico, para obtener finalmente la solución más adecuada compatible con los costos, operatividad, servicialidad y seguridad de la carretera.

El diseño hidráulico de alcantarillas tiene como objetivo determinar su tipo y dimensiones, de forma tal que pueda evacuar el gasto hidrológico de forma eficiente, segura y económica.

Criterios de diseño, según la NC 733-2009:

- Deberá garantizar durante el tiempo de servicio: seguridad, capacidad de circulación continua, facilidad de inspección y mantenimiento.
- La corriente debe penetrar y salir en el conducto de la alcantarilla en línea recta, los cambios bruscos de dirección disminuye la velocidad de circulación y obliga a emplear conductos de mayor sección.
- Evitar alteraciones en el curso de la corriente o cerca de los extremos del conducto para eliminar derrumbes y remanso.
- Las pendientes de fondo no pueden ser menores del 0,5 %, para evitar el los efectos de sedimentación.

Desde el punto de vista hidráulico pueden presentarse dos casos:

- Alcantarillas con entrada libre.
- Alcantarillas con entrada sumergida.

Los métodos para desarrollar el diseño hidráulico de alcantarillas (Benítez, 2004) se destacan los siguientes:

Para alcantarillas cajón:

- Método de Pérez Franco
- Método de William King
- Método de Ital-Consult

Para alcantarillas de tubos:

- Método de Manning–Kutter
- Método de William King
- Método de Ital-Consult

El método que se empleará en el presente trabajo de diploma corresponde al método Manning-Kutter para secciones tubulares, ya que es uno de los más reconocidos en Cuba, para el diseño hidráulico de alcantarillas de tubo con entrada libre y donde se obtienen diseños racionales. El mismo consiste primeramente en el diseño de las conducciones libres de secciones cerradas llenas y posteriormente se realiza el diseño para sección parcialmente llena. Por lo que las letras minúsculas corresponden al diseño parcialmente lleno y las letras mayúsculas corresponden al diseño lleno.

Las pruebas de laboratorio y observaciones de campo muestran que el flujo en las alcantarillas puede ser de dos tipos:

- 1 Flujo con sección de control a la entrada.
- 2 Flujo con sección de control a la salida.

Alcantarilla funcionando con control a la entrada. Control a la entrada significa que la capacidad hidráulica de la alcantarilla está controlada en la entrada por la carga de agua (HW) y por la geometría de la entrada, incluyendo la forma de la alcantarilla, el área de la sección transversal y la forma de los extremos de la entrada. En este caso la alcantarilla es capaz de conducir más flujo que la entrada aceptaría (Benítez, 1986).

La carga de agua es calculada con respecto a la invertida de entrada, no influyendo la elevación del agua a la salida. Por tanto, la carga de agua es la distancia desde la invertida de entrada a la alcantarilla hasta la línea de energía, línea que se puede asumir que coincide con la superficie del agua.

En una alcantarilla con control a la entrada el flujo es poco profundo y la velocidad es alta.

Alcantarilla funcionando con control a la salida. Las alcantarillas con control a la salida pueden funcionar con flujo llenando toda la alcantarilla o parcialmente. Si la sección se llena con agua en toda la longitud, entonces la alcantarilla funciona llena.

En el funcionamiento de las alcantarillas con control a la salida influyen los factores citados anteriormente, cuando la sección de control es a la entrada, más la rugosidad, el área, forma, longitud y pendiente de la alcantarilla, así como las condiciones a la salida.

La carga de agua es calculada con respecto a la invertida de salida, y la diferencia entre la carga de agua y el nivel del agua a la salida representa la energía que conduce el flujo a través de la alcantarilla.

En una alcantarilla con control a la salida tiene lugar un flujo con profundidades relativamente altas y velocidades bajas.

Tragantes o sumideros: Como complemento de los contenes simples e integrales surgen los sumideros o tragantes, cuyo objetivo es captar el agua pluvial que escurre superficialmente hacia los laterales de la vía o hacia el sistema de drenaje subterráneo que pasa por la vía.

Este elemento de captación se puede clasificar de diversas formas; a saber:

1. Por la **posición** en que son ubicados con respecto al contén cuneta:
 - Lateral con orificio en la pared vertical al borde del contén cuneta (tragante buzón).
 - Horizontal con rejilla ubicada en la canaleta del contén cuneta (tragante rejilla).
 - Mixto con rejilla en canaleta y orificio en pared (tragante rejilla – buzón).
2. Por la **forma geométrica** que presenta en planta: rectangular, cuadrada y circular.
3. Por la **forma que se construyen los depósitos**: decantadores y no decantadores.
4. Por el **tipo de material** constructivo: hormigón armado, bloques o ladrillos.
5. Por el **tipo de construcción**: prefabricado o in situ.
6. Por la **forma que se ubican**: aislados, acoplados, y en batería o continuo.

El tragante rejilla tiene mayor capacidad de captación que el tragante buzón, aunque puede obstruirse más fácilmente. Las barras de las rejillas deben disponerse preferentemente perpendicular a la dirección de la corriente y el ancho de la rejilla debe coincidir aproximadamente con el ancho del contén.

Drenaje superficial transversal.

El drenaje transversal se logra con las alcantarillas, los puentes y otros tipos de obras de fábrica destinadas a reponer los cauces naturales que atraviesan el eje vial (Benítez, 1986).

El drenaje transversal de la carretera tiene como objetivo evacuar adecuadamente el agua superficial que intercepta su infraestructura, la cual discurre por cauces naturales o artificiales, en forma permanente o transitoria, a fin de garantizar su estabilidad y permanencia.

El elemento básico del drenaje transversal se denomina alcantarilla, considerada como una estructura menor, su densidad a lo largo de la carretera resulta importante e incide en los costos, por ello, se debe dar especial atención a su diseño.

Las otras estructuras que forman parte del drenaje transversal son el badén y el puente, siendo éste último de gran importancia, cuyo estudio hidrológico e hidráulico que permite concebir su diseño, tiene características específicas.

El objetivo principal en el diseño hidráulico de una obra de drenaje transversal es determinar la sección hidráulica más adecuada que permita el paso libre del flujo líquido y flujo sólido que eventualmente transportan los cursos naturales y conducirlos adecuadamente, sin causar daño a la carretera y a la propiedad adyacente.

Los puentes son las estructuras mayores que forman parte del drenaje transversal de la carretera y permiten salvar o cruzar un obstáculo natural, el cual puede ser el curso de una quebrada o un río.

En Cuba, se puede apreciar el empleo de sistemas de drenajes compuestos por los aspectos que facilitan e intervienen en el drenaje de determinado vial, tanto rural o urbano, las pendientes, los canales, los tragantes y sumideros, conforman redes para aliviar el drenaje y encauzarlo de manera segura fuera de las vías hasta los puntos de colección.

1.4. Factores de Diseño

En toda obra de drenaje superficial hay tres elementos fundamentales que garantizan su funcionalidad y durabilidad, por lo que definen su proyección; estas son:

- Diseño hidráulico.
- Diseño hidrológico.
- Diseño estructural.

La armonía y la conjugación de estos tres aspectos garantizarán la economía, eficiencia y durabilidad en este tipo de obra. Se señala que solo se tratará lo referente al diseño hidrológico e hidráulico, ya que el diseño estructural no cumplirá como finalidad para el presente trabajo de diploma. Siempre cumpliéndose que:

$Q_{hidrológico} < Q_{hidráulico}$

$Q_{hidrológico}$: gasto o caudal hidrológico; expresado en m^3/s (m^3/seg).

$Q_{hidráulico}$: gasto o caudal hidráulico; expresado en m^3/s (m^3/seg).

De esta expresión parte todo análisis de resultados obtenidos en las investigaciones y estudios de campo realizado con el fin de plantear medidas o soluciones. Se define como **diseño hidráulico** al cálculo del gasto que puede circular por una obra de drenaje superficial, en función de su forma y del material con que está construida. Mientras que el **diseño hidrológico** es el cálculo del gasto que realmente llega a una obra de drenaje superficial, en función del tipo de obra de drenaje y de la categoría de la vía (Benítez, 1986).

Diseño hidráulico

Una vez que la cantidad de agua esperada que alcance determinado punto en el sistema de drenaje es conocida, se está en condiciones de determinar la obra necesaria que adecuada y económicamente acomode el flujo estimado a través de la vida de diseño, sin riesgos irrazonables a la estructura de la carretera y propiedades vecinas.

Diseñar hidráulicamente una conducción libre significa determinar todos los parámetros que acotan sus secciones. Esto depende, entre otros factores, de la profundidad de circulación que se manifieste a lo largo de la obra de drenaje. Dicha profundidad en la mayoría de los casos es diferente a la profundidad normal de circulación, por lo que se impone el análisis y cálculo del perfil del flujo (Delgado, 2006).

La variante definitiva del diseño de una conducción libre será la que además de cumplir con las restricciones establecidas, garantice el mejor funcionamiento hidráulico.

En el caso específico de las alcantarillas el diseño se centra en obtener la profundidad del agua o carga hidráulica a la entrada de la obra de drenaje, la que será comparada con la profundidad permisible para saber hasta qué momento se necesita seguir variando el tipo y las dimensiones de la alcantarilla (Delgado, 2006).

En el drenaje hidráulico un aspecto fundamental a tener en cuenta es el concepto de cunetas el cual fue abordado con anterioridad con mejor especificidad, aunque cabe destacar que consiste, generalmente, en una zanja que corre a uno o a ambos lados del eje de la vía, en dependencia de la configuración que presenta el terreno y de la situación de la rasante con relación al terreno natural, y la obstrucción que pueda presentar en su funcionalidad puede llegar a perjudicar directamente el diseño vial ya que esta consistiría en un agravio directo sobre la condición anteriormente expuesta de que gasto hidrológico tiene que ser menor que el gasto hidráulico (Delgado, 2006).

El diseño geométrico o capacidad hidráulica de las cunetas se determina con la aplicación de la fórmula de Manning para canales abiertos, este tema se ha profundizado en el capítulo 2 con mayor énfasis.

Diseño hidrológico

En la actualidad, se conocen varios métodos cuya finalidad es la de obtener el caudal de diseño para el posterior diseño hidrológico, con el objetivo de drenar adecuadamente las aguas de lluvia, así como el buen funcionamiento de las calles para escurrir el agua superficialmente de manera correcta, es necesario conocer que algunos de estos métodos son menos precisos que otros, pues están principalmente diseñados para distintas condiciones de trabajo, algunos exigen una mayor y detallada información, otros dependen de la geografía en particular, y otros requieren estudios profundos para comprobar su aplicación a condiciones tropicales, etc.

En el mundo actualmente se emplea el método racional para analizar cuencas (tanto rurales como urbanas), pues es universal y se adapta bien en las cuencas menores de 30Km². Es un método empírico, basado en observaciones hidrológicas y en la aplicación de una intensidad de precipitación a la superficie de la cuenca con intervención de un coeficiente de escorrentía estimado, lo que equivale a desprestigiar los caudales no superficiales (Delgado, 2006).

Para determinar los caudales que deben desaguar se han elaborado diferentes metodologías, entre las que se destacan:

- Método racional
- Fórmula de Talbot
- Fórmula de Burkli-Ziegler
- Fórmula de Ital-Consult
- Fórmula de Jaritov-Nazarov
- Fórmula de Alexeiev

En Cuba, este es el método que se emplea para la determinación del caudal de diseño pues tiene las características de ser práctico, lo cual incide en la agilización de los cálculos; brinda buenos resultados para áreas pequeñas (menores de 500 hectáreas); y limita los datos necesarios para la aplicación posterior de modelos de simulación (León, Angulo, 2006).

Batista (1976), ajustó el Método Racional a las características de los ríos cubanos para áreas hidrográficas pequeñas. Es difícil señalar el límite de cuenca pequeña, por esta razón, se ha

considerado arbitrariamente que el algoritmo de cálculo para Cuba resulta aplicable hasta áreas de cuencas hidrográficas de 25 km² aproximadamente (Batista, 2011).

En el Capítulo II, se expondrán algunos de los principales métodos a emplearse para el diseño hidrológico de la región a la que pertenece la zona de estudio, se notificarán brevemente con el propósito de introducir al tema para el posterior análisis de cada uno y la explicación detallada en cuanto a magnitudes correspondientes.

1.5. Evaluación del sistema de drenaje existente

Antes de efectuar la evaluación de las obras de drenaje existentes en cualquier tramo vial a analizar, el Proyectista debe conocer o tomar en cuenta los siguientes parámetros expuestos con el fin de realizar una metodología correcta y hacer uso posteriormente del conocimiento y las normas y regulaciones cubanas para su posterior empleo en una solución factible y efectiva:

1. Nivel de intervención sobre la vía en estudio, tomar en cuenta las conclusiones de los estudios de pre-inversión, para la coherencia del ciclo del proyecto de inversión.
2. Contar con las progresivas del proyecto en campo.
3. La evaluación hidráulica de las estructuras existentes, deberá ser complementada con las evaluaciones de un Especialista en Estructuras y Obras de arte, para las evaluaciones del estado estructural de los elementos de una obra de drenaje existente.
4. El resultado de la evaluación de las obras de drenaje será presentado en fichas técnicas de campo.

La evaluación del comportamiento desde el punto de vista hidráulico estructural de estructuras ubicadas aguas arriba o aguas abajo de la estructura proyectada es de mucha utilidad, porque permite contar con información relevante para lograr diseños adecuados, tomando cuenta su funcionamiento ante la presencia de procesos geomorfológicos como erosión, sedimentación u otros fenómenos, a los que han estado sometidas (Adriani, 2016).

