

Diseño y evaluación hidrológica del tramo del eje vial Guadalupe- Caballo Blanco del plan vial de la ciudad de Cartago a la altura de Dulce Nombre



Abstract

This project examines and tries to give a solution to a specific case of flooding problems in Dulce Nombre, Cartago; to this end were the following objectives:

- Undertake a preliminary review of available information related to the taxation area.
- Assess, review and geo original geometric layout.
- Designing the definitive route Altitude.
- Perform geotechnical studies necessary while also calculates and quantifies the earthmoving.
- Assess and parameterize the tributary area associated with geographic information system. Estimating peak flows from storms related to sources of information available. Sizing and designing hydraulic works necessary.
- Designing the surface rolling road stretch covered.

The methodology consisted of analysis of information, generation of tables from this, estimates of data, models and simulations results. The results were: a summary of information gathered, redesign of the layout geometry of the axis road between Cartago and south side of the road ITCR Paraíso-Cartago, characterization and physical parameters of the catchment flood flow generator, for obtaining hyetograph Cartago, design of hydraulic project transportation to the Toyogres river, estimation of earthmoving, design thickness of pavement structure and cost estimates for major work.

Key words: hydraulic, GIS, hyetograph, hydrologic, peak flows, Dulce Nombre, Cartago

Resumen

Este proyecto analiza y trata de dar una solución a un caso específico de problemas de inundaciones en Dulce Nombre de Cartago, con este fin se plantearon los siguientes objetivos:

- Llevar a cabo una revisión preliminar de la información disponible para el área tributaria asociada.
- Evaluar, replantear y georeferenciar el trazado geométrico original.
- Diseñar altimétricamente el trazado definitivo.
- Realizar los estudios geotécnicos necesarios al tiempo que se calcula y cuantifica el moviendo de tierras.
- Evaluar y parametrizar el área tributaria asociada mediante sistema de información geográfica. Estimar los caudales máximos de tormenta ligados a las fuentes de información disponibles. Dimensionar y diseñar las obras hidráulicas necesarias.
- Diseñar la superficie de rodamiento del tramo vial contemplado.

La metodología consistió en análisis de información, generación de cuadros a partir de este, estimaciones de datos, simulaciones de modelos y obtención de resultados.

Los resultados fueron: resumen de la información recopilada, rediseño del trazado geométrico del eje vial Cartago entre costado sur del ITCR y carretera Cartago-Paraíso, caracterización y parametrización física de la cuenca generadora del caudal de inundación, la obtención del hietograma para Cartago, diseño de la obra hidráulica de trasporte hacia el río Toyogres, estimación de movimiento de tierras, diseño de los espesores de la estructura de pavimento y estimación de costos principales de la obra.

Diseño y evaluación hidrológica del tramo del eje vial Guadalupe-Caballo Blanco del plan vial de la ciudad de Cartago a la altura de Dulce Nombre

MARLON NAVARRO PACHECO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	5
MARCO TEÓRICO.....	7
INTRODUCCIÓN.....	42
METODOLOGÍA.....	45
RESULTADOS.....	48
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	65
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	79
APÉNDICES.....	80
ANEXOS.....	81
REFERENCIAS.....	82

Prefacio

El término “ingeniería” siempre está asociado con innovaciones tecnológicas, grandes descubrimientos y enormes desarrollos científicos, pero se debe recordar que existen pequeños problemas que se presentan a diario y que necesitan una pronta solución. Este proyecto se convierte en una aplicación científica del conocimiento y de los avances tecnológicos en el campo de los sistemas de información geográfica, para tratar de resolver un problema de índole social. Al prestar un servicio a una comunidad se ratifica lo importante que es para un país la educación técnica.

En este caso particular la comunidad de Dulce Nombre de Cartago sufre de problemas de inundación por causa de la saturación de obras hidráulicas, que recogen el agua generada en una cuenca hidrológica determinada. Estas obras no fueron diseñadas y construidas para soportar la escorrentía que se presenta actualmente, además, la capacidad hidráulica de la quebrada Zopilote, que en última instancia recibe estas aguas, no es suficiente y se generan desbordamientos.

Las razones anteriores muestran la verdadera importancia de este proyecto, ya que a través de su análisis y los resultados obtenidos se tiene una propuesta de diseño, tanto para el tramo vial Guadalupe-Caballo Blanco, a la altura de Dulce Nombre, como para una obra de desviación de la escorrentía que viaja hacia la quebrada Zopilote y que se pretende desfogar en el río Toyogres.

En el caso del tramo vial las consideraciones tomadas generan un diseño horizontal-vertical, de acuerdo con los estándares centroamericanos, considerando el confort y la seguridad de los usuarios. Se incluyó, como parte de un diseño integral, el movimiento de tierras y el diseño de una carpeta asfáltica que va de acuerdo con las demandas de tránsito proyectadas para este tramo vial a un plazo de 15 años.

Posterior al diseño vial se hizo la parte correspondiente al análisis espacial; fue en esta sección donde se puso de manifiesto que los estudiantes de educación superior y en general de todo el sistema educativo, entren en contacto con las tecnologías actuales y éstas les permitan generar mejores resultados y propuestas de trabajo.

Durante la etapa de análisis espacial-hidrológico se involucró específicamente el uso de herramientas computacionales como MapWindow Gis y Store Water Managment Model (SWMM), permitiendo caracterizar de una forma integral la cuenca, generar datos de caudales de diseño, predecir ampliamente el comportamiento de las obras hidráulicas y obtener secciones hidráulicas optimizadas, buscando siempre que estas puedan trabajar sin sufrir daños en su estructura o generar inconvenientes a los habitantes de la zona.

En resumen el objetivo general de este proyecto fue Diseñar el tramo del eje vial Guadalupe-Caballo Blanco del plan vial de la ciudad de Cartago, con especial énfasis en la evaluación hidrológica del área tributaria asociada y el dimensionamiento de las obras hidráulicas necesarias para evacuar esta escorrentía hacia el río Toyogres, evitando así las inundaciones generadas en el sector en análisis.

Finalmente es muy importante agradecer a todos aquellos que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto, especialmente al profesor Ing. Maikel Méndez, que en todo momento tuvo una muy buena disposición para servir de guía y apoyo en la ejecución del proyecto. A la Municipalidad de Cartago y al Programa PRUGAM quienes facilitaron datos e información relevante en el desarrollo de este trabajo. Al laboratorio de Ingeniería en Construcción del ITCR, que facilitó los equipos y el personal para llevar a cabo los estudios de suelo pertinentes.

Una dedicatoria especial de este trabajo y gran esfuerzo, a mis padres que han luchado por

brindarme la oportunidad de ser un profesional y a Marisela, que junto con ellos ha estado a mi lado para enfrentar el duro camino que hoy gracias a Dios me ha llevado hasta aquí.

Resumen ejecutivo

La Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ha estado a la vanguardia de la formación de profesionales en el campo científico, y para mejorar cada vez la calidad de sus profesionales se han dado pasos importantes en busca de una acreditación internacional, para la malla curricular actual y se han obtenido buenos resultados. Este logro sobresaliente ha hecho de la Escuela de Ingeniería en Construcción una escuela líder a nivel centroamericano, ha sido de su especial interés desarrollar soluciones a problemas de índole social, no solamente académicos o tecnológicos.