La importancia de este apartado es de bastante interés pues de esta evaluación se podrá determinar la posterior solución a proponer, tanto un rediseño o un plan de mantenimiento. En Cuba, este aspecto no se emplea con la rigurosidad de análisis que conlleva, de ahí la necesidad constante de intervenciones en los viales y en las obras de fábrica correspondientes al mismo, para las condiciones tropicales cubanas es de vital importancia controlar este

aspecto pues el clima lluvioso constantemente afecta las estructuras existentes y los viales se ven afectados además de las cunetas, los tragantes, los paseos, etc., que son parte de los sistemas de drenaje en las distintas zonas.

1.6. Conclusiones parciales.

1. Los sistemas de drenajes conforman una red segura de traslación de las aguas de lluvia que escurren de manera segura por las afueras de las vías, permitiendo no solamente la seguridad de un tráfico vehicular y peatonal continuo y seguro, sino que la incidencia sobre la estructura del vial y las edificaciones aledañas es mínima. A nivel internacional se emplean múltiples medidas para someter esta afectación que propicia las altas precipitaciones, ideas innovadoras, y algunas que presentan sistemas complejos, todos con el fin de controlar el drenaje.
2. La urbanización, las inundaciones y las restricciones del tránsito conforman parámetros individuales e interrelacionados entre ellos que causan los principales puntos de fallo en la funcionalidad de los sistemas de drenaje de determinada zona.
3. Existen dos tipos de drenaje fundamentales a tener en cuenta para el presente trabajo de diploma: el drenaje subterráneo, con menor repercusión para la presente investigación; y el drenaje superficial vial, este se subdivide en drenaje longitudinal y transversal respectivamente. Existen además ciertos elementos estructurales y no estructurales que conforman una vía segura para la traslación de las precipitaciones y el control del drenaje, como son las cunetas, los tragantes o sumideros, los paseos, etc.
4. En toda obra de drenaje superficial hay tres elementos fundamentales que garantizan su funcionalidad y durabilidad, por lo que definen su proyección: el diseño hidrológico, el diseño hidráulico y el diseño estructural, este último no cumplirá función en este estudio vigente. Para el diseño hidráulico que se tendrá en cuenta se realizará el análisis mediante la fórmula de Manning-Kutter para canales abiertos y obras de fábrica de tubos; y para el diseño hidrológico se realizará el análisis mediante el método racional, y el empleo de las fórmulas que plantean Burkli-Ziegel, Ital-Consult, Jaritov-Nazarov, y el Alexeiev, respectivamente.

CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DE LOS MÉTODOS Y METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE Y ANÁLISIS DE CUENCAS HIDROLÓGICAS.

Este capítulo contará con el desarrollo de los distintos métodos a emplear para el análisis de las cuencas hidrológicas de la zona de estudio, comprendida una longitud de un kilómetros de vía a analizar, además de los coeficientes y tablas que intervienen en cada uno de los métodos, para aplicarlo en el caso específico vigente bajo las condiciones de un país tropical como Cuba.

Antes del desarrollo de este cabe destacar ciertos conceptos que son claves a tener en cuenta, debido al lenguaje técnico empleado, y la mejor comprensión de los métodos mostrados.

Las tablas, gráficos y ábacos que intervienen en los métodos hidrológicos e hidráulicos para el análisis de las cuencas se tendrán disponibles en los anexos adjuntos al presente trabajo de diploma al final del mismo.

2.1. Conceptos básicos.

Los conceptos posteriormente mostrados conforman una base de conocimientos para facilitar la comprensión de los métodos y aspectos que intervienen en las metodologías expuestas. Estos conceptos fueron tomados de la Cartilla para el Drenaje Vial, Conceptos básicos para el diseñador geométrico (2012).

Cuenca hidrográfica o cuenca de drenaje: De un río o corriente de agua en consideración, es el área topográfica limitada por un contorno al interior del cual las aguas lluvias que caen drenan hacia el mismo punto, ya sea de salida o de interés particular.

Área de la cuenca: Es el área plana (proyección horizontal limitada por la línea imaginaria llamada divisoria de aguas).

Capacidad hidráulica: La eficacia en la evacuación o drenaje de agua de una estructura de drenaje, medida en volumen por unidad de tiempo.

Caudal de diseño: El caudal para el que una estructura de drenaje se construye sin que se excedan o subestimen los criterios de diseño previamente considerados.

Escorrentía: Cantidad de agua superficial producida por una lluvia, su valor se obtiene de restar del volumen de la lluvia las pérdidas por infiltración, almacenamiento, evaporación y transpiración.

Coeficiente de Escorrentía (C): Relaciona el volumen total de agua precipitada con el volumen de escorrentía producido después de descontar las pérdidas por almacenamiento, retención e infiltración; es propio de cada cuenca y depende de la morfometría de ella, del tipo de suelo, la cobertura y la condición de humedad antecedente.

Intensidad de Lluvia: Definida como la intensidad promedio que se asume, cae uniformemente sobre una cuenca para una duración y frecuencia (período de retorno) dadas.

Frecuencia: Es la mayor o menor ocurrencia con una lluvia de determinada duración e intensidad puede repetirse. Así, si durante 50 años se presenta una lluvia con una intensidad tal que es igualada o excedida diez veces, esa lluvia tendrá una frecuencia de 5 años.

Periodo de retorno (TR): Es definido como el promedio de años entre los cuales ocurre un evento hidrológico (lluvia, caudal, etc.) de una magnitud específica.

Tiempo de concentración (Tr): Se define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca, y se determina mediante formulaciones experimentales.

2.2. Diseño hidrológico

Para determinar los caudales a desaguar se ha elaborado diferentes metodologías, entre las que se destacan, por ser los métodos más generalizados son:

- El método Racional.
- La fórmula de Burkli-Ziegler.
- La fórmula de Ital-Consult.
- La fórmula de Jaritov-Nazarov.
- El método de Alexeiev.

Para el caso específico que se plantea en el presente trabajo de diploma, se analizarán las diferentes metodologías anteriormente expuestas para posteriormente auxiliando las distintas metodologías con tablas y gráficos, para realizar un análisis general de todos los métodos y posteriormente escoger los que cumplan con la mayor precisión y adaptabilidad a las condiciones cubanas.

Primeramente se debe partir de la condición a cumplir en la cual, se plantea:

$$Q_{hidrológico} \leq Q_{hidráulico} \quad (2.1)$$

A partir de esta condición es que se comienza con el análisis mediante los distintos métodos de cálculos, que se plantearán a continuación.

Método racional

El método racional es universal y se adapta bien en las cuencas menores de 30Km². Es un método empírico, basado en observaciones hidrológicas y en la aplicación de una intensidad de precipitación a la superficie de la cuenca con intervención de un coeficiente de escorrentía estimado, lo que equivale a desprestigiar los caudales no superficiales. En cuencas grandes estos métodos pierden su precisión.

Ha sido recomendado para cuencas menores a 1 000 hectáreas, pero se reportan casos de aplicación a cuencas del orden de 30 000 hectáreas. Este método establece que el caudal máximo es proporcional a la lluvia de diseño y al tamaño de la cuenca aportante.

La gran ventaja de éste método es su simplicidad, lo que se traduce en que el resultado es fácilmente controlable en función de las variables observables, de tal forma que ha sido muy utilizado como método de comparación de resultados. Independientemente del empleo de otros procedimientos más sofisticados se recomienda siempre comparar los resultados con los que entrega el método racional.

A pesar de la aparente facilidad y simplicidad del método, la determinación adecuada del coeficiente de escurrimiento y de la intensidad de la lluvia de diseño, implica un cuidadoso y juicioso análisis en cada caso, aunque los demás métodos también han tenido su aplicación en Cuba a pesar de que el racional sea el más empleado en la actualidad.

Metodología a emplear

La fórmula desarrollada por este método es la siguiente:

$$Q_{1\%} = 16.67 * C * I * A \quad (2.2)$$

Donde:

Q- caudal o gasto máximo previsible en la sección de desagüe en estudio para el 1% de probabilidad; en m³/s.

C- coeficiente de escorrentía de la cuenca.

I- intensidad de lluvia máxima permisible para un período de retorno dado; en mm/min.

A- superficie de la cuenca aportante; en km².

La norma cubana NC 48-26:84 calcula directamente el gasto para la probabilidad de diseño que se desee. Según Benítez (1986), primeramente se calcula el gasto para el 1% de probabilidad; si se quiere llevar a otra probabilidad en dependencia del tipo de obra de drenaje y categoría de la vía, hay que multiplicar el gasto calculado para el 1% de probabilidad por diferentes coeficientes.

Para las áreas urbanizadas el por ciento de probabilidad de la precipitación se establece en las tablas en los anexos finales, y de igual manera la tabla que nos brinda valores para cuencas que se conservan rurales o no afectadas en su totalidad por el crecimiento urbano.

1. Cálculo del coeficiente de escorrentía (C)

Para la determinación del coeficiente de escorrentía, se proponen los valores mostrados en los anexos.

Si la cuenca aportadora está compuesta por zonas con diferentes características de suelo, vegetación y pendientes; se debe determinar un coeficiente de escorrentía ponderado:

$$C_p = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2 + C_3 \cdot A_3 + \dots + C_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (2.3)$$

Donde

C_p- coeficiente de escorrentía ponderado.

C₁, C₂, C₃,.....C_n- coeficientes de escorrentía de cada zona en particular.

A₁, A₂, A₃,.....A_n- áreas de las zonas correspondientes.

Los valores del coeficiente parcial de escurrimiento (C_i) que se deben adoptar, según la NC 48-26:84 los valores que se deben adoptar en zonas de cuencas urbanizadas o por urbanizar se establecen en los anexos.

Aunque cabe destacar que algunos de los expertos en el tema de hidrología sugieren realizar el análisis para el mayor valor de escorrentía, por tanto se asume un valor más crítico.

2. Cálculo de la intensidad de lluvia (I)

Para determinar la intensidad de lluvia, es necesario calcular su duración, conocida con el nombre de tiempo de concentración y la frecuencia que le corresponde según el período de retorno fijado en el proyecto.

El tiempo de concentración, es el tiempo que demora el agua en correr desde el punto más alejado de la cuenca hasta llegar a la obra de drenaje superficial.

- En zonas de cuencas no afectadas por el crecimiento urbano el tiempo de concentración se determina por la siguiente expresión:

$$Tr = 0.483 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64} \quad (2.4.a)$$

Donde

Tr - tiempo de concentración; en min.

L - longitud del cauce principal; en m.

S - pendiente media del cauce; en %.

- En zonas de cuencas urbanizadas o por urbanizar el tiempo de concentración se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$Tr = 0.02 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (2.4.b)$$

Donde:

Tr- tiempo de concentración; en min

L - longitud de la corriente predominante; en m

H - desnivel de la corriente predominante; en m

El período de retorno, se define como el tiempo en años en que se producirá una lluvia de intensidad mayor o igual que la utilizada en la fórmula del método racional. El período de retorno depende directamente de la importancia económica de la obra, del peligro que puede ocasionar su no funcionamiento correcto a los habitantes de la zona y del tipo de vía. En las tablas en los anexos, se muestran los diferentes períodos de retorno.

Para calcular la intensidad de lluvia se pueden seguir dos procedimientos de trabajo. En el primero se hace uso del mapa isoyético de Berdó de las precipitaciones máximas diarias para el 1% de probabilidad, con el objetivo de determinar el parámetro HP (precipitación). En las figuras (en los Anexos) se muestra el mapa isoyético de Berdó.

Con este parámetro HP, y con el tiempo de concentración T_r , se determina la intensidad de lluvia (I).

En el segundo método se hace uso de las curvas de intensidad-frecuencia-duración, correspondiente a la zona de ubicación de la obra de drenaje, determinándose la intensidad de lluvia para la probabilidad de diseño que se quiera según el tipo de obra de drenaje y la categoría de la vía. En los anexos finales se muestra una curva intensidad-frecuencia-duración.

3. Cálculo del caudal máximo o gasto hidrológico

Si se calculan los gastos para el 1% de probabilidad utilizando el mapa isoyético de Berdó, en dependencia del período de retorno (TR) habrá que multiplicar este gasto por los coeficientes mostrados en los anexos finales.

Si se calculan los gastos utilizando las curvas intensidad-frecuencia-duración, el cálculo de la intensidad ya contempla la probabilidad de diseño. El área de la cuenca aportadora se mide, bien sobre el terreno o sobre los mapas de anteproyecto.

Benítez (1986) presenta otra forma para determinar el tiempo de concentración empleando el ábaco de los anexos. Con la longitud del cauce principal en metros, se corta verticalmente la línea correspondiente a la pendiente media del cauce que corresponde y desde esta intersección se traza una horizontal hasta cortar el eje vertical, que representa el tiempo de concentración en minutos.

En las zonas urbanizadas, se incrementará el tiempo de concentración al comienzo de la línea colectora, con el denominado tiempo de recorrido (10 min).

En resumen, el método racional se adapta bien en las cuencas menores de 30 Km², brindando resultados seguros y económicos, además de brindar comodidad en la aplicación de la metodología en la descrita.

➤ Fórmula de Burkli-Ziegel

El método de Burkli-Ziegel, resuelve el cálculo del gasto hidrológico de una forma sencilla y cómoda, sin embargo, debe realizarse un serio estudio para que se adapte a las condiciones cubanas ya que fue deducido hace muchos años para otras circunstancias. Esta fórmula es adecuada para superficies superiores a 200 hectáreas.

El método fue aplicado de forma experimental en la provincia de Santiago de Cuba, se empleó para determinar el gasto de una cuenca ubicada en el perímetro de un pluviógrafo, donde se obtuvo el resultado de forma sencilla y rápida. (Delgado, 2006).

La fórmula que plantea este método obedece a la siguiente expresión:

$$Q = 0.022 * C * A * h * \sqrt[4]{\frac{S}{A}} \quad (2.5)$$

Donde

Q - gasto o caudal; en m³/s

S - pendiente media de la cuenca aportadora; en m/Km.