El desarrollo de proyectos de graduación, permite aprovechar los recursos humanos y tecnológicos con que cuenta esta escuela, para solucionar problemas relativamente sencillos, pero que son muy importantes para la comunidad. Este proyecto se convierte en un servicio para un grupo de familias que necesita una solución práctica a un problema de aguas, y a la vez se ratifica lo importante que es para un país la educación técnica. El problema al cual se le busca dar solución se describe a continuación.

Los altos índices de expansión urbana, aunados a cambios en el uso del suelo y condiciones climáticas cada vez más severas, contrastan con los eventos de rápida escorrentía ante lluvias de alta intensidad, lo cual a su vez está íntimamente ligado al riesgo de inundación.

Este proyecto analiza y busca respuesta a un caso específico de problemas de inundación generado a partir de malas prácticas constructivas y de administración territorial.

El proyecto a evaluar se desarrolla en Cartago, y su principal protagonista es la quebrada Zopilote, que experimenta una sobrecarga hídrica, con escorrentía proveniente

del sector oriental del casco urbano de Cartago, el sector sur del campus del ITCR, y cuyo punto de concentración desemboca en el sector noroeste de Dulce Nombre, a la altura del cementerio de esta localidad. La escorrentía viaja por un canal de tierra que se encuentra en el límite sur del ITCR (*ver figura 1*), y cuya capacidad hídrica no es la adecuada, lo que provoca rebalses de agua en su punto de concentración antes mencionado. Por otro lado el caudal que sí llega a la quebrada, provoca su desbordamiento y esto trae consigo inundaciones en viviendas aledañas, generación de malos olores y mosquitos.

Durante el proceso de análisis de la información generada por parte de los vecinos de la zona afectada, se vislumbra un proyecto vial que pretende en un futuro no muy lejano, darle continuidad a la circunvalación de Cartago con un tramo que iría desde el sector sur del ITCR, en el taller de Ingeniería Forestal, hasta la carretera Cartago Paraíso a la altura de Caballo Blanco. Lo que esto quiere decir es que este proyecto corta de alguna manera la zona afectada. Esta posibilidad generó la idea de trazar una obra hidráulica de transporte y captación paralela a la vía, para desviar el curso de las aguas hacia el río Toyogres, mismo que está dentro del diseño vial propuesto, con un puente sobre su margen.

Se decide por lo tanto analizar esta opción como una posible solución al problema planteado, bajo los siguientes objetivos:

- Llevar a cabo una revisión preliminar de la información disponible para el área tributaria asociada, incluyendo registros históricos, estudios previos e información cartográfica.
- Evaluar, replantear y georeferenciar el trazado geométrico original.
- Diseñar altimétricamente el trazado definitivo.

- Realizar los estudios geotécnicos necesarios al tiempo que se calcula y cuantifica el moviendo de tierras.
- Evaluar y parametrizar el área tributaria asociada mediante sistema de información geográfica. Estimar los caudales máximos de tormenta ligados a las fuentes de información disponibles. Dimensionar y diseñar las obras hidráulicas necesarias.
- Diseñar la superficie de rodamiento del tramo vial contemplado.

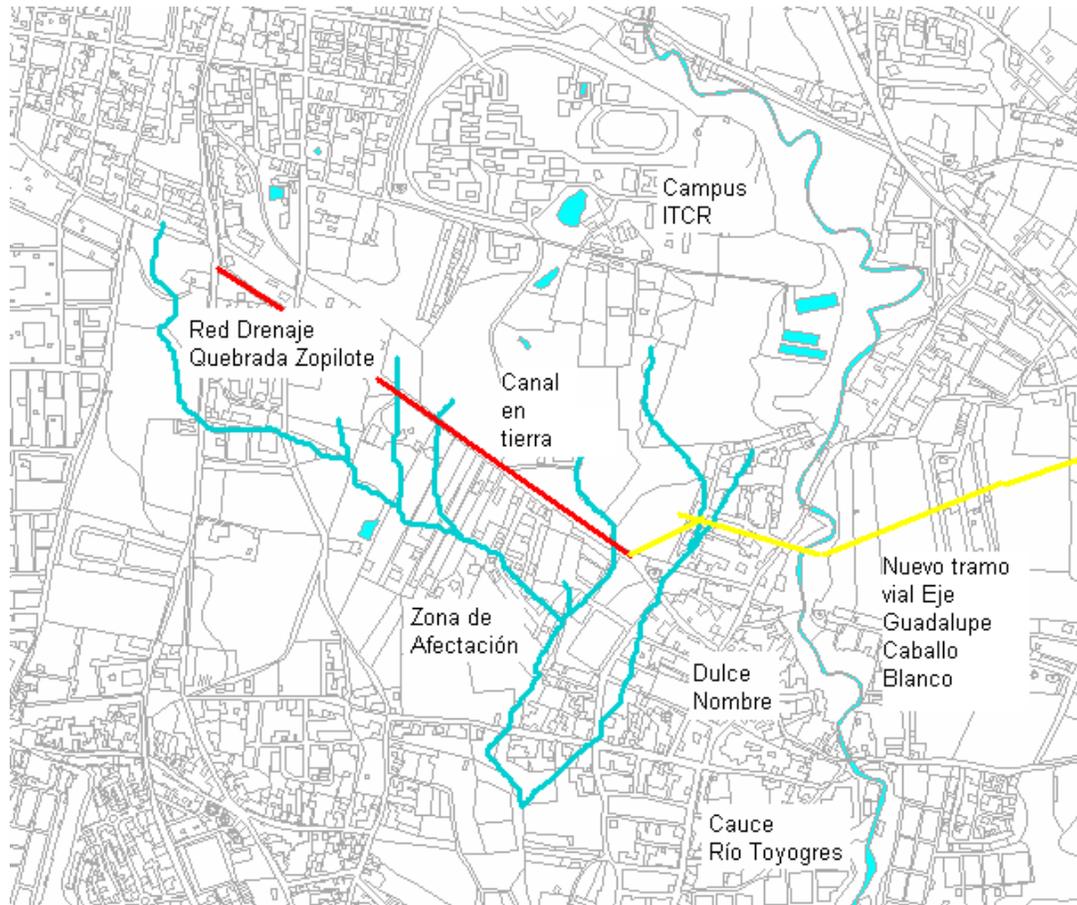


Figura 1: Ubicación de la zona afectada. Fuente: Autor, 2009. Map Window GIS

Con la intención de cumplir los objetivos planteados, se desarrolló una metodología que va de la mano con la programación del proyecto y en ella se definen los aspectos por exponer a continuación

El inicio del proyecto, como la mayoría de las investigaciones científicas, se basó en el estudio y la revisión preliminar de la información existente, con el fin de obtener datos relacionados con estudios viales, levantamientos planimétricos, altimétricos y de volúmenes de tránsito para las vías involucradas.

Se complementó con investigación en materia de análisis de suelos y estudios hidrológicos realizados por distintas entidades gubernamentales a las cuales los vecinos recurrieron en primera instancia (2006).