A - área de la cuenca aportadora; en ha.

h - precipitación en cm/hora correspondiente al aguacero más intenso de 10min de duración total.

C - coeficiente que depende de la clase de terreno que conforma la cuenca.

En los anexos se pueden obtener los gastos en m³/s para una precipitación pluvial de 10cm/hora. Para otra precipitación distinta de ésta, se aumentará o disminuirá la descarga hallada en la tabla en la proporción necesaria. Así por ejemplo, en una zona donde la precipitación es de 20 cm/hora se usará el doble de las cifras dadas.

Se pueden también obtener los valores de esta fórmula en el nomograma en los anexos, que da la solución gráfica para áreas de cuencas de hasta 10000 ha, con pendientes de 1-400 ‰. La descarga que se obtiene es para valores de h de 1cm/hora y C = 1.

En este nomograma se entra con el valor del área en ha y se sube verticalmente hasta interceptar la línea de pendiente que interesa (m/Km) y luego se traza una horizontal desde el punto de intersección hasta la línea de descarga, leyendo el valor del gasto en m³/s.

En el caso de tener otros valores diferentes de h y C, tómesese un valor de descarga proporcional, el cual se aplicará multiplicando estos valores de h y de C por el valor de descarga hallado para C =1 y h = 1cm/hora.

➤ **Fórmula de Itai-Consult**

La fórmula de Itai-Consult ha sido utilizada para determinar el gasto máximo de los proyectos de obras de fábrica en la Autopista Nacional y, sobre todo, en las provincias orientales de nuestro país (Delgado, 2006).

Para determinar el gasto de diseño, el método de Itai-Consult plantea que:

$$Q \text{ (máx.)} = \frac{C \cdot A \cdot h}{T_r} \quad (2.6)$$

Donde

Q (máx.) - gasto máximo extrapolado en las curvas intensidad-frecuencia-duración, para períodos de retorno de 10, 25, 50, y 100 años; en dependencia de la categoría de la vía; en m³/s.

h - altura de la precipitación de duración igual al tiempo de concentración y de período de retorno fijado en el proyecto; en m.

T_r - tiempo de concentración; en segundos.

C - coeficiente de escurrimiento. Se recomienda tomar un valor de 0.8 para pendiente promedio de 3% e incluso mayores.

A - superficie de la cuenca aportadora; en m².

En este método, el tiempo de concentración se calcula por la expresión:

$$T_r = 0.0195 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (2.7)$$

Donde:

T_r - es el tiempo de concentración, que en esta fórmula da en minutos; por lo que hay que llevarlo a segundos para el cálculo del gasto.

L - longitud del cauce principal; en m.

S - pendiente promedio del cauce principal; en m/m.

➤ **Fórmula de Jaritov-Nazarov**

Para la determinación del gasto este método plantea la fórmula:

$$Q_p = A * q * K * p * \frac{HP}{350} \quad (2.8)$$

(Q se expresa en m³/s, y A en km²)

Donde

q - módulo del gasto; en m³/s km²

P - probabilidad de diseño

K - coeficiente de forma del hidrógrafo

HP - Se utiliza el mapa isoyético de Trusov; en mm

Al seguir el contorno de la corriente con el compás de punta seca, se obtiene una longitud que no coincide con la real, debido a que los cauces tienen forma sinuosa. De ahí la necesidad de afectar L por un factor que tenga en cuenta estas irregularidades. Los valores que se adoptan son:

f = 1,03 para cauces muy sinuosos

f = 1,02 para cauces menos sinuosos

Por lo que la longitud corregida del cauce será:

$$L' = f * L \quad (2.9)$$

Donde

L y L' se expresan en Km

- La pendiente media del cauce principal (Y) se determina por la relación del desnivel altimétrico entre el punto más alto del cauce principal y el cierre de cálculo, entre la longitud L' del río.

- Los coeficientes de escurrimiento mostrados en las tablas en los anexos y los coeficientes mostrados en las tablas son los recomendados por Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles y por el Ministerio de Obras Públicas de Venezuela, respectivamente.
- Para determinar el módulo del gasto se propone la siguiente expresión:

$$q = \frac{262 \times C}{\left[\left(\frac{4,39 \times L'}{Y^{0,25}} \right) + 6 \right]^{0,57}} \quad (2.10)$$

Donde

Y - pendiente media del cauce principal; en m/m

C - coeficiente de escurrimiento

q - módulo del gasto; m³/s km²

El valor de q depende de C, L' y Y. Una vez conocidos estos valores, se puede determinar por la vía analítica o empleando un ábaco (Hernández Hernández y Lazo Varela, 1988), que se muestra en la figura correspondiente de los anexos.

La forma de proceder con este gráfico es la siguiente:

1. Se entra con los valores de L' en Km y se intercepta la curva correspondiente a la pendiente media del cauce principal, que en este gráfico está expresada en ‰.
2. Por este punto se traza una línea horizontal hasta cortar la línea vertical correspondiente al coeficiente de escurrimiento adoptado.
3. Se traza a continuación una paralela a las líneas inclinadas y se determina el módulo del gasto q.

Para calcular el coeficiente de forma del hidrógrafo (K), se utiliza la expresión:

$$K = \frac{1}{0,33 + 0,25 \left[2 \left(0,5 \times L' \times \sqrt{A} + 1 \right)^{0,07} - 1 \right]} \quad (2.11)$$

Donde

L' y A se expresan en Km y en Km², respectivamente.

También puede determinarse el coeficiente de forma del hidrógrafo mediante el ábaco que se encuentra en la Figura 2.5; conocidos L' y A.

Para determinar HP se utiliza el mapa isoyético de Trusov (Hernández Hernández y Lazo Varela, 1988) que se muestra en la Figura 2.6.

Este monograma está confeccionado para una precipitación (HP) igual a 350mm (precipitación máxima diaria). Es por ello que el gasto de diseño debe ser afectado por el factor HP/350 cuando no es igual a 350mm.

Con este procedimiento es posible determinar el gasto para el 1% de probabilidad:

$$Q_{1\%} = A * q * k * \frac{HP}{350} \quad (2.12)$$

Si se desea determinar el gasto para otra probabilidad distinta, hay que multiplicar la expresión anterior por el coeficiente p correspondiente.

Este método se utiliza en cuencas mayores que 30Km². Se recomienda que toda la metodología se organice en forma de tabla para facilitar y agilizar el trabajo.

➤ **Método de Alexeiev**

La fórmula que utiliza este método es la siguiente:

$$Q_p = M_a * A(1\%) * p \quad (2.13)$$

(Q se expresa en m³/s)

Donde

M- módulo auxiliar de escurrimiento; en m³/s/km²

A (1%) - área condicional de la cuenca; en km²

p - coeficiente que indica la probabilidad de diseño

La forma de determinar cada uno de estos parámetros es la siguiente:

- Para el parámetro $A(1\%)$, es necesario conocer primeramente el parámetro hidrometeorológico principal $ZL(\%)$, el cual depende de A y Y_1 - pendiente media de las laderas en ‰, que se determina por la expresión:

$$Y_1 = \frac{\sum L \times H}{A} \times h \quad (2.14)$$

(A se expresa en Km^2)

Donde

$\sum L \times H$ - suma de las longitudes de todas las curvas de nivel dentro de la cuenca; en Km

h - equidistancia entre las curvas de nivel; en m

Se debe señalar que las longitudes de las curvas de nivel se miden sobre el mapa topográfico. En regiones montañosas, donde las curvas de nivel son muchas y muy pegadas unas de las otras, no se miden todas las curvas, sino cada dos-cinco curvas de nivel; al mismo tiempo se aumenta en dos-cinco veces el valor de la equidistancia h .

Conocidos A y Y_1 (‰), hay que determinar en cuáles de los siguientes casos se cumple que:

- a) caso de $A < 30\text{Km}^2$ y $Y_1 < 10\%$. En este caso, el parámetro $ZL(1\%)$ se determina por:

$$ZL(1\%) = HP(1\%) * C$$

Donde

$HP(1\%)$ se determina en el mapa isoyético de Berdó.

- b) caso de $A \geq 30\text{km}^2$ y $Y_1 \geq 10\%$.

En este caso se determina $ZL(1\%)$ según Hernández Hernández y Lazo Varela (1988), haciendo uso de la tabla 2.11 (en los Anexos).

Una vez determinado para el caso específico en que se encuentra, se procede a determinar el área condicional de la cuenca según la expresión:

$$A(1\%) = A \times \frac{ZL(1\%)}{100} \quad (2.15)$$

(A se expresa en Km²)

El segundo parámetro que aparece en la fórmula general del gasto (Ma) se determina de la forma siguiente:

Se halla el parámetro hidromorfométrico de las laderas (El), o sea, el tiempo de retardo en las mismas.

$$El = \frac{L_c}{al \times \sqrt{Y_1 \times ZL(1\%)}} \quad (2.16)$$

(Y1 se expresa en %, y El en min)

Donde

Lc- longitud media de las laderas de la cuenca, la cual se determina por la expresión:

$$Lc = \frac{1000}{1,8 * p} \quad (2.17)$$

Donde

p- coeficiente de densidad de la red fluvial, el cual a su vez depende de la expresión:

$$p = \frac{L' + \sum L_i}{A} \quad (2.18)$$

Donde

L'- longitud del cauce principal; en Km²

∑ L_i - suma de todos los afluentes de corrientes periódicas y no periódicas; en Km

A- área de la cuenca; en Km²

Si se sustituye la expresión 2.18 en la expresión 2.17, se obtiene:

$$L_c = \frac{555 \times A}{L' + \sum L_i} \quad (2.19)$$

Donde

L' y $\sum L_i$ están en Km

L_c está en m

El valor de 1,8 de la ecuación 2.16 considera la afluencia del agua bilateral a la pendiente de la línea de afluencia de las laderas. En el caso de curvas de nivel paralelas a la vía principal y sin vegetación, la longitud media de las laderas se determina por la expresión:

$$L_c = \frac{1000 * A}{0,9 * L'} \quad (2.20)$$

La longitud de todas las corrientes y áreas de la cuenca se determina sobre el mapa topográfico.

Hernández Hernández y Lazo Varela (1988) establecen los valores del coeficiente de rugosidad de las laderas (α) que aparece en la expresión 2.15, los cuales aparecen reflejados en la tabla 2.12.

En este método, también es necesario determinar el parámetro hidromorfométrico de la cuenca principal (EL). Para ello, es necesario conocer el caso específico de que se trata:

a) caso en que $S \geq 2\%$

Donde

S - pendiente media del río. Si este es el caso, el parámetro hidromorfométrico de la cuenca se determina por la expresión:

$$EL = \frac{98 \times L'}{S^{0.14} \times A(1\%)^{0.25}} \quad (2.21)$$

Donde:

L' - longitud del cauce principal; en m

A (1%) - área condicional de la cuenca; en Km²

S - pendiente media del río; en %

EL - parámetro hidromorfométrico de la cuenca; en min

c) caso en que S < 2%

La expresión a utilizar es:

$$EL = \frac{16.67 \times L'}{al \times S^3 \times A(1\%)^{0.25}} \quad (2.22)$$

EL, L', S y A (1%) tienen las mismas dimensiones que las utilizadas en la expresión anterior.

Conocidos el parámetro hidromorfométrico de las laderas (El) y el parámetro hidromorfométrico de la cuenca (EL), se determina el módulo auxiliar de escurrimiento (Ma) utilizando la figura 2.7 (Hernández Hernández y Lazo Varela, 1988).

Conocidos A (1%) y Ma, es posible determinar el gasto para el 1% de probabilidad:

$$Q (1\%) = Ma * A(1\%) \quad (2.23)$$

Si se quiere determinar el gasto para otra probabilidad de diseño, habrá que multiplicar la expresión anterior por el factor p correspondiente.

Este método es muy engorroso. La exactitud de los resultados depende de la calidad y minuciosidad del estudio topográfico; la mayoría de los parámetros que intervienen en las fórmulas se obtienen a partir del mapa topográfico de la zona de estudio.

2.3. Diseño hidráulico

El cálculo hidráulico considerado para establecer las dimensiones mínimas de la sección para las alcantarillas a proyectarse, es lo establecido por la fórmula de Robert Manning para canales abiertos y tuberías, por ser el procedimiento más utilizado y de fácil aplicación, la cual permite

obtener la velocidad del flujo y caudal para una condición de régimen uniforme. Este método puede ser aplicado además para el diseño hidráulico de cunetas y sumideros o tragantes.

Cunetas

El diseño geométrico o capacidad hidráulica de las cunetas se determina con la aplicación de la fórmula de Manning para canales abiertos:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * s^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

Donde:

Q = gasto o caudal en m³/s.

n = coeficiente de rugosidad del cauce.

A = área de la sección de la corriente, en m²

R = S/P radio hidráulico, en m.

P = perímetro mojado correspondiente al tramo elegido para el máximo nivel de agua, en m.

S = pendiente longitudinal de la cuneta, en tanto por uno.

Para evitar que el agua que recogen las cunetas se infiltre en la explanación, se proponen las siguientes pendientes longitudinales mínimas:

- Cunetas revestidas 0,2%

- Cunetas sin revestir 0,5%

De ser posible se utilizará como pendiente longitudinal mínima el 1%, tanto para las revestidas como las sin revestir. Esta especificación tiene como objetivo evitar la deposición de materiales que vienen mezclados con las aguas. Existe una pendiente longitudinal máxima, la que depende del tipo de material con que se construye la cuneta, que evita la erosión.

La función principal de las cunetas es eliminar lo más rápidamente posible el agua que corre por ellas, aunque existe una velocidad máxima de circulación que no ocasiona erosión y que depende del tipo de material utilizado en su construcción (NC 48-26:84).

Para la determinación del coeficiente de rugosidad se proponen los valores mostrados en la Tabla que son función del tipo de revestimiento. En cuanto a esta tabla se debe señalar la

necesidad de tomar las medidas y realizar las investigaciones necesarias, para determinar los coeficientes de rugosidad en nuestras condiciones concretas, ya que estos fueron tomados de las normas españolas de carreteras.

En nuestro país, con relación al coeficiente de rugosidad se plantea que:

$$\frac{1}{n} = K = 66,7 \text{ para cunetas revestidas}$$

$$\frac{1}{n} = K = 25 \text{ para cunetas no revestidas}$$

$$\frac{1}{n} = K = 10 \text{ para cunetas con hierba}$$

Como se observa, no se tiene en cuenta cual es el tipo de revestimiento o el tipo de suelo que conforma la cuneta.

La fórmula de Manning puede ser resuelta mediante gráficos (Benítez, 1986) desarrollados al efecto. En estos gráficos la forma de las cunetas, el tipo de revestimiento, la pendiente longitudinal de la cuneta y la altura de la lámina de agua son datos que impone el proyectista. Además en el eje de las abscisas de estos gráficos aparece la velocidad con que circula el agua en la cuneta, la cual debe ser chequeada con la velocidad máxima de circulación y con la velocidad mínima de circulación.

Es necesario aclarar que pudieran existir varias secciones transversales que sean capaces de evacuar el gasto hidrológico, el proyectista debe encargarse de evaluar aspectos como: pendientes transversales, altura de la lámina de agua y otros para decidirse por la más racional. Además, debe chequear la velocidad con que circula el agua en la cuneta que se obtiene en el eje de las abscisas, con la velocidad máxima y mínima de circulación (Benítez, 1986)

La forma de utilizar los gráficos (ver en los Anexos) es la siguiente:

- Proposición de la sección transversal de la cuneta, con lo cual se conoce el tipo de gráfico que se va a utilizar.
- Conocida la pendiente longitudinal de la cuneta y la altura de la lámina de agua propuesta por el proyectista, se interceptan estas dos curvas.

- A partir del punto de intersección se determina sobre el eje de las ordenadas el gasto que es capaz de evacuar la cuneta (l/s) y en el eje de las abscisas, su velocidad de circulación (m/s).

Esta operación se realiza para el par de ejes de coordenadas que corresponda según el coeficiente de rugosidad de la cuneta.

Este gasto hidráulico debe ser comparado con el gasto hidrológico, y por lo tanto debe cumplir con la condición **A.1**, anteriormente expresada.

Además debe chequearse las velocidades de circulación y compararlas con la velocidad máxima y mínima.

Este método es ampliamente utilizado en el ámbito internacional y en Cuba está normado para diferentes secciones transversales, ya sean triangulares o trapezoidales. Se utiliza la metodología expuesta anteriormente por ser la que se encuentra vigente y permitir la obtención de diseños racionales y económicos, además de ser simple su solución.

Sumideros o tragantes

Objetivo de estas obras de drenaje, captar el agua superficial y eliminarla hacia los laterales de la vía o hacia el sistema de drenaje subterráneo que pasa por la vía. Se proyectan de tres tipos:

- Sumideros laterales.
- Sumideros horizontales.
- Sumideros mixtos.

El diseño hidráulico de los sumideros puede estimarse en dependencia del tipo propuesto; así, para los laterales la expresión utilizada es:

$$Q = 0,00383 * H^{3/2} * L \quad (2.25)$$

Donde:

Q- gasto que es capaz de evacuar el sumidero lateral; en l/s.

H- profundidad de la lámina de agua propuesta por el proyectista; en cm.

L- longitud del sumidero; en cm.

Para los sumideros horizontales, si la profundidad de la lámina de agua es inferior a 12cm, el diseño hidráulico vendrá dado por la expresión:

$$Q = 0,0164 * H^{3/2} * P \quad (2.26.a)$$

Donde

Q - gasto que es capaz de evacuar el sumidero horizontal; en l/s.

H - profundidad de la lámina de agua propuesta por el proyectista; en cm.

P – perímetro de la abertura efectiva del sumidero; en cm.

Si la profundidad de la lámina es superior a 40 cm, la fórmula utilizada es:

$$Q = 0,0296 * A * \sqrt{H} \quad (2.26.b)$$

Donde

Q - gasto que es capaz de evacuar el sumidero horizontal; en l/s.

A - área efectiva del sumidero; en cm²

H - profundidad de la lámina de agua propuesta por el proyectista; en cm.

Cuando la profundidad de la lámina de agua está comprendida entre 12 - 40cm, se tomará el menor de los dos valores obtenidos de la evaluación de las fórmulas (2.25.a y 2.25.b), para trabajar del lado de la seguridad.

En el caso de sumideros mixtos se determina separadamente la de cada uno de los tipos que lo constituyen, como se fueran dos sumideros, uno a continuación del otro.

En general la capacidad de los sumideros depende de su espaciamiento, el que a su vez es función de la profundidad de la lámina de agua.

El espaciamiento entre sumideros se fija de forma tal que su capacidad iguale el caudal que a él va a afluir. Esta distancia fluctúa generalmente entre 25-50m, aunque puede determinarse mediante el cálculo su verdadero espaciamiento.

Si en un tramo de vía se quiere determinar el espaciamiento entre sumideros y el número necesario de ellos, se procede de la forma siguiente:

Q hidrológico – n * Q sumideros = 0

$$n = \frac{Q \text{ hidrológico}}{Q \text{ sumideros}} \quad (2.27)$$

Donde:

Q hidrológico – gasto que llega a la obra de drenaje; m³/s.

Q sumideros – gasto que es capaz de evacuar el sumidero; m³/s.

n – número de sumideros necesarios en el tramo en estudio.

Para conocer el espaciamiento que se debe considerar entre los tragantes, la fórmula a proceder es:

$$\text{Espaciamiento} = \frac{\text{longitud del tramo}}{n} \quad (2.28)$$

Metodología a emplear para el diseño de obras de fábrica (sección tubular).

Primeramente partiendo asumiendo un valor de eficiencia del 85 %; pues se debe comenzar el tanteo suponiendo un valor de eficiencia mayor al 75 %.

1. Con la relación d/D; en Curvas Características (Anexos) con $N/n = \text{variable}$ y relación q/Q , se determina la relación q/Q .

Luego usando despeje en la relación obtenida se procede determina $Q = q/\text{Numero}$.

2. Para estas condiciones entrando en el Nomograma de Kutter (Anexos), obtenemos que la tubería deba tener un diámetro interno mayor al que resulta posterior al análisis (analizando los tubos que se fabrican en nuestro país).

Por ejemplo: $D = 910 \text{ mm}$ En Nomograma de Kutter con $S = 0.01 \text{ m/m}$ y $Q = 1,70 \text{ m}^3/\text{s}$

$D = 910 \text{ mm} \approx 1000 \text{ mm}$ (diámetro constructivo inmediato superior)

Por lo que se utilizará el tubo de diámetro 1000 mm.

$Q = 2,10 \text{ m}^3/\text{s}$ En Nomograma de Kutter con $S = 0.01 \text{ m/m}$ y $D = 1000 \text{ mm}$

3. Luego se procede a determinar el gasto máximo a sección parcialmente llena, mediante la fórmula:

$q_{m\acute{a}x} = 1,08 * Q$, Para una relación de $N/n = variable$ y $d/D =$ Numero

$q_{m\acute{a}x} \geq Q_{hidrol\acute{o}gico}$, se procede a comparar y si es mayor o iguala es un resultado satisfactorio.

4. Diseño a sección parcialmente llena:

Mediante el siguiente ejemplo se analizara el procedimiento a realizar.

Eficiencia: $q/Q = 1,70/2,10 = 0,81 = 81 \%$

$d/D = 0,75 \geq 0.7$. En Curvas Características con $N/n = variable$ y relación $q/Q = 0,81$

Se determina la altura libre (HL):

La profundidad a la cual circula el gasto de diseño en la tubería se obtiene mediante la relación $d/D = 0,75$

$$d = 0,75 * 1000 = 750 \text{ mm}$$

La altura libre real será:

$$HLR = D - d = 1000 - 750 = 250 \text{ mm}$$

La misma debe compararse con la especificación siguiente:

$$HL_{calculada} = 0,25 * D = 250 \text{ mm} ; \text{ Con } D < 3 \text{ m}$$

$$HLR = 250 \text{ mm} = HL_{calculada} = 250 \text{ mm}; \text{ Ok.}$$

Chequeo de la velocidad de circulación:

$v/V = 0.99$ En Curvas Características con $N/n = variable$ y relación v/V con $d/D = 0.75$

- $V = 2,45 \text{ m/s}$ En Nomograma de Kutter con $S = 0.01 \text{ m/m}$ y $D = 1000 \text{ mm}$
- $v = 0.99 * 2,45 = 2,43 \text{ m/s}$
- $0.25 \text{ m/s} < v = 2,45 \text{ m/s} < 4.5 \text{ m/s}$; Ok. Cumple con lo establecido en la NC 48-26:84.

2.4. Conclusiones parciales

1. El diseño hidrológico empleado para la presente investigación consta de la aplicación de los métodos de análisis de cuencas hidrológicas previamente expuestos como son el método Racional, el Ital-Consult, el Burkli-Ziegel, el Jaritov-Nazarov y el Alexeiev. A continuación se muestra en una tabla resumen los aspectos principales de cada uno de los métodos.

Tabla 2.1: Resumen de las ventajas y desventajas de cada método.

Métodos	Ventajas	Desventajas
Racional	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Universal ➤ Cuencas $\leq 30\text{km}^2$ ➤ Simplicidad de cálculos ➤ La NC 48-26:84 establece su uso 	
Burkli-Ziegel	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sencillo y cómodo para trabajar ➤ Superficies ≥ 200 ha 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Realización de estudios serios para la adaptación a las condiciones cubanas
Ital-Consult	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Altos coeficientes de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diseños antieconómicos
Jaritov-Nazarov	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cuencas $\geq 30\text{km}^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Empleo de tablas para trabajar de manera organizada y metódica
Alexeiev		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Desarrollo engorroso de su metodología ➤ La exactitud de sus resultados depende de la calidad y minuciosidad del estudio topográfico

2. La selección de los métodos empleados para su posterior empleo, comparación de resultados y finalmente el uso de uno de ellos para el diseño de variantes de soluciones, está dado en gran medida a sus ventajas por tanto, se empleará el método racional como comparativo, y la fórmula del Burkli-Ziegel y el Ital-Consult, respectivamente.
3. El diseño hidráulico se empleará en el diseño de cunetas, tragantes o sumideros, para el diseño y chequeo de las obras de fábrica de sección tubular, mediante el método de Manning-Kutter en el caso de las cunetas para canales abiertos.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE.

El desarrollo de este capítulo es crucial para el arribo de conclusiones y resultados lógicos con el fin de proponer medidas estructurales o no estructurales, a la investigación llevada a cabo en este trabajo de diploma. Se mostrará el análisis de las cuencas tributarias y gastos máximos para las condiciones más críticas de intensidad de lluvia. Se concluirá con las variantes para las medidas a proponer, con la justificación correspondiente para cada caso específico, suponiendo que este así lo requiera.

3.1. Características hidrológicas e hidráulicas actuales de la zona de estudio.

Para el análisis correspondiente y la aplicación de estos métodos se tomará un tramo de vía de 1,00 km aproximadamente, comprendido entre la entrada de la Escuela Vocacional Ernesto Guevara y la entrada correspondiente a la Escuela de Formación de Profesores de Educación Física y Deportes “Manuel Fajardo Rivero”, mostrada en la imagen 3.1., la vista en planta del tramo.

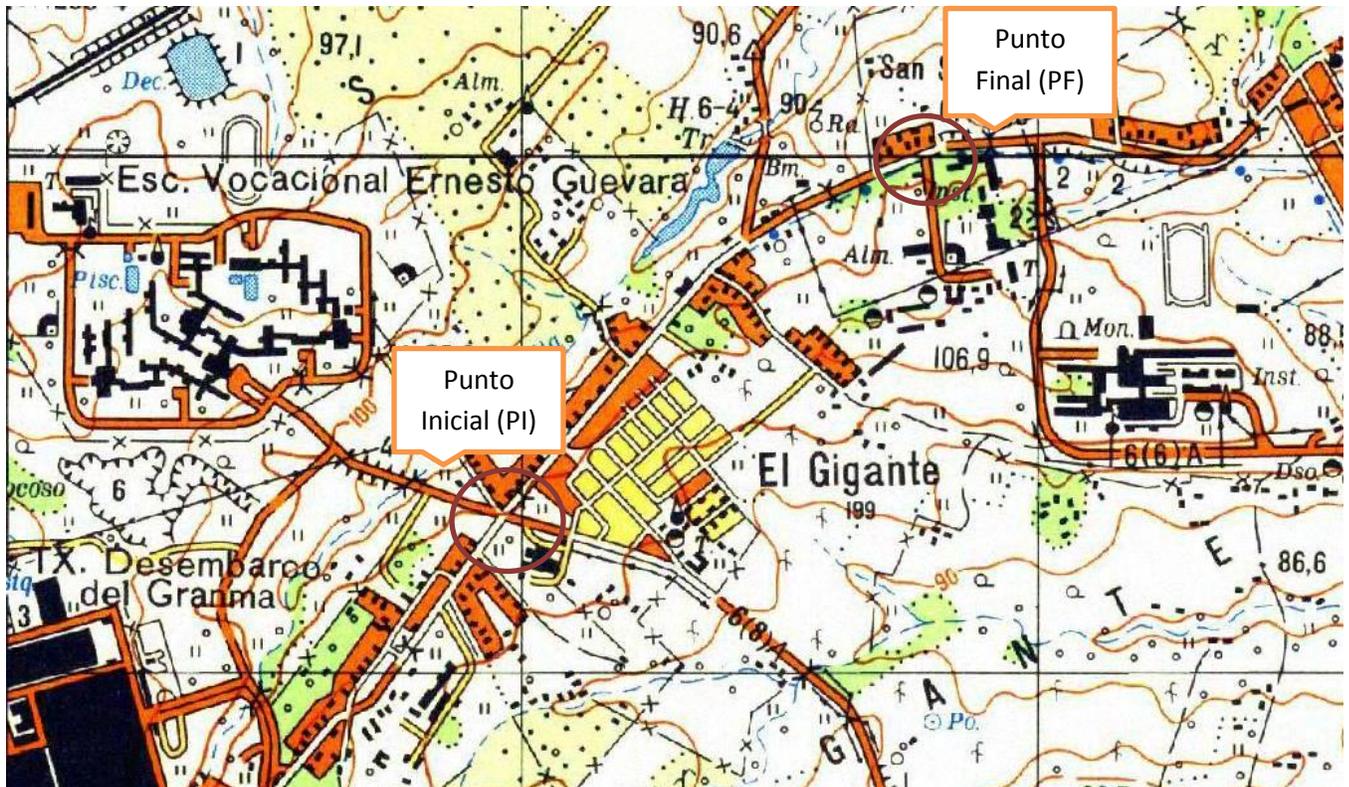


Imagen 3.1: Vista en planta de “El Gigante”.