Además de lo citado en los dos párrafos anteriores, se utilizó cartografía digital en formato DGN y fotografías aéreas de la zona afectada, las cuales fueron proporcionadas por PRUGAM, esto con la intención de tener una visión global del terreno, los pueblos involucrados los cauces de quebradas o ríos cercanos y así caracterizar la cuenca en cuestión.

Es importante mencionar que se recurrió a la aplicación e interpretación de mapas de uso de suelo para la provincia de Cartago, realizados en el 2006. Por último, en lo que respecta al ITCR, se analizó su proyección de crecimiento en infraestructura por medio de su Plan de Desarrollo para el campus. Esta última información fue brindada por la Oficina de Ingeniería de esta institución.

Posteriormente a esta etapa de recopilación de información se inició un proceso de evaluación y replanteo del trazado geométrico original de 1997 (*obtenido durante la etapa de recapitulación de información*), propuesto para el tramo vial en estudio, lo cual incluyó: una digitalización de los planos originalmente propuestos por el INVU, seguido de una evaluación de aspectos básicos en las consideraciones preliminares de una vía. Para concluir esta se replanteó el total del trazado geométrico definitivo con base en puntos de control geodésicos de campo.

Luego de estudiar el trazado horizontal se evaluó el diseño altimétrico y se obtuvo mediante el análisis de pendientes, una valoración preliminar de posibles volúmenes de corte/relleno y el rediseño de curvas verticales, generándose un trazo vertical definitivo.

Se continuó con la realización de estudios geotécnicos, el establecimiento de las secciones de control, la cubicación del material y, en general, todas las labores correspondientes a la cuantificación del movimiento de tierras. Luego se procedió a desarrollar el diseño de los espesores en una estructura de pavimento con carpeta asfáltica.

Al lado de las acciones descritas en los párrafos anteriores se inició el proceso para la evaluación y parametrización del área tributaria, asociada al análisis hidrológico; esto mediante el Sistema de Información Geográfica de dominio público MapWindow GIS. Se incluyó dentro de este proceso, la reproyección de las capas temáticas vectorial y raster de la cartografía digital, además se utilizaron los modelos de elevación digital (*DEM's por sus siglas en inglés*) proporcionados por un estudio en conjunto con el ingeniero Maikel Méndez y el autor de éste documento; el cual consistió en adaptar el modelo creado para el río Toyogres a cargo del ingeniero en mención a las necesidades de este proyecto. De tal forma que, a partir de las capas vectoriales de curvas de nivel, se definió un tamaño de celda

de 5x5m, considerándose adecuado para el análisis de áreas urbanas, se procesaron los modelos de elevación digital mediante el algoritmo TauDEM generándose posteriormente las unidades hidrológicas fundamentales (*HRU's por sus siglas en inglés*) y la red de drenaje natural.

Se incluyó, dentro de esta etapa para el análisis hidrológico, el procesamiento de los mapas temáticos de uso de suelo con las intenciones de identificar las variables que afectan la escorrentía superficial, determinar áreas permeables e impermeables.

Dentro del análisis, se incorporó la obtención de valores promedio de pendiente del terreno, datos que afectan de manera directa el tiempo de concentración.

El paso a seguir era la estimación de los caudales máximos de tormenta, contando ya con los parámetros físicos de las subcuencas. A partir del diseño de la carretera se volvió necesario desarrollar una propuesta para la obra hidráulica que captaría y conduciría la escorrentía generada por el área tributaria en consideración, esto representó una manera de ir definiendo la solución para el problema.

La predicción de caudales sobre las áreas tributarias requería hietogramas representativos de las precipitaciones en Cartago; sin embargo, a falta de hietogramas reales, fue necesaria la generación de hietogramas sintéticos a partir de curvas Intensidad – Duración - Frecuencia, desarrolladas para esta zona por parte del Instituto Meteorológico Nacional. El modelo utilizado para la estimación de escorrentía, fue el Modelo de Número de Curva del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos, basándose en un NC de 80 igual para cada área tributaria. Este valor proviene de datos tabulados, según experiencias de los investigadores y es para zonas urbanas.

El proceso de estimación de caudales, así como el diseño de un canal y/o tramo de tubería como parte de una posible solución, se efectuó utilizando el Modelo de Compartimentos de SWMM bajo el precepto estricto de un flujo uniforme, considerando los estados de flujo (*subcrítico, supercrítico*) en las secciones más importantes y desarrollando estructuras hidráulicas de transición y entrega. El empleo del programa de computo *SWMM*, se dio con la intención de promover tecnologías que permiten

obtener resultados representativos de la realidad del problema.

Para concluir se dio solución a la carpeta de rodamiento de la estructura vial, seleccionando entre las opciones de concreto o asfalto y determinando los espesores de las capas que conformarían su estructura. Para ello se tomaron como base los lineamientos establecidos en los acuerdos centroamericanos para el diseño de vías, y el Manual de Diseño de Pavimentos (Barquero, 2006).

La metodología que se aplicó responde a un proceso de diseño propuesto por entidades del gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica adaptada a la realidad de los países del Istmo Centroamericano.

Para terminar la investigación, se hizo una estimación preliminar de costos, palpando el impacto económico de esta obra.

Luego de aplicar la metodología descrita anteriormente, se llegaron a obtener resultados de índole vial, espacial, hidráulico e hidrológico, los cuales se exponen a continuación.

Primeramente se obtuvo un cuadro resumen de la información generada desde el año 2006 a la fecha actual referente al problema de las inundaciones, que incluye estudios técnicos, valoraciones previas de la situación y un diseño geométrico dado en 1997 por el INVU como parte del eje vial Guadalupe- Caballo Blanco.

El segundo resultado fue un cuadro de evaluación para el trazado del eje vial que abarca desde el sector sur del ITCR, comúnmente conocido como el sector del taller de maderas, hasta la conexión final de la carretera Cartago-Paraiso; esta evaluación fue confeccionada bajo los parámetros establecidos en el Manual Centroamericano de Diseño de Carreteras.

Los resultados descritos en el cuadro mencionado anteriormente, demostraron que el trazado es correcto teóricamente, pero al analizar las construcciones aledañas al día de hoy, se determinó que el trazado debía cambiar.

En consecuencia el tercer resultado es el rediseño del trazado geométrico mostrado en una serie de láminas adjuntas.

En cuanto a los resultados de análisis espacial, se obtuvo la delimitación de la cuenca generadora de las aguas de inundación, las unidades de respuesta hidrológica (*subcuencas*) la red de flujo y los puntos de descarga. Con base en este cuarto resultado se realizó un cuadro que reúne las principales características físicas de las subcuencas, tales como área y pendiente promedio.

El quinto resultado corresponde a la hidrología, pues se confeccionó un hietograma a partir de curvas intensidad, duración, frecuencia, representadas por sus siglas IDF, brindadas por el Instituto Meteorológico Nacional (*IMN*) y aplicando la metodología propuesta por el Programa Morfoclimatología Aplicada y Dinámica Exógena (*MADE*), de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional de Costa Rica.