A continuación se mostrarán las principales afectaciones que se presentan en el tramo de vía correspondiente a la zona de estudio, donde se mostraran imágenes de las condiciones del terreno antes de la incidencia de las precipitaciones y en algunos casos después de sucedido demostrando la poca calidad del sistema de drenaje existente.

3.1.1. Afectaciones actuales existentes en el tramo de vía comprendido

Realizado el trabajo de campo, en este punto de la investigación se mostrarán imágenes reales de las afectaciones actuales que sufren las condiciones dispuestas para el drenaje natural del terreno, las cuales se predisponen con intensidades de lluvia leves en muchas ocasiones.

1. Cuneta en condiciones normales

Las imágenes 3.2, 3.3 y 3.4 muestran las condiciones de las cunetas antes de la incidencia de las lluvias.



Imagen 3.2



Imagen 3.3



Imagen 3.4

Nota: Las cunetas presentan malas condiciones para el correcto drene de las aguas de lluvia que circulan; presentando características en la que presentan alto nivel de hierba espesa y pasto, dificultando la función de algunas atajeas ubicadas en la zona.

Variante de solución: Eliminar la maleza y el pasto mediante mano de obra. Reapertura de las cunetas dependiendo de las especificaciones.

2. Cuneta en condiciones críticas

Las imágenes 3.5 y 3.6, muestran el estado de las cunetas y las atajeas tras la incidencia de las lluvias constantes.



Imagen 3.5



Imagen 3.6

Nota: Esta es una muestra de las condiciones que presentan las cunetas después de las constantes precipitaciones en la zona; apreciable el mal funcionamiento para el drenaje a efectuar.

Variante de solución: Eliminar la maleza y el pasto mediante mano de obra. Reapertura de las cunetas dependiendo de las especificaciones. Eliminar obstáculos dentro de los tubos bajo las atajeas y limpieza de los mismos.

3. Paseos

La imagen 3.7 denota el estado de los paseos paralelos al tramo tras la lluvia.



Imagen 3.7

Nota: Los paseos correspondientes al vial presentan tramos donde se nota el acumulamiento de manera inconveniente del agua de lluvia.

4. Alcantarillas (obras de fábrica, tipo cajón)

Obras de Fábrica

Cantidad de obras de fábrica (OF) menores: 3

La OF 1, se localiza a 5,00m del PI (Punto inicial) denotado en el vial, esta obra de fábrica no fue representada en la carta topográfica, suponiendo que su diseño fue posterior a la representación en el plano de la zona (**Imagen 3.8**)

La OF 2, ubicada en sentido de Escuela Vocacional hacia el Instituto Politécnico, a 510,00 m del PI (**Imagen 3.9**)

La OF 3, se ubica a 880,00 m del PI (**Imagen 3.10**)

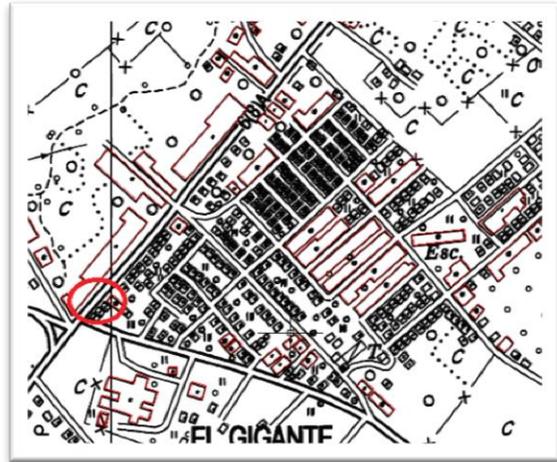


Imagen 3.8: Vista en planta de la OF 1. Dimensiones 2,00 x2,00 m. El círculo rojo representa donde se encuentra ubicada en el tramo. Para el caso específico de esta alcantarilla se puede apreciar que su eficiencia para drenar los caudales que le llegan a su entrada es inferior al 50 %.

Para esta obra de fábrica se propone que se le realice el mantenimiento correspondiente, de manera que la misma recupere su funcionalidad y pueda emplearse en el desagüe del vial que le tributa el tramo crítico.

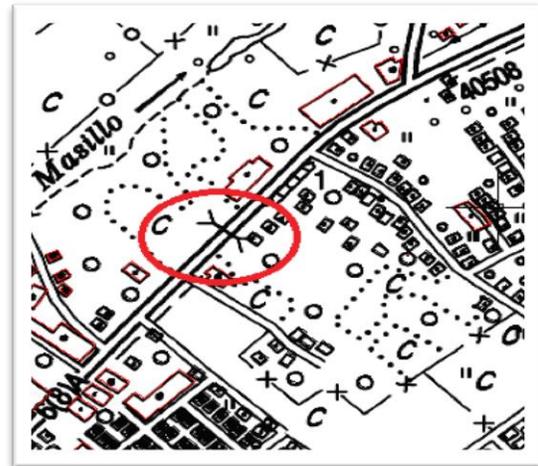
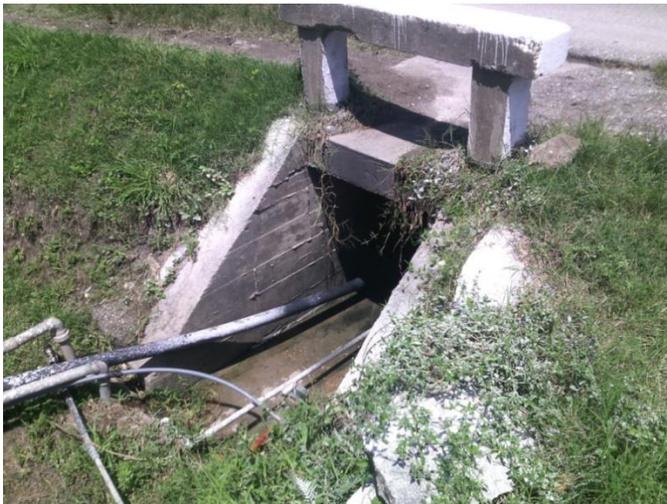


Imagen 3.9: Vista en planta de la OF 2. Dimensiones 1,00x1,00m.



Imagen 3.10: Vista en planta de la OF 3. Dimensiones 2,00x2,00m.

Las OF 2 y 3 funcionan como sistema de captación de las escorrentías para el área rural que tributa al vial principal.

- ❖ Cuenta con cunetas a ambos lados del vial en tramos alternados, exceptuando el tramo desde el PI hasta 220,00 m aproximadamente, correspondiente al tramo crítico de la vía, que a simple vista se aprecia la falta de cunetas o cualquier sistema de drenaje funcional.

El tramo crítico del vial, al que corresponde la mayor afectación al drenaje, tiene una longitud de 400,00 m, desde el PI. El mismo no cuenta con ninguna obra de captación de aguas superficiales, y vía subterránea no se tiene registros de este tipo de sistema de drenaje en la zona. Este tramo de vía no cuenta con cunetas hasta los 220,00 m aproximadamente.

La sección transversal de todas las cunetas no pudieron ser medidas con exactitud en algunas partes del terreno debido a su mal estado, a causa de la alteración que han sufrido con el desgaste ocasionado por los caudales que le incurren, además del nivel de pasto y malezas que a simple vista denotan su ineficiencia a un correcto drene y traslación de las precipitaciones a través de su sección transversal.

3.1.2. Datos del tramo de la zona de estudio

Los datos mostrados a continuación fueron recopilados mediante análisis computacional de cartas topográficas 1:10 000 de la zona con la herramienta Autocad, además de emplear cartas topográficas en papel con igual escala, y corregidos mediante recopilación visual en el trabajo de campo.

Datos generales

- Área de la zona urbana: $54\,750\text{ m}^2 = 5,50\text{ ha}$
- Área de la zona rural: $148\,750\text{ m}^2 = 14,90\text{ ha}$
- Desnivel (de la cota más alta a la cota más baja en el terreno)

CMA = 106,90 m

CMB = 94,00 m

Desnivel = 12,90 m

Áreas de las cuencas

Para un análisis más detallado del drenaje en la zona de estudio, se procederá a considerar dos áreas de cuencas, debido a que cada una de ellas corresponderá a ser analizadas como independientes pues, el coeficiente de escurrimiento es afectado de manera muy variable si se analiza que la parte del vial donde mayor se notará la afectación por inundación corresponde a la zona con mayor desarrollo urbanístico dentro de la zona, debido a la impermeabilización y baja porosidad que presenta el suelo en toda el área delimitada, lo que incide directamente en las velocidades con las que se trasladan las aguas de lluvia y propicia el lento drene pluvial.

$A_1 = 54\,750\text{ m}^2 = 5,50\text{ ha}$

$A_2 = 148\,750\text{ m}^2 = 14,90\text{ ha}$

El A_1 correspondiente al área más urbanizada dentro de los límites de la zona, cabe enfatizar el hecho de delimitar esta cuenca tributaria debido al coeficiente de escorrentía que presenta la zona, y tomando en consideración de que la inclinación o pendiente acotada del punto más alto al de cota más baja es de 12% aproximadamente, además de que esta cuenca urbana no tributa directamente a una obra de fábrica, y las obras de drenaje como cunetas no trabajan a su mayor capacidad (Imagen 3.11).

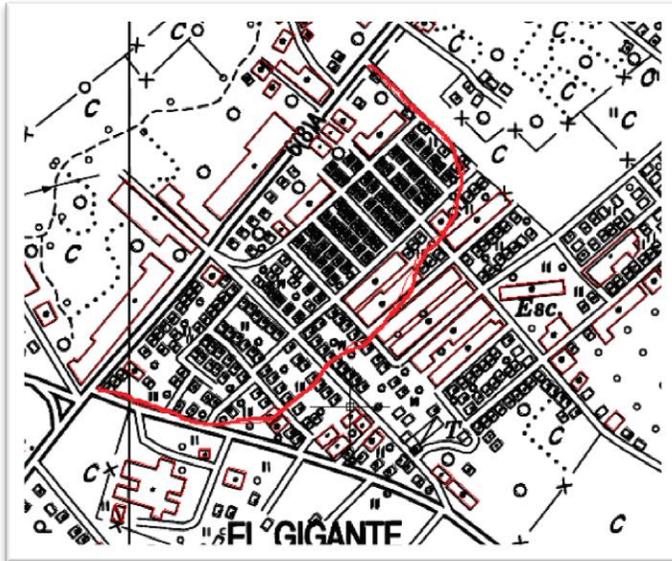


Imagen 3.11: Vista en planta del área de la cuenca urbana (A_1).

El A_2 que tributa como un área de cuenca rural, el análisis que se ha de llevar a cabo debe tenerse en cuenta que si comprende dos obras de fábrica menor que capta la escorrentía que se le deposita, pese a ser un área mayor con respecto a la urbana el drenaje es más efectivo pues contando con un suelo más poroso, permeable, permite la filtración al terreno y por tanto las velocidades de las aguas de lluvia no propician en gran medida el estancamiento en áreas determinadas que afecten el tránsito de los vehículos por el vial (Imagen 3.12. y 3.13.).

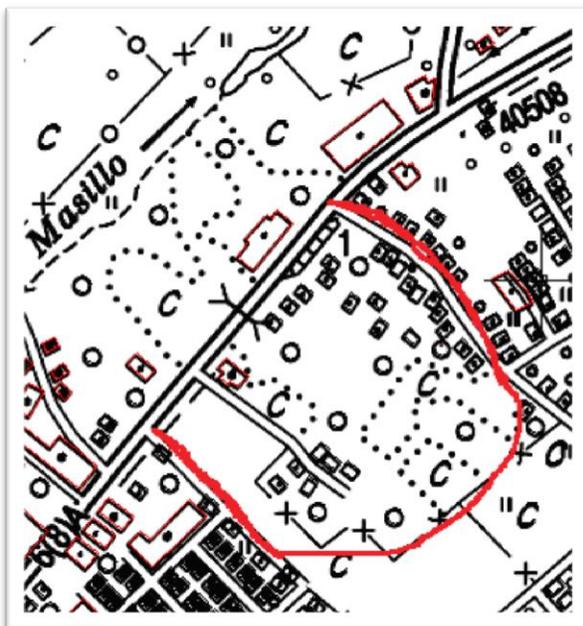


Imagen 3.12: Vista en planta del área de la cuenca rural (A_2) tributaria a la OF 2.



Imagen 3.13: Vista en planta del área de la cuenca rural (A_2) tributaria a la OF 3.