Este hietograma se ingresó junto con la parametrización física de las cuencas al software Storm Water Managment Model (*SWMM*) para determinar los caudales generados, datos que se utilizaron en el mismo software para obtener un modelo de simulación de ruta de una obra hidráulica de transporte, la cual intercepta el caudal antes calculado conduciéndolo hacia el río Toyogres; luego de analizar diversos escenarios se extrajeron las secciones hidráulicas óptimas con tramos en canal trapezoidal y en tubería cerrada.

Una vez que se cuenta con los diseños vial e hidráulico se obtuvo el calculo de movimiento de tierras; esta acción constituye un resultado más.

Otro resultado fueron los espesores para la estructura del pavimento, es decir carpeta asfáltica, base y subbase.

Como último resultado se obtuvo una estimación de costos para las estructuras principales.

Marco teórico

Buscar una posible solución a un problema de ingeniería requiere normalmente de una mezcla de distintas ramas o especialidades, por ello se conforman equipos de trabajo o, en su defecto, el diseñador debe investigar a fondo los distintos temas que forman parte del desarrollo integral del proyecto.

En el caso específico de este proyecto, se requiere de conocimiento e investigación en diseño vial, hidráulica, hidrología, hidrometeorología y sistemas de información geográfica. En este capítulo se presentan conceptos básicos que rodean estos temas y ecuaciones matemáticas que definen el diseño de los elementos físicos.

Diseño vial

Este tipo de diseño comprende el desarrollo de la infraestructura vial, considerándose esta como: todos aquellos componentes que en conjunto le facilitan a vehículos y peatones su desplazamiento de un lugar a otro. Se deben utilizar normas de diseño que favorezcan la seguridad, la comodidad del usuario y que afecten en lo mínimo el medio ambiente. El diseño vial está compuesto básicamente por los siguientes elementos: diseño geométrico, disposición de maquinaria, movimiento de tierras (MT), construcción de sistemas de drenaje, construcción de estructura de pavimento (concreto, asfalto, adoquines), obras mayores (puentes, pasos a desnivel, túneles), dispositivos de seguridad o control, señalamiento vertical, horizontal y sistemas de retribución.

Además de los elementos del diseño vial en este proyecto, se considerará también el efecto del diseño propuesto sobre las obras hidráulicas, que se definan para la captación de la escorrentía generada por las áreas tributarias en análisis (Barquero E. 2006).

Diseño geométrico

Corresponde a la definición teórica de la ruta por la cual se desarrollará la carretera; se divide básicamente en diseño planimétrico (*curvas en el plano horizontal, radios de giro, espirales de transición, sobre-elevaciones o peralte, número de carriles, carriles auxiliares*) y diseño altimétrico (*curvas verticales, pendientes, entre otros aspectos*).

Además de la división general que se hace en cuanto al diseño geométrico (*diseño vertical y horizontal*), en este diseño son utilizados algunos parámetros adicionales por considerar: clasificación de la carretera por diseñar, niveles de tránsito, topografía del lugar (*plano ondulado o montañosos*), condiciones geológicas (*tipo de suelos y estabilidad de materiales que lo conforman*), proyecciones de volúmenes de corte y relleno, hidrología, pasos obligados (*ríos, puentes carreteras existentes*) y puntos de acceso restringido (*hallazgos arqueológicos, cementerios*). Los dos primeros aspectos son necesarios de explicar pues corresponden a una metodología ya definida.

La clasificación de la carretera por diseñar se basa en la división entre carreteras de la Red Nacional (*primarias, secundarias o terciarias*) y carreteras de la red cantonal (*urbana o vecinal*), planteadas por el CONAVI y el MOPT respectivamente (MOPT, 2007).

Por su parte los niveles de tránsito que circularán teóricamente por la vía en diseño, se basan en el indicador numérico conocido como tránsito promedio diario anual (TPDA). Este se determina mediante estaciones que realizan conteos permanentes, más conteos realizados esporádicamente con personal capacitado en el tema, posteriormente se determina a partir del total la composición del tránsito que se agrupa conforme la simbología definida en el Acuerdo Centroamericano sobre la Circulación en Carreteras SIECA 2000, para diseño geométrico.

Cuadro 1. Tipos de vehículos y sus límites de peso por eje.

Tipo de Vehículo	Tipo de eje del Tractor			Tipo de eje del semiremolque			Total toneladas	
	Eje simple Direccional	Eje de tracción			Eje de arrastre			
		Eje simple	Doble rueda	Triple rueda	Eje simple	Doble rueda		Triple rueda
C2	5,00	10,00					15,00	
C3	5,00		16,50				21,50	
C4	5,00			20,00			25,00	
T2-S1	5,00	9,00			9,00		23,00	
T2-S1	5,00	9,00				16,00	30,00	
T2-S3	5,00	9,00				20,00	34,00	
T3-S1	5,00		16,00		9,00		30,00	
T3-S2	5,00		16,00			16,00	37,00	
T3-S3	5,00		16,00			20,00	41,00	

Fuente: Acuerdo Centroamericano Sobre Circulación en Carreteras SIECA 2000. Microsoft Excel 2003

La composición del tránsito afecta, entre otras cosas, el diseño de la estructura de pavimento, las pendientes máximas utilizadas y los radios de giro empleados.

Para hacer una consideración más real y representativa, el TPDA se puede afectar con factores como: Factor de hora pico (*FHP*), (*considerando los momentos de mayor tránsito durante el día*), factor de distribución direccional de las corrientes de tránsito, es decir en qué carril se desplaza mayor cantidad de vehículos. Se utiliza un valor promedio de 60% para este factor, según la experiencia para rutas rurales, pero aún así lo ideal es investigar la zona.

A demás se puede aplicar un factor de proyección a futuro para los posibles incrementos en los volúmenes de tránsito; este factor puede obtenerse de indicadores socioeconómicos como consumo de gasolina y tenencia de vehículos. La aplicación de estos factores se verá reflejada más adelante en cálculos posteriores (Barquero E. 2006).

Es a partir del TPDA que se define la capacidad de la vía utilizando los llamados niveles de servicio que define el Manual de Capacidades de Carreteras de la AAHSTO, el cual establece 6 niveles de servicio definidos entre las letras desde "A" hasta "F", siendo A un flujo vehicular totalmente libre, y F un flujo forzado, las demás letras asignan estados

intermedios según lo presenta la Sección 2.5.2 del Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales (*MCNDC*). La selección del nivel de servicio se hace en función del tipo de carretera (*autopista, local, colector o troncal*) y el tipo de terreno (*plano ondulado o montañoso*), para esto se utiliza el Cuadro 2.4 del MCNDC.

Al ser la carretera en diseño una vía de dos carriles, ya que así está dispuesto en el Plan Vial de la Ciudad de Cartago (Municipalidad de Cartago, 2009), posteriormente se utilizará la siguiente ecuación para estimar su capacidad de tránsito.

$$Sf_i = 2800 * (v/c) * f_d * f_w * fh_v \dots\dots Ec (1)$$

Donde:

Sf_i = Volumen de tránsito para el nivel de servicio seleccionado (*vehículos*).

2800 = Constante de flujo de tránsito ideal en ambos sentidos, en vehículos por hora (*adimensional*).

v/c = Relación Volumen/Capacidad del nivel de servicio (*adimensional*)

f_d = Factor de distribución direccional del tránsito estimado en un 60%

f_w = Factor para anchos de carril y hombros (%)

f_{h_v} = Factor de vehículos pesados según la ecuación (%):

$$f_{h_v} = \frac{1}{[1 + PT*(ET - 1) + PB*(EB - 1) + PR*(ER - 1)]} \dots \text{Ec (2)}$$

Donde:

ET, EB, ER: se obtienen del Cuadro 2.9 del MCNDC.

PT, PB, PR: corresponden a la fracción decimal de la proporción de camiones, autobuses y vehículos automóviles, en el volumen de tránsito total.

Por otro lado los valores de v/c se obtienen del Cuadro 2.5 y los valores de f_w del Cuadro 2.8, ambos del MCNDC.

Posteriormente se convierte el volumen de tránsito de la demanda horaria, que proviene de los conteos en campo, en flujo equivalente según la ecuación:

$$V = v / FHP \dots \dots \dots \text{Ec (3)}$$

Donde:

V = Flujo equivalente (vehículos)

FHP = Factor de hora pico (adimensional)

v = Demanda horaria (vehículos)

Los valores de FHP se obtienen del Cuadro 2.7 del MCNDC.

Por último este valor se compara con el S_{fi} obtenido en la Ec (1) y se selecciona el nivel de servicio adecuado.

Diseño planimétrico

En el diseño planimétrico hay cuatro factores básicos para su desarrollo: radio mínimo de curvatura, peralte o sobre elevación máxima, factores de fricción y longitudes de transición mínimas entre curvas y tangentes.

Antes de iniciar estos cálculos se debe seleccionar la velocidad de diseño para la vía; esta velocidad es la máxima con la cual un automotor se puede desplazar de forma segura en la carretera, siempre y cuando se conserven las consideraciones de diseño con que fue construida la misma. La escogencia de la velocidad de diseño se hace en función del TPDA

y el tipo de terreno, según el Cuadro 4.1 de MCNDC.

Posteriormente, se debe escoger la sección de carretera por utilizar. Esta elección se debe basar también en el cálculo de TPDA, el tipo de carretera, la factibilidad económica y el terreno entre otras cosas.

Es importante, al momento de escoger la sección vial, que se conserve en la medida de lo posible la uniformidad con las carreteras vecinas. Únicamente en casos especiales como por ejemplo un boulevard o una autopista, en donde se marcará diferencia debido a la función que debe cumplir la vía, no es necesario cumplir con esto. Para tal efecto el MCNDC establece en su apartado ejecutivo secciones típicas para carreteras basándose en su clasificación.

En relación con los cálculos, se inicia seleccionando la tasa de sobre elevación "e" y el valor de fricción lateral "f" según la sección 4.5.2 del MCNDC. Con estos datos se pueden obtener los radios mínimos y grados máximos de curvas horizontales para la velocidad de diseño seleccionada; para hacer esto se emplea el cuadro 4.1 2 del manual mencionado.

En cuanto al diseño de las curvas horizontales, se utiliza el criterio de curvas de transición, y no solamente curvas circulares, que resultan inseguras y se emplean únicamente para desarrollos residenciales donde la velocidad del tránsito no sobrepasa los 40 Km/h. El esquema de diseño de estas curvas es mostrado por la Figura 2.

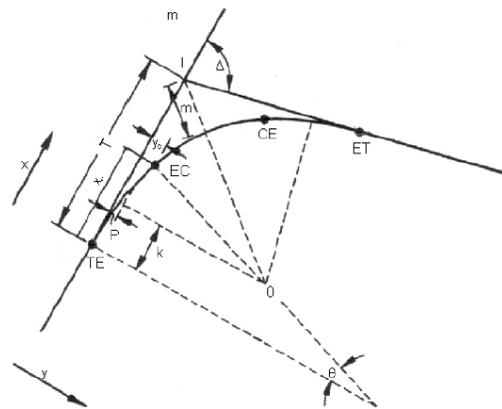


Figura 2. Esquema Curva de transición.
Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales.

Donde:

TE: unión de tangente con espiral. (X, Y)
 EC: Unión de espiral y curva circular (X, Y)
 CE: unión de curva circular y espiral (X, Y)
 ET: unión de espiral y tangente (X, Y)
 Δ : ángulo externo formado por las tangentes ($^\circ$).
 X: longitud de curva de transición (m).
 m: distancia externa u ordenada media (m).
 Consecuentemente, "P", "Yc", "K" y "T" se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$P = (x^2 / 24 * Rc) \dots\dots\dots Ec (4)$$

$$Y_c = 4 * P \dots\dots\dots Ec (5)$$

$$K = x / 2 \dots\dots\dots Ec (6)$$

$$T = K + (Rc + P) * \tan(\Delta / 2) \dots\dots Ec (7)$$

Donde:

Rc = Radio de curvatura mínimo según Cuadro 4.12 del MCNDC.

Posteriormente al diseño de las curvas horizontales, se debe revisar la distancia de visibilidad de parada (D) que se divide en: la distancia (d1) necesaria desde que se percibe la situación hasta que se aplican los frenos, y la distancia (d2) que corresponde a la necesaria desde que se aplican los frenos hasta que el automóvil se detiene. La distancia d1 se define con la ecuación:

$$d1 = 0.278 * v * t \dots\dots\dots Ec (8)$$

Donde:

d1 = Distancia de percepción (m)
 v = Velocidad de diseño (km/h)
 t = Tiempo de percepción, generalmente 2.5 (s).
 Fuente: MCNDC, 2000

Por su parte d2 se define con la siguiente ecuación:

$$d2 = v^2 / 254 * f \dots\dots\dots Ec (9)$$

Donde:

d2 = Distancia de frenado (m)
 v = Velocidad de diseño (km/h)

f = Es el coeficiente de fricción lateral (adimensional).

Por último D sería:

$$D = d1 + d2 \dots\dots\dots Ec (10)$$

Donde:

D = Distancia de visibilidad de parada (m).
 d1 = Distancia de percepción (m).
 d2 = Distancia de frenado (m)

Esta distancia se verifica en los distintos tramos de la carretera y nunca debe existir una distancia menor a la definida en este punto (Barquero, E. 2006).

Diseño altimétrico

El diseño altimétrico se conoce así pues está compuesto por líneas rectas y curvas pero en el plano vertical. La topografía cobra entonces total importancia para el diseño, ya que a partir de esta se definirán las pendientes en la ruta. Las pendientes se identifican con valores en porcentajes positivos si éstas son en subida, o negativos si son en bajada, tomando como referencia la dirección en la que va el trazo.

Según el MCNDC, se debe tratar en lo posible que los vehículos no tengan que pasar de cambios altos a bajos cada vez que enfrentan una pendiente, por lo que se debe tratar de mantener estos porcentajes en rangos entre 0.5% y un 6%, siendo el 0.5% el porcentaje mínimo permitido para una pendiente vertical. El valor del 6% se puede sobrepasar pero solo ante razones de generación de altos volúmenes de corte o relleno, y es permitido hasta un 15% como máximo para casos extremos.