3.2. Análisis hidrológico de las cuencas aportantes.

A continuación se procederá a calcular mediante los métodos para el análisis de cuencas hidrológicas y diseño de obras de fábrica, expuestos anteriormente en el Capítulo II, los caudales máximos o gasto hidrológicos (Q), que será necesario evacuar mediante las obras de drenaje, aspecto que se complementará con un análisis hidráulico posterior.

Para el análisis de las cuencas tributantes a las varias obras de fábrica, cabe destacar que la OF 1, no cumple función como sistema de captación de drenaje, pues su ubicación se encuentra por encima del punto de cota más bajo en el tramo del vial. Además cumple con la función de aliviar el flujo pluvial que le escurre por la vía perpendicular a ella y que se prolonga hasta la Escuela Vocacional.

El área de la cuenca rural se dividirá en dos, cada una correspondiente a la obra de fábrica que tributa. Destacando que solamente se dividirá en dos áreas, pero las características de cada una de ellas, con respecto al tipo de suelo, longitud del cauce predominante, etc., no variarán. Además, estas para el tramo que tributa el vial cuenta con cunetas y paseos (en mal estado,

pero esto se analizará el punto 3.3. del presente Trabajo de diploma), que permiten el drene hacia las obras de fábrica correspondientes.

El A_2 , correspondiente a la segunda obra de fábrica (OF 2).

El A_3 , correspondiente a la tercera obra de fábrica (OF 3).

- **Método racional**

- 1. Área de la cuenca**

$$A_1 = 54\,750 \text{ m}^2 = 0,05 \text{ km}^2$$

$$A_2 = 32\,550 \text{ m}^2 = 0,033 \text{ km}^2$$

$$A_3 = 116\,000 \text{ m}^2 = 0,116 \text{ km}^2$$

- 2. Coeficiente de escurrimiento (C)**

Para analizar esta parte, se considerarán los coeficientes de escurrimiento mostrados en las tablas correspondientes en los anexos.

- ❖ **Cuenca urbana (A_1)**

Tributa a un tramo de vía = 400,00 m

CMA = 103,00 m

CMB = 97,00 m

Desnivel = 6,00 m

Pendiente (S) = 0,059 m/m = 5,9 %

Para esta área se procederá al análisis mediante las tablas correspondientes, ya que las demás no acaparan las características del caso particular.

$C = 0,70$ (Zona sin vegetación, impermeable, pendiente de 5,9 %)

$C = 0,65$ (Áreas de pendiente moderada con zonas de aproximadamente 50 % impermeables)

Valor para incluir en la fórmula de esorrentía $C = 0,70$.

- **Cuenca rural (A_2 y A_3)**

Tributa a un tramo de vía = 200 m (A_2)

Tributa a un tramo de vía = 400 m (A_3)

CMA = 106,90 m

CMB = 94,00 m

Desnivel = 12,90 m

Pendiente (S) = 0,12 m/m = 12,0 %

Para esta área se procederá también al análisis mediante la tabla correspondiente.

C = 0,47 (Zona de pastos o vegetación ligera, semipermeable, pendiente de 12,0 %)

3. Intensidad máxima de lluvia (I)

Para determinar la intensidad de lluvia, es necesario calcular su duración, conocida con el nombre de tiempo de concentración (T_r) y la frecuencia que le corresponde según el período de retorno fijado en el proyecto.

Tabla 3.1: Valores de HP. Registros de los últimos 12 años

año/meses	HP máx.
2004	215,3
2005	296,0
2006	464,6
2007	334,1
2008	414,7
2009	335,0
2010	337,2
2011	354,4
2012	420,0
2013	392,4
2014	299,3
2015	354,6
2016	358,7

La presente tabla corresponde al registro de precipitaciones anuales, tomados desde el centro de estudios meteorológicos perteneciente a la Universidad Central de “Las Villas”, “Las Antillas”. Esta tabla nos muestra un registro de los valores más intensos de las precipitaciones comprendido en un intervalo de un año natural, lo que demuestra que el mapa isoyético de Berdó es un recurso que muestra valores obsoletos, si se refiere a los meses del año más críticos.

La zona central de Cuba, el término de HP es de 350 mm, sin embargo los valores registrados promedian un valor un tanto mayor de 380 mm, por lo que se asumirá que para los próximos 10 años estos incrementarán. En los anexos se mostrará la tabla completa de los registros acumulados de precipitación anual para los años comprendidos entre 2004 y 2016.

Por tanto, para el cálculo de I se asumirá HP = 450 mm, tomando como consideración el valor de acumulado anual en el año 2006, el cual es apreciablemente mayor.

❖ **Cuenca urbana (A₁)**

Para la cuenca correspondiente al área A₁, se procederá a calcular Tr por la siguiente fórmula, pues tiene como característica ser una zona de cuenca urbanizada o por urbanizar.

$$Tr = 0,02 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} = 0,02 * \left(\frac{890^3}{6}\right)^{0.385} = 19,10 \text{ min}$$

Por ciento de probabilidad de precipitación a adoptar = 20 %

Este valor para las particularidades de la urbanización conformada por zonas de viviendas de uniplanta.

Con el parámetro HP = 450 mm, y con el tiempo de concentración Tr = 19,10 min, se determina en la figura para la intensidad de lluvia (I).

Valor de Intensidad de lluvia (I) = 5,30 mm/min

❖ **Cuenca rural (A₂ y A₃)**

Para la cuenca correspondiente al área A₂ y A₃, se procederá a calcular Tr por la siguiente fórmula, para zonas de cuencas no afectadas por el crecimiento urbano

$$Tr = 0.483 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64} = 0.483 * \left(\frac{520}{\sqrt{12}}\right)^{0.64} = 11,90 \text{ min}$$

Con el parámetro HP = 450 mm, y con el tiempo de concentración Tr = 11,90 min, se determina en la figura para la intensidad de lluvia (I), véase en los Anexos.

Valor de Intensidad de lluvia (I) = 6,50 mm/min

4. Cálculo del gasto hidrológico o caudal máximo (Q)

Para determinar el gasto hidrológico que tributa al vial, mediante el análisis que propicia el método racional, se obtendrá el resultado por la fórmula siguiente.

❖ Cuenca urbana (A₁)

$$Q_{1\%} = 16.67 \cdot C \cdot I \cdot A = 16,67 \cdot 0,70 \cdot 5,30 \text{ mm/m} \cdot 0,055 \text{ km}^2 = 3,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

❖ Cuenca rural (A₂)

$$Q_{1\%} = 16.67 \cdot C \cdot I \cdot A = 16,67 \cdot 0,47 \cdot 6,50 \text{ mm/min} \cdot 0,033 \text{ km}^2 = 1,68 \text{ m}^3/\text{s}$$

❖ Cuenca rural (A₃)

$$Q_{1\%} = 16.67 \cdot C \cdot I \cdot A = 16,67 \cdot 0,47 \cdot 6,50 \text{ mm/min} \cdot 0,116 \text{ km}^2 = 5,91 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con este mismo proceder se realizarán los siguientes métodos a emplear, los cuales servirán de comparación con los resultados obtenidos en el método racional. Los métodos a comparar serán mediante la fórmula de Burkli-Ziegel y la del Ital-Consult, por su metodología sencilla y práctica.

Resumen de los valores obtenidos de caudales (Q)

A continuación se muestran tabulados los valores obtenidos para cada método de análisis de cuencas y diseño de obras de fábrica. Las normas cubanas NC 48-26:84 y NC 48-31:84 por lo general calculan el gasto para el 1% de probabilidad. Si se quiere llevar a la probabilidad en dependencia del tipo de obra de drenaje y categoría de la vía que se tiene o se desea diseñar, habrá que multiplicar los gastos calculados para el 1% de probabilidad por los coeficientes mostrados en la tabla indicada en los anexos.

Para este caso los valores obtenidos se transformarán para una probabilidad de diseño de 10%, pues es una carretera principal.

Tabla 3.2: Tabla resumen de los resultados obtenidos

Método	A (m ²)	HP (mm)	L (m)	S (m/m)	C	Q (1%) (m ³ /s)	Q (10%) (m ³ /s)	
Racional	54 750	450	400	0,059	0,7	3,09	1,32	
	32 550		200			1,68	0,72	
	116 000		400	0,12	0,47	5,91	2,54	
Burkli- Ziegel	54 750		400	0,059	0,75	3,30	1,42	
	32 550		200			0,89	0,38	
	116 000		400	0,12	0,25	2,29	0,98	
Ital-Consult	54 750		400	0,059		0,8	0,2	0,08
	32 550		200		0,32		0,14	
	116 000		400	0,12	1,24		0,53	

En resumen, el método racional brinda resultados más confiables que los métodos restantes, pues su aplicación se adapta mejor a las condiciones de la zona de estudio ya que ninguna de las dos áreas tributarias supera las 200 ha, y este método en particular brinda resultados muy confiables cuando se refiere a cuencas pequeñas menores de las 1000 ha. Además, en Cuba siempre que el área de la cuenca sea menor de 30 km² (3000 ha) se debe emplear este método, como establece la NC 48-26:84. Este método brinda la posibilidad de obtener gastos menores y, por lo tanto, un diseño más económico, que es prioritario para este caso.

3.3. Análisis hidráulico.

Para cumplir con la condición de diseño **Q hidrológico < Q hidráulico**, es necesario realizar un análisis de los caudales permisibles a escurrir mediante las cunetas y como punto de colección las obras de fábrica de cajón o alcantarillas anteriormente mostradas en las imágenes 3.9 y 3.10. Para el caso del tramo de vial al que tributa el caudal correspondiente al área de la cuenca A₁, se analizará para una propuesta de sumideros o tragantes, acompañada de una línea conductora capaz de sostener un flujo continuo a través del diámetro propuesto.

Para el desarrollo de este punto se plantea la siguiente metodología:

1. Revisión de las obras de drenaje existentes para el tramo de vía correspondiente, mediante los siguientes pasos:
 - Chequeo hidráulico de las cunetas para la sección transversal estimada en el campo.

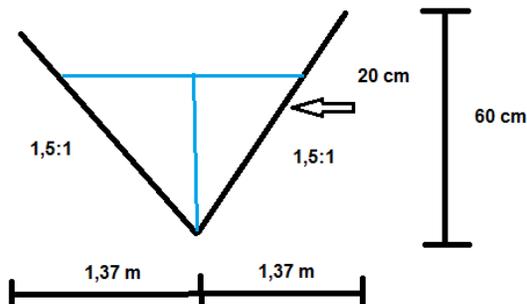
- Diseño nuevo de las cunetas para las condiciones que se desea que trabajen.
 - Chequeo de la condición **Q hidrológico < Q hidráulico**.
2. Propuesta de sumideros para el tramo de vía crítico correspondiente al área urbana. Se establece para este punto de análisis una secuencia a llevar a cabo:
 - Selección del tipo de tragante o sumidero a emplear.
 - Diseño de la capacidad hidráulica para el tipo de tragante seleccionado.
 - Determinar el número de tragantes a emplear para el tramo de vía y la separación entre ellos, además establecer la ubicación para su colocación.
 3. Propuesta para el diseño del tubo conductor de las aguas pluviales.
 - Proponer un diámetro capaz de evacuar los caudales que soportarán el sistema de tragantes propuesto.
 - Chequear la capacidad hidráulica efectiva para permitir el flujo continuo a través del diámetro propuesto.

3.2.1. Diseño hidráulico de cunetas

Calculando el gasto hidráulico correspondiente para la sección transversal triangular que se muestra y una altura de la lámina del agua de 20 cm, propuesta por el proyectista, con relación de talud 1,5:1, se aplicará la fórmula de Manning para canales abiertos.

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

Chequeo hidráulico de las cunetas para la sección transversal estimada en el campo.



Datos generales para ambos tramos

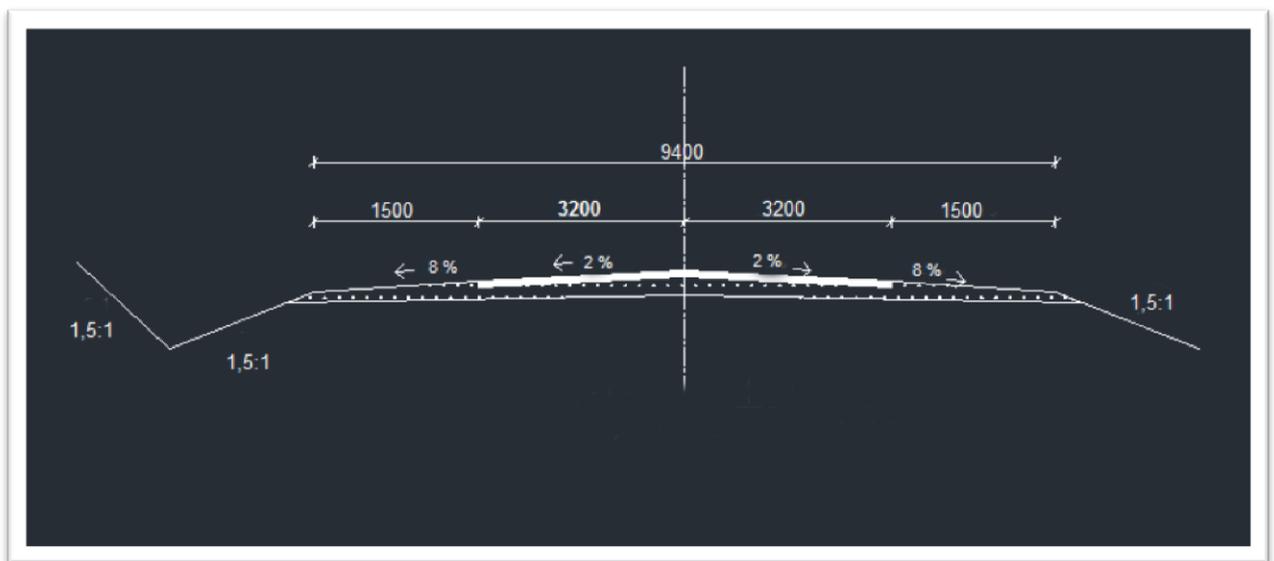
$n = 0,04$ (valor del coeficiente de rugosidad para hierba con $h \geq 15$ cm)

$h = 20$ cm (altura de la lámina de agua propuesta por el proyectista)

Relación de taludes 1,5:1

$P = 1,00$ m (perímetro mojado para la altura de la lámina de agua propuesta)

1. Análisis hidrológico para las condiciones existentes en el tramo



Vista del perfil transversal del vial principal.