Este tema se establece en el Cuadro 4.2 del MCNDC, y está en función del tipo de terreno, la velocidad de diseño y el tipo de carretera.

Por su parte, el diseño de las curvas verticales se divide en: curvas verticales en cresta o convexas y curvas verticales en columpio o cóncavas.

Para el diseño de las curvas verticales en cresta se puede, entre otros métodos, utilizar el Método del Factor "K" o tasa de curvatura vertical porcentual, cuyos valores aparecen reflejados en el Cuadro 4.21 del MCNDC. En este cuadro los

valores de “K” están en función de la velocidad de diseño utilizada.

Entonces la longitud mínima de curvatura vertical en cresta estará definida por la ecuación:

$$L = K * G \dots\dots\dots Ec (11)$$

Donde:

- L = Longitud mínima de curvatura vertical (m)
- K = Tasa de curvatura vertical (%)
- G = Diferencia algebraica de pendientes (%)

Esta longitud mínima puede ser corroborada por medio de las Figuras 4.18-4.19 del MCNDC, donde se obtiene L a partir de una relación entre este valor, el valor de G y la velocidad de diseño.

Por su lado, para el diseño de curvas verticales en columpio o convexas, se puede utilizar la misma ecuación, solamente que los valores K se obtendrían ahora del Cuadro 4.22 del MCNDC y la corroboración se haría con las Figuras 4.20 y 4.21 de dicho manual.

Se debe recordar, que una optimización del diseño altimétrico provocará de manera directa el mínimo de movimiento de tierras que se pueda realizar y con esto la disminución de costos. El diseño óptimo no siempre se construirá, pues existen otros parámetros muy importantes que también se consideran, tales como las condiciones hidrológicas, especialmente si existe la presencia de ríos (Barquero. E. 2006).

Cálculo movimiento de tierras

El cálculo del movimiento de tierra comprende la correlación entre el perfil del terreno natural y el perfil de la rasante, con sus curvaturas verticales y sus pendientes. Existirá, a partir de este corte, zonas en las que el terreno natural estará por debajo de la cota de rasante, y se conocen estas zonas como áreas de relleno, o zonas donde la rasante estará por debajo del nivel del terreno, y se tendrán zonas de corte.

El cálculo del movimiento de tierras comprenderá entonces la estimación de estos volúmenes de corte y relleno y un oportuno balance con la intención de disminuir el costo de esta actividad.

Un método utilizado para el cálculo de volúmenes es el método de cubicación en línea recta, por medio de prismoides, el cual consiste en calcular, para tramos de una distancia relativamente razonable (*dependiendo de la longitud total de la carretera por diseñar*) el área promedio de corte y/o relleno que haya en la sección inicial y final del tramo, y hacer con estas un área promedio, que luego se multiplicará por la longitud del tramo que se está calculando. Posteriormente, estos volúmenes se van corrigiendo por los factores de contracción y expansión del material.

A continuación se muestra una referencia para la estimación de estos factores de ajuste. Los volúmenes de corte se expresarán de forma positiva, mientras que los volúmenes de relleno de forma negativa.

Cuadro 2. Coeficientes de contracción y abultamiento.				
Clase de Suelo	Estado actual del material	Transferido a:		
		In situ	Suelto	Compactado
Arena	In situ	1,00	1,11	0,95
	Suelto	0,90	1,00	0,86
	Compacto	1,05	1,17	1,00
Tierra y material húmedo	In situ	1,00	1,25	0,90
	Suelto	0,80	1,00	0,72
	Compacto	1,10	1,39	1,00
Arcilla y Rocosos	In situ	1,00	1,43	0,90
	Suelto	0,70	1,00	0,63
	Compacto	1,11	1,59	1,00
Roca	In situ	1,00	1,50	1,30
	Suelto	0,67	1,00	0,87
	Compacto	0,77	1,15	1,00

Fuente: Curso Carreteras I ITCR, 2006. Microsoft Excel 200

Diagrama de masa y de transporte

Corresponde a un gráfico que representa el volumen acumulado entre corte y relleno en el movimiento de tierras de una carretera, este volumen se va acumulando entre las secciones de control realizadas y se representa en un diagrama por medio de la ordenada en ese punto en análisis. En este diagrama cambios de corte a relleno producen un máximo y de relleno a corte un mínimo, significa que después de un máximo el volumen de corte acumulado empieza a bajar, ya que teóricamente este corte se estaría empezando a utilizar en el relleno que sigue. Los excesos de corte se tendrían que transportar a una zona que se tenga destinada para este fin.

En caso de que el corte no sea suficiente para el relleno, o que el material no sea apto para este fin, se necesitaría entonces de una zona de préstamo. Si se traza una línea horizontal que corte la gráfica se representará entonces un balance entre corte y relleno.

Otro punto importante es que, por lo general, en un cartel de licitación para un movimiento de tierras se plantea la distancia máxima de transporte de material o acarreo (*esta ronda entre los 250 a 300m máximo*). La curva de transporte nos permite ver si existe un volumen de material que se tenga que acarrear una distancia mayor a la definida y, por lo tanto, que haya que pagar lo que se conoce como sobre acarreo.

Estabilidad en taludes de corte y relleno

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (*SUCS*) se puede utilizar como una estimación previa, para la construcción de taludes el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Relaciones de talud según la consistencia del suelo		
Consistencia (SPT)	Altura máxima (m)	Relación talud (h:v)
Muy firme (15-30 golpes)	24,00	0,5:1
Firme (8-15 golpes)	12,00	0,5:2
Media (4-8 golpes)	6,00	0,5:3
Blanda (2-4 golpes)	3,00	1:01
Muy Blanda (<2 golpes)	1,50	1:01

Fuente: Servicio Forestal de los Estados Unidos SFEU, 1973. Microsoft Excel 2003

Las relaciones de taludes son para suelos según su consistencia determinada con un SPT a 30 cm.

En caso de tener que rebasar las alturas descritas en el cuadro 3, será necesario realizar los estudios pertinentes y consultar a un geotecnista.

Maquinaria y equipo para movimiento de tierra

Dentro del movimiento de tierras y de la maquinaria disponible para este fin, existe una gran variedad, que le permite al ingeniero, escoger de la mejor manera, según sean sus

necesidades, posibilidades y condiciones de trabajo.

Al iniciar con la etapa de limpieza y conformación del lugar de trabajo, se tiene la posibilidad de emplear tractores de orugas que puedan cortar la capa vegetal y apilar en un sitio específico, para que otro equipo, como el cargador, lo pueda depositar en vagonetas o trailetas para su transporte.

En la etapa de corte y relleno se utilizan básicamente excavadoras que tienen un potencial más alto de corte que los back hoes; se mantiene el tractor de orugas para corte y escarificación de roca en caso de ser necesario.

En nivelación y conformación de taludes y subrasante se emplean compactadoras de rodillo, camiones con agua, tractores para

extender material y niveladoras para afinar. Para transportes a gran escala se pueden emplear camiones articulados.

Además de estas máquinas se utilizan otros equipos básicos para dirigir el movimiento de tierras, quizás uno de los más útiles en la actualidad es la estación total, que facilita los trabajos de topografía y brinda una mejor precisión, ya que todo se realiza mediante Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Por último, algo muy sencillo pero necesario, son las estacas de madera que marcan los niveles de corte y relleno, sirviendo de guía a los operadores de la maquinaria (Curso Carreteras II ITCR, 2007).

Diseño de pavimento

Un pavimento es la cara de la estructura vial, proporcionará la subbase, base y la carpeta de rodamiento (*si se trata de un asfalto por ejemplo*).

Por encima de la subrasante, esta estructura será la responsable de soportar las cargas de trabajo generadas por los usuarios. La estructura de pavimento cambiará según sea el tipo seleccionado. Se tienen actualmente pavimentos flexibles, pavimentos rígidos, mixtos o compuestos y de lastre o tierra (Manual Centroamericano de Diseño de Pavimentos, 2002).

Los pavimentos formados por lastre y/o tierra son muy utilizados en zona alejadas de los centros urbanos, zonas agrícolas o industriales, donde existen condiciones que favorecen su uso; por ejemplo, entradas a tajos, donde las cargas aplicadas son extremas ya que el equipo que circula es en su mayoría pesado; por otro lado en lugares secos donde se necesita reducir gastos y el clima ayuda a mantener el pavimento conformado. Su formación estructural es únicamente de una subrasante nivelada o una capa de lastre compactado; no posee carpeta asfáltica ni de concreto.

Por su parte, los pavimentos flexibles hechos con concreto asfáltico tienen una estructura superior formada por una subbase (*material granular como cascajo*), una base (*granular fino*) y una carpeta de rodamiento hecha con concreto asfáltico, que permite las deformaciones y lo hacen una estructura flexible. Los pavimentos flexibles soportan las cargas distribuyéndolas en las distintas capas que lo conforman.

Otro tipo de pavimento flexible son los adoquines, conformados por una subbase, una base, una capa de arena y una carpeta formada por bloques de adoquín trabados con arena entre sus juntas. Los adoquines están disponibles en el mercado en 6 ó 10 cm. dependiendo del uso que se le necesite dar al pavimento.

Posteriormente están los pavimentos rígidos que, básicamente se forman con una subbase granular y una losa de concreto, con juntas que permiten su dilatación y contracción sin que el pavimento se dañe. Estas juntas se rellenan con emulsión asfáltica para evitar el ingreso de agua a la zona de subbase. En los pavimentos rígidos el soporte de las cargas le corresponde o está a cargo en su mayoría a la losa de concreto.

Por último se mencionan los pavimentos compuestos, como por ejemplo el llamado "White topping", que consiste en una losa de concreto construida sobre un pavimento asfáltico existente; esta es una forma de reutilizar el asfalto deteriorado, ya que se aprovecha como estructura de soporte para la losa de concreto (*ejemplo avenida 3 San José*) (Curso Pavimentos ITCR, 2007).

Estimación de ejes equivalentes

Sin duda alguna los espesores de las distintas estructuras de pavimento que se pueden tener están completamente ligados con los volúmenes de tránsito, o sea con el TPDA.

Para iniciar el diseño de los espesores será necesario convertir los distintos tipos de vehículos que circularon durante la medición (*composición del tránsito*) a una unidad equivalente uniforme, que produciría el mismo nivel de daño que el volumen de tránsito mixto inicial; esto facilita la aplicación de los métodos de diseño. Es por eso que se debe iniciar aplicando el método de estimación de ejes equivalentes (ESAL'S). La carga impuesta por estos ejes equivalentes según la AASHTO es de 80 KN o 18 Kips y la conversión se hace a partir de los factores equivalentes de carga LEF (*Load Equivalent Factor*).

¿Qué datos son necesarios para aplicar este método?, inicialmente se necesita conocer el TPDA, su composición, es decir qué tipos de vehículos circularon en forma porcentual y el crecimiento porcentual de adquisición de los distintos tipos de vehículos en el mercado. Otro

factor de importancia es el índice de serviciabilidad que indica, valora el estado del pavimento y el confort que le produce al usuario al desplazarse sobre él.

El índice de serviciabilidad inicial (P_o) es igual a 4.5 en el caso de pavimentos rígidos o 4.2 si es un pavimento flexible, y el final (P_f) es igual a 2.5 para caminos de mucha importancia, según su uso, o 2.0 para caminos de menor importancia (Barquero E. 2006).

El índice de serviciabilidad y los factores equivalentes de carga se encuentran estrechamente ligados y esta relación se resume como el valor numérico que nos indica la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por un eje de 80 KN y la causada por un eje estándar en el mismo punto de la carretera. La relación se calcula como: LEF igual a número de ESAL'S de 80 KN que producen un daño dividido entre el número de ejes de 80 KN que producen el mismo daño (Manual Centroamericano para diseño de pavimentos, 2002).

Para iniciar el cálculo de ESAL'S se tendrá que asumir el índice de serviciabilidad final (P_f) y el número estructural (SN), ya que éste depende de los espesores de las capas del pavimento por diseñar.

El cálculo comienza obteniendo un valor de LEF para cada posible tipo de eje (*simple, tandem o tridem*), estos valores se obtienen de las tabla que aparecen en la Sección 3.2 del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos (MCDP) y dependerán del número estructural, el tipo de pavimento seleccionado, el índice de serviciabilidad final asumido y los pesos por eje según la Tabla 3-19 del MCDP.

Luego de obtener los valores de LEF (*uno para cada tipo de eje*) se debe estimar un factor de camión por clase de vehículo, Este factor de camión se calcula como la sumatoria de los valores LEF para el vehículo en análisis.

Continuando con el proceso se debe seleccionar el factor de crecimiento de tránsito con la tabla 3-20 del MCDP, según los porcentajes estimados para este fin. Se selecciona un factor por cada tipo de vehículo y luego se procede a aplicar la ecuación:

$$TD = TPDA * FC * 365 \text{ días / año} \dots Ec (12)$$

Donde:

TD = Tránsito de diseño (*Vehículos*).

$TPDA$ = Tránsito promedio diario anual de cada tipo de vehículo, según la composición (*vehículos*)

FC = Factor de crecimiento (%).

Luego, haciendo uso de los factores de camión calculados, se multiplica el tránsito de diseño (*para cada tipo de vehículo*) por estos factores, para obtener los ESAL'S de diseño. Se realiza la sumatoria de ESAL'S totales y por último se aplican los factores de dirección y de carril según las Tablas 3-21 y 3-22 del MCDP, respectivamente.

Diseño espesores

Para el cálculo de espesores existen varios métodos de diseño, que se han desarrollado durante el paso del tiempo por entidades, especialmente estadounidenses. El método de diseño por seleccionar depende del tipo de pavimento que se quiera, ya sea flexible o rígido.

Entre los métodos de diseño existentes se encuentran: Método AASHTO 1993, Método del Instituto del Asfalto y Método del Instituto del Concreto (Barquero E. 2007). Partiendo del hecho que por costos iniciales y previa definición del MOPT, el pavimento por utilizar en este proyecto será flexible en concreto asfáltico, se detallará a continuación el método de diseño de la AASHTO 1993 para este tipo de pavimento.