• Cuenca rural (A_2)

Longitud del tramo = 200 m

$S = 2\%$ (diferencia entre las cotas comprendidas en el tramo)

Tipo de material de la sección	n	h (m)	A (m^2)	P (m)	$R^{2/3}$	\sqrt{S}	Q (l/s)
Hierba con lámina > 15 cm	0,04	0,20	0,045	1,00	0,126	0,1414	20,0

$$V \text{ calculada} = \frac{0,02 \text{ m}^3/\text{s}}{0,045 \text{ m}^2} = 0,44 \text{ m/s}$$

Convirtiendo el caudal de la cuenca rural aportante y adicionándole el caudal que aporta el vial

$$Q_{\text{total}} = Q(A_2) + Q_{\text{vial}}$$

Q vial – caudal que aporta el vial (3,20 m), los paseos (1,50 m).

$$Q(A_2) = 0,72 \text{ m}^3/\text{s} = 720 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{total}} = 720 \text{ l/s} + 92 \text{ l/s} = 812 \text{ l/s} \text{ (gasto hidrológico)}$$

- Chequeo de la condición **Q hidrológico < Q hidráulico**

$$Q_{\text{hidrológico}} = 812 \text{ l/s} > Q_{\text{hidráulico}} = 20 \text{ l/s}$$

Como se puede apreciar no satisface con la condición de diseño requerida por tanto se analizará una propuesta funcional.

- **Cuenca rural (A₃)**

Longitud del tramo = 400 m

S = 4 % (diferencia entre las cotas comprendidas en el tramo)

Tipo de material de la sección	n	h (m)	A (m ²)	P (m)	R ^{2/3}	√S	Q (l/s)
Hierba con lámina > 15 cm	0,04	0,20	0,045	1,00	0,126	0,20	28,4

$$V_{\text{calculada}} = \frac{0,0284 \text{ m}^3/\text{s}}{0,045 \text{ m}^2} = 0,63 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{máx.}} = 1,80 \text{ m/s}$$

Convirtiendo el caudal de la cuenca rural aportante y adicionándole el caudal que aporta el vial

$$Q_{\text{total}} = Q(A_3) + Q_{\text{vial}}$$

Q vial – caudal que aporta el vial (3,20 m), los paseos (1,50 m).

$$Q(A_3) = 2,54 \text{ m}^3/\text{s} = 2540 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{total}} = 2540 \text{ l/s} + 180 \text{ l/s} = 2720 \text{ l/s} \text{ (gasto hidrológico)}$$

- Chequeo de la condición **Q hidrológico < Q hidráulico**

Q hidrológico = 2720 l/s > Q hidráulico = 28,4 l/s

Como se puede apreciar tampoco satisface con la condición de diseño requerida por tanto se analizará una propuesta funcional.

2. Propuesta de diseño para las cunetas existentes en el tramo

Para que las cunetas correspondientes ubicadas al lado derecho del vial puedan evacuar de manera segura y correcta permitiendo un flujo continuo sin estancarse, se propone una variación de las condiciones existentes en el diseño previo, dependiendo de las condiciones del terreno.

Chequeando mediante las tablas para el cálculo hidráulico de cunetas (véase los Anexos), y proponiendo la capacidad hidráulica para cada tramo respectivamente.

- **Cuenca rural (A₂)**

Longitud del tramo = 200 m

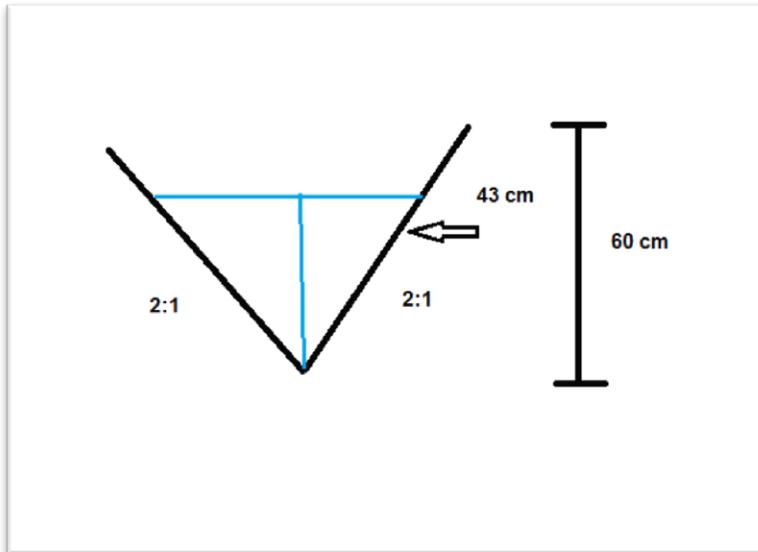
S = 2 % (diferencia entre las cotas comprendidas en el tramo)

n = 0,02 (coeficiente de rugosidad para tierra ordinaria con superficie ordinaria)

h = 43 cm (interpolando en la tabla)

Relación de taludes 2:1

Q hidráulico = 900 l/s (necesariamente superior al gasto hidrológico)



- Chequeo de la condición **Q hidrológico < Q hidráulico**

Q hidrológico = 812 l/s < Q hidráulico = 900 l/s

Esta propuesta satisface la condición de diseño requerida.

V estimada = 2,30 m/s (tabla para el cálculo hidráulico de cunetas)

- **Cuenca rural (A₃)**

Longitud del tramo = 400 m

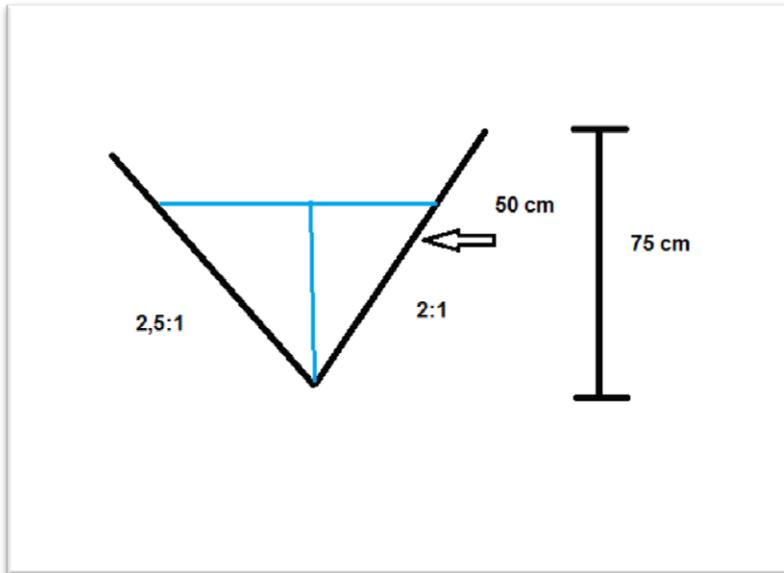
S = 4 % (diferencia entre las cotas comprendidas en el tramo)

n = 0,02 (coeficiente de rugosidad para tierra ordinaria con superficie ordinaria)

h = 50 cm

Relación de taludes 2:1/2,5:1

Tipo de material de la sección	n	h (m)	A (m ²)	P (m)	R ^{2/3}	√S	Q (l/s)
Tierra ordinaria en condiciones ordinarias	0,02	0,50	0,7025	2,99	0,381	0,20	3020



- Chequeo de la condición **Q hidrológico < Q hidráulico**

Q hidrológico = 2720 l/s < Q hidráulico = 3020 l/s

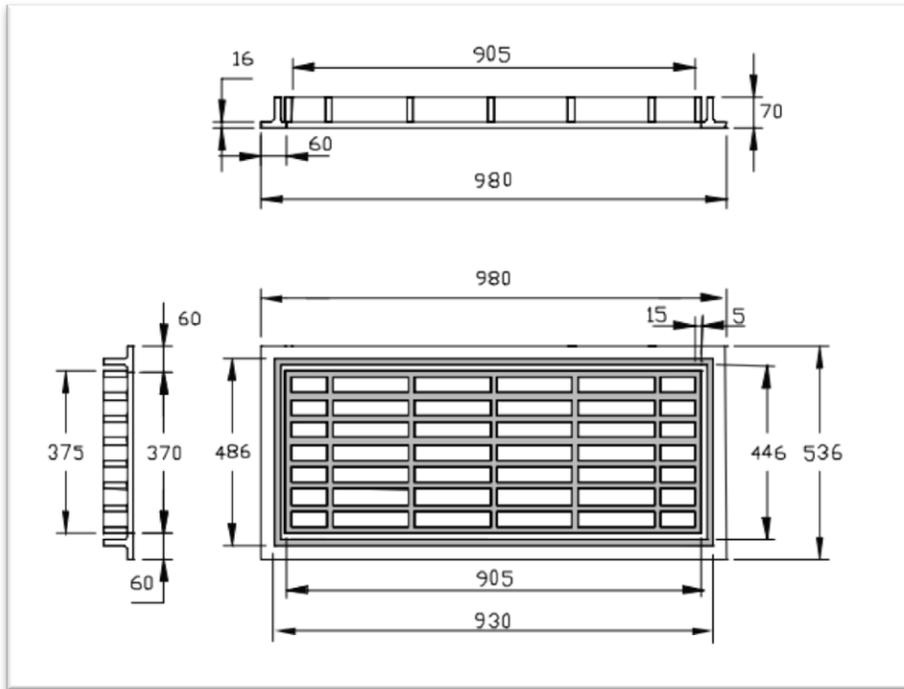
Esta propuesta también satisface la condición de diseño requerida.

V calculada = 4,30 m/s

Especificar que para este tramo se requiere incrementar la altura de la cuneta como se muestra en el esquema (75 cm), pues las condiciones del terreno para este tramo así lo permiten.

3.2.2. Diseño hidráulico de sumideros o tragantes

Para el diseño de los tragantes horizontales propuestos se considerará el empleo de rejillas Irving, y considerando una altura de lámina de agua superior a 12 cm, pues se necesita aliviar los caudales hidrológicos que tributan el vial y la cuenca urbana, evitando las inundaciones por estancamiento de las aguas. Para que, tanto el tránsito de vehículos y de peatones transiten de manera segura, además surge la necesidad de evitar la disminución de la fricción del vial.



Rejilla Irving.

- **Cálculo de la capacidad hidráulica de los tragantes**

Empleando la fórmula siguiente, para $h \geq 12$ cm ($h = 30$ cm).

$P = 130$ cm (perímetro de la abertura efectiva)

$$Q_{\text{hidráulico}} = 0,0164 * H^{3/2} * P = 0,0164 * 30 \text{ cm}^{3/2} * 130 \text{ cm} = 350 \text{ l/s}$$

$Q_{\text{hidrológico}} = 1500$ l/s (caudal aportante de la cuenca urbana adicionado al que aporta el vial)

Cantidad de tragantes necesarios

$$n = \frac{Q_{\text{hidrológico}}}{Q_{\text{hidráulico}}} = \frac{1500 \text{ l/s}}{350 \text{ l/s}} = 4,3 = 5 \text{ tragantes}$$

Espaciamiento entre tragantes

$$@ = \frac{L_{\text{tramo}}}{n} = \frac{400 \text{ m}}{5} = 80 \text{ m}$$

Los tragantes serán de 1,00x1,00 m de base y con profundidad variable desde (1,20 hasta 1,50 m), se ejecutarán con muros de hormigón con espesor de 0,20 m. Los registros se construirán

de 1,00x1,00 m de base y profundidad de 1,50 m, los mismo se ejecutarán con bloques de hormigón con espesor de 0,20m, ver detalles en los Anexos para la posición del tragante en el tramo respectivo.

3.2.3. Diseño hidráulico del tubo de conducción del agua pluvial

Datos

$$Q_{1\%} = 3,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{5\%} = 0,55 * 3,09 \text{ m}^3/\text{s} = 1,70 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_o = 0,01 \text{ m/m}$$

$$n = 0,015 \text{ (coeficiente de rugosidad para el revestimiento de hormigón)}$$

Primero se hará el diseño para la tubería trabajando a sección llena y sin presión (libre):

Primeramente partiendo asumiendo un valor de eficiencia del 85 %; pues se debe comenzar el tanteo suponiendo un valor de eficiencia mayor al 75 %.

Con la relación $d/D = 0,85$; en Curvas Características (Anexos) con $N/n = \text{variable}$ y relación q/Q , se determina la relación $q/Q = 0,88$

$$Q = q/0,88 = 1,70/0,88 = 1,93 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para estas condiciones entrando en el Nomograma de Kutter (Anexos), obtenemos que la tubería debe tener un diámetro interno mayor a 910 mm (analizando los tubos que se fabrican en nuestro país).

$$D = 910 \text{ mm} \text{ En Nomograma de Kutter con } S = 0,01 \text{ m/m y } Q = 1,70 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = 910 \text{ mm} \approx 1000 \text{ mm (diámetro constructivo inmediato superior)}$$

Por lo que se utilizará el tubo de diámetro 1000 mm.

$$Q = 2,10 \text{ m}^3/\text{s} \text{ En Nomograma de Kutter con } S = 0,01 \text{ m/m y } D = 1000 \text{ mm}$$

Para determinar el gasto máximo a sección parcialmente llena

$$q_{\text{máx}} = 1,08 * Q = 1,08 * 2,10 = 2,30 \text{ m}^3/\text{s}; \text{ Con } N/n = \text{variable y } d/D = 0,97$$

$$q_{\text{máx}} = 2,30 \text{ m}^3/\text{s} \geq Q_{\text{hidrológico}} = 1,70 \text{ m}^3/\text{s}; \text{ Ok.}$$

Diseño a sección parcialmente llena:

Eficiencia: $q/Q = 1,70/2,10 = 0,81$

$d/D = 0,75 \geq 0.7$. En Curvas Características con $N/n = variable$ y relación $q/Q = 0,81$

Altura libre (HL):

La profundidad a la cual circula el gasto de diseño en la tubería se obtiene mediante la relación $d/D = 0,75$

$$d = 0,75 * 1000 = 750 \text{ mm}$$

La altura libre real será:

$$HLR = D - d = 1000 - 750 = 250 \text{ mm}$$

La misma debe compararse con la especificación siguiente:

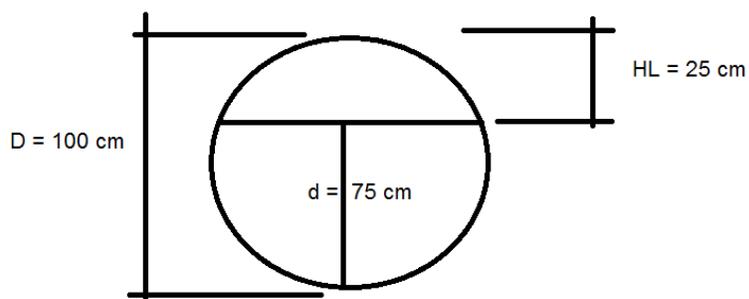
$$HL_{calculada} = 0,25 * D = 250 \text{ mm} ; \text{ Con } D < 3 \text{ m}$$

$$HLR = 250 \text{ mm} = HL_{calculada} = 250 \text{ mm}; \text{ Ok.}$$

Chequeo de la velocidad de circulación:

$v/V = 0.99$ En Curvas Características con $N/n = variable$ y relación v/V con $d/D = 0.75$

- $V = 2,45 \text{ m/s}$ En Nomograma de Kutter con $S = 0.01 \text{ m/m}$ y $D = 1000 \text{ mm}$
- $v = 0.99 * 2,45 = 2,43 \text{ m/s}$
- $0.25 \text{ m/s} < v = 2,43 \text{ m/s} < 4.5 \text{ m/s}$; Ok. Cumple con lo establecido en la NC 48-26:84.



Detalle constructivo de la sección del tubo para la conducción de las aguas pluviales a disponer en el tramo crítico del vial. Nota: Dimensiones interiores del tubo.

3.4. Conclusiones parciales

1. El tramo de vía correspondiente entre los kilómetros 3 y 4, presenta afectaciones en su sistema de drenaje, debido a la acumulación de lluvia en los paseos y cunetas los cuales no cumplen con su funcionalidad. Las obras de fábrica presentes en la zona de estudio no muestran señales de aparente mal estado excepto la obra de fábrica #1(OF 1), que su eficiencia se encuentra afectada más del 50% de su capacidad.
2. Para el diseño de cunetas se inició el procedimiento asumiendo una altura de la lámina de agua (h) de 20 cm y una relación de talud 1,5:1 (estimada en el campo), lo cual se comprobó que no satisfacía las necesidades actuales para aliviar los caudales que recibía.
3. Se realizó una propuesta de diseño con relación de taludes 2:1 para el primer tramo rural correspondiente a la cuenca A_2 , y con $h = 60$ cm. El tramo también rural correspondiente al A_3 , para una propuesta de diseño se estimó una relación de taludes de 2:1/2,5:1 y $h = 75$ cm.
4. El diseño propuesto para el tramo crítico del vial correspondiente al A_1 , es el sistema de drenaje empleando rejillas Irving, las cuales se ubicarán 5 tragantes espaciados a 80 m cada uno en el tramo de 400 m correspondiente.
5. El desagüe mediante los tragantes será secundado por un sistema propuesto para la conducción de las aguas pluviales que consta de un conductor de sección tubular con diámetro $D = 100$ cm, y para permitir una altura libre $HL = 25$ cm.

Conclusiones Generales

1. Se definió la metodología a emplear en el tramo del vial correspondiente entre los kilómetros 3 y 4 de la carretera Santa Clara-Entronque Vueltas, tomando consideraciones de las normativas vigentes con el fin de evaluar el drenaje pluvial de la zona de estudio y proponer variantes para su posterior empleo en la solución a tomar.
2. Se definieron tres variantes en todo el tramo (ver detalles en el Anexo 3):
 - Para el tramo correspondiente al área de la cuenca hidrológica A_1 , y con una longitud $L_1= 400$ m, se definió que la solución al problema de drenaje pluvial presente sería el empleo de rejillas Irving (5 tragantes espaciados a 80 m) con desagüe a un conductor con sección tubular de diámetro $D= 100$ cm ubicado bajo el nivel de terreno y con caída hasta la obra de fábrica OF 1, como punto colector.
 - Para el segundo tramo correspondiente al tramo $L_2= 200$ m, y al cual le tributa la cuenca hidrológica A_2 , la solución propuesta es un sistema de cunetas ubicadas al lado derecho del vial con relación de taludes 2:1 que permita una altura de la lámina de agua $h= 60$ cm, con pendiente de 0,5 % para cunetas no revestidas y desagüe en la obra de fábrica OF 2.
 - El tramo $L_3 = 400$ m y área de la cuenca hidrológica A_3 , la solución es semejante al tramo anterior con el empleo de cunetas paralelas al vial al lado derecho, con relación de taludes 2:1/2,5:1 respectivamente, y con capacidad para tolerar una altura de la lámina de agua $h= 75$ cm.
3. El diseño empleado para determinar la sección triangular determinante en las cunetas, el chequeo de los tubos en las atajeas, y el diseño realizado para el empleo de tragantes se realizó mediante las consideraciones de la NC48-26:84, la cual emplea como base de análisis de las cuencas hidrológicas el método racional, el cual brinda resultados económicos y seguros, que se adaptan muy bien a las características tropicales de Cuba.

Recomendaciones

1. Emplear para las atajeas presentes en el tramo de estudio la misma dimensión interior de sección tubular con diámetro $D= 100$ cm.
2. Realizar mantenimiento y limpieza a los tubos ubicados bajo las atajeas y bajo las principales carreteras que se adentran a la zona de viviendas.
3. Realizar mantenimiento y limpieza a la obra de fábrica OF 1, con el fin de reutilizar la misma e incluirla como parte del sistema de drenaje para el tramo del vial correspondiente.

Bibliografía

- Abarca Jaramillo, A. A. and I. M. Altamirano Cortez (2014). Diseño del mejoramiento vial con drenaje de la vía principal de acceso a " La Moya" y diseño de alcantarilla en el sector de Miraflores Alto.
- Adriani, D. (2016). Diseño del sistema de captación para aguas pluviales ubicado en la Calle Real de la comunidad San Pablito, Carretera Vieja Caracas-Los Teques, Venezuela.
- Aparicio Mijares, F. J. (2004). Fundamentos de hidrología de superficie, Limusa.
- Arias Chacón, S. (2011). "Conservación vial: efecto de la escorrentía superficial sobre el sistema de infraestructura de drenaje en vías de índole no urbana. Caso de estudio: Ruta Nacional 219, Oreamuno, Costa Rica." Tecnología MOPT vol. 18-19, 2010-2011.
- Artes, E. C. (2016). Estudio para la mejora de la Seguridad Vial de la Carretera CV-245, PPKK 19+ 800 a 21+ 000 en el TM de Alcublas (Valencia).
- Batista Silva, J. L. (2011). "Cálculo de niveles y gastos máximos según el método hidráulico."
- Benítez Olmedo, Raúl. (1986). Proyecto de Carreteras. Editorial ISPJAE, La Habana, Cuba.
- Bervis, E. (2004). Guía hidráulica para el diseño de obras de drenaje en caminos rurales, Programa de Apoyo al Sector Transporte (PAST-DANIDA).
- Brewer Cote, E., et al. (2016). Evaluación del drenaje pluvial existente con descarga al mar caribe frente a la alternativa solución con descarga sobre la Bahía de Cartagena, en el área comprendida entre las avenidas primera y San Martín, Universidad de Cartagena.
- Carpio, H. A., et al. (2011). Propuesta de diseño del drenaje pluvial, alcantarillado sanitario y planta de tratamiento para las aguas residuales del casco urbano y colonia La Entrevista del municipio San Cayetano Istepeque, departamento de San Vicente, Universidad de El Salvador.
- Correa Albarracín, N. E., et al. (2007). "Carreteras destapadas. Nociones de diseño, construcción y mantenimiento. Obras de drenaje."
- De la Nación, P. (2003). Manual para el Diseño de Planes Maestros para la Mejora de la Infraestructura y la Gestión del Drenaje Urbano, Buenos Aires. Secretaría de Obras Públicas. Unidad Coordinadora de Programas con Financiación Externa.
- Delgado Martínez, García Depestre, Ibáñez Córdova, Ribas Cuevas (2006). Consideraciones para el diseño geométrico, hidrológico e hidráulico de vías urbanas. Villa Clara, Cuba.
- Fernández Pérez, D. V. (2002). "Los ocho mil monopolios del agua urbana." Revista de obras públicas (CESIONAL): 93-102.
- Fulgado, E. M. (2014). Proyecto constructivo de integración del ferrocarril en Sant Feliu de Llobregat. Alternativa en superficie. Estudios de drenaje.

Jacobo, P. and O. Antonio (2003). "Diseño de la red de alcantarillado sanitario para el caserío La Nueva Esperanza, municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala." Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

León Bernal, S. and J. E. Medina Otero (2014). Comportamiento hidráulico de un sistema humedal-construido/tanque-r. Regulador para aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá.

López Alonso, R. (2000). "Captación de escorrentía superficial en redes de drenaje urbano." Cimbra, 2000, núm. 332, p. 36-39.

Marbello Pérez, R. V. and M. G. Cárdenas Quintero "Precisión y corrección a la ecuación de diseño de cunetas triangulares urbanas de aguas lluvias, establecida en normas de diseño colombianas."

Mayorga Mora, N. (2013). Experiencias de parques lineales en Brasil: espacios multifuncionales con potencial para brindar alternativas a problemas de drenaje y aguas urbanas, Inter-American Development Bank.

Méndez Lavielle, E. (2012). "Medidas de Seguridad de Emergencia de Inundación y Soluciones de Polución para el Diseño del Drenaje Pluvial de la Vivienda." Revista Daena (International Journal of Good Conscience) 8(1).

Momparler, S. P. and I. Andrés-Doménech (2008). "Los sistemas urbanos de drenaje sostenible: una alternativa a la gestión del agua de lluvia". Revista Técnica de Medio Ambiente. C&M Publicaciones 124: 92-104.

NC 48-26: 1984. Drenaje Pluvial. Especificaciones de proyecto.

Pappe, S. and J. E. Sosa (2012). Plan de mantenimiento preventivo para garantizar el óptimo rendimiento de la vía de comunicación que conecta la urbanización de Los Naranjos con la del Hatillo. Carretera Vieja El Hatillo en el Municipio El Hatillo.

Rabasseda, G. H. (2009). Estudio de los patrones de colmatación observados en los sumideros de la cuenca de Riera Blanca: codi: 711-TES-EG/CA-4321.

Randazzo, F., et al. "Diseño de obra de conservación del área de pica del gasoducto Nurgas 36", sector universidad de Carabobo."

RC-1010. Obras Hidráulicas. Alcantarillado y Drenaje.

RC-3097. Estructura. Montaje de Alcantarillas de Tubo y Cajón.

Riccardi, G. A. (1997). "La transformación lluvia-caudal en ambientes rurales y urbanos. Los procesos hidrológicos y el modelado." Cuadernos del CURIHAM 4: 69-87.

Ripollès, J. D. and M. Gómez (1994). "Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores." Ingeniería del agua 1(1).

Rodríguez Espinosa, M. (2015). Especificaciones de Diseño para secreciones de hormigón armado en estructuras hidráulicas, Universidad Central" Marta Abreu" de las Villas.

Rubio, M. S. I. H. R. "Manual del curso de irrigación y drenaje."

Sandoval, S., et al. (2012). "Herramientas para la implementación de mantenimiento proactivo en alcantarillados urbanos utilizando confiabilidad de inundación y conceptos de entropía de información." Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia (65).

Sosa Estopiñales, M. (2009). Diseño del Sistema de Gestión Ambiental integrado al Sistema de Gestión de la Calidad de la Empresa de Mantenimiento Vial y Construcciones Villa Clara, Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.

Taylor Hernández, G., Valdés Avellaneda, E. (1987). Puentes. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.

Terrestres, e. E. V. "Drenaje vial, conceptos básicos para el diseñador geométrico universidad pontificia bolivariana."

Toapanta Quispe, F. A., et al. (2010). Diseño de un Plan de Mantenimiento para el Equipo Caminero y Vehículos que Dispone el Gobierno Municipal de Tena, Provincia de Napo.

Anexos

- Anexo 1: Tablas, ábacos, gráficos, figuras correspondientes a los métodos y metodologías expuestas.

- Anexo 2: Contiene los acumulados mensuales de lluvias desde el año 2004 hasta 2017.

- Anexo 3: Detalles de las soluciones constructivos para: Plano de esquema de drenaje, detalles de las cunetas en el vial, ubicación de tragantes y detalles constructivos.