Determinación módulo resiliencia

Un parámetro básico en la determinación de los espesores para las distintas capas estructurales de un pavimento es su valor de Módulo de Resiliencia Mr.

Este valor, según la AASHTO, es una propiedad fundamental para poder definir y determinar las características de los materiales que constituyen la estructura de un pavimento. Resiliente es sinónimo de elástico y, por lo tanto, considera el momento en el que todas las deformaciones de un pavimento son recuperables (AASHTO, 2006).

La determinación de este parámetro se hace por medio de un equipo y procedimiento de laboratorio definido según AASHTO T-294-92, pero es más común realizar otros ensayos de suelos como, por ejemplo, el ensayo para determinación de CBR, y por medio de

monograma, obtener una correlación con el valor de Mr. Por ejemplo el Manual de Diseño de Pavimentos establece en su capítulo 4, que el valor de MR se puede obtener de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$MR = B * CBR \dots\dots\dots Ec (13)$$

Donde:

$B = 750$, para $CBR < 10\%$

$MR =$ Obtenido en (Mpa).

$CBR =$ Obtenido según la norma ASTM-1883.

Método AASHTO 1993

Dentro de los datos básicos para iniciar el diseño por medio del método de la AASHTO están: ESAL'S de diseño (*obtenidos anteriormente por medio del método de ejes equivalentes*), la diferencia algebraica del índice de serviciabilidad (ΔPSI), el conjunto de desviación estándar de todas la variables, generalmente 0.35% y la confiabilidad (%R), de que un diseño puede llegar al final de su período de vida en buenas condiciones (*Curso Pavimentos ITCR, 2007*).

En cuanto a los materiales a utilizar es necesario contar con: el módulo de resiliencia Mr de la capa asfáltica, base, subbase y subrasante (*en Mpa*). Todo el cálculo parte de la ecuación de espesores:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3 \dots\dots Ec (14)$$

Donde:

$SN =$ Número estructural (*adimensional*)

$a_1, a_2, a_3 =$ Son los coeficientes estructurales o de capa de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente (*adimensionales*).

$D_1, D_2, D_3 =$ Espesores de capa para la subbase, base y carpeta (*pulg*).

$m_2, m_3 =$ Son los coeficientes de drenaje para la base y subbase (*adimensionales*).

La primera parte del cálculo corresponde a la estimación del número estructural global mediante las Figura 7-1 del MCDP. Para esto son necesarios los datos de confiabilidad, R%, desviación estándar, S, estimación total de ejes

equivalentes y modulo de resiliencia efectivo para la subrasante (Mr). A partir de esto se inicia con una línea desde el valor de R%, hasta el valor de la desviación estándar, cortando la línea TL mostrada en el gráfico, posteriormente se tira otra línea partiendo del punto en el que se cortó la línea TL y pasando por el valor en la escala de ejes equivalentes cortando la línea TL2 (Figura 3), luego a partir de este punto se traza otra línea hasta la escala del módulo de resiliencia (Figura 4), llegando hasta la gráfica de número estructural, en función de ΔPSI , que está representada en curvas. A partir del punto de llegada en el gráfico se tira una línea horizontal que corte la curva de ΔPSI , que se está utilizando para el diseño, de este punto se baja verticalmente y se lee en la escala del gráfico el valor del SN_T (Figura 5).

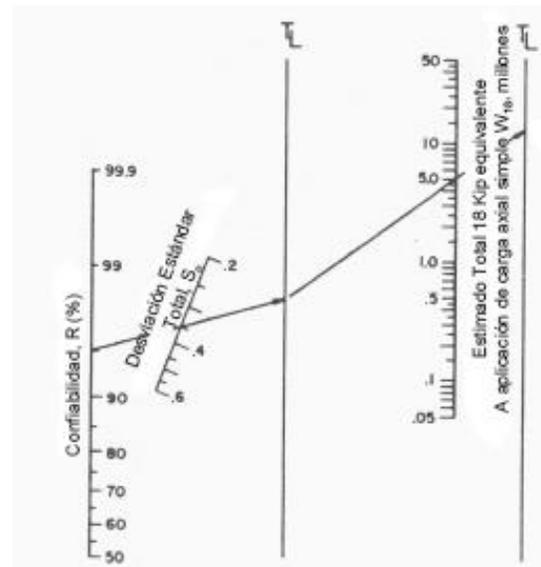


Figura 3. Etapa 1 cálculo del SN_T figura 7-1 Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. Fuente Barquero E. 2006.

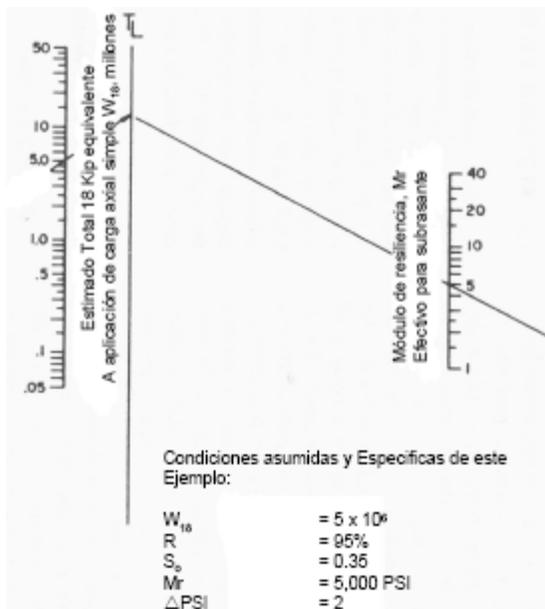


Figura 4. Etapa 2 cálculo del SN_T figura 7-1 Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. Fuente Barquero E. 2006.

del módulo de elasticidad E de la carpeta asfáltica (400000 Mpa en promedio), el valor obtenido se redondea hacia la unidad más próxima. Luego se recalcula un SN_{1^*} para este primer espesor obtenido como:

$$SN_{1^*} = a_1 * D_1 \dots\dots\dots \text{Ec (15)}$$

Con D_1 como el valor redondeado anteriormente. Continuando se el calcula un SN_2 , para el valor de Mr de la subbase. Luego se aplica la ecuación:

$$D_2 > (SN_2 - SN_{1^*}) / a_2 * m_2 \dots\dots\dots \text{Ec (16)}$$

El valor de a_2 se obtiene del Cuadro 7-5 del MCDP, en función del Mr de la base. Con esto se obtiene el valor del SN_{2^*} :

$$SN_{2^*} = a_2 * D_2 * m_2 \dots\dots\dots \text{Ec (17)}$$

Con D_2 el valor redondeado. Luego de calcular el aporte de la base, se tiene que estimar el aporte de la carpeta, se calcula el SN_3

$$SN_3 = SN_T - SN_{1^*} - SN_{2^*} \dots\dots \text{Ec (18)}$$

Posteriormente se aplica la ecuación:

$$D_3 > SN_T - (SN_{2^*} + SN_{1^*}) / a_3 * m_3 \dots\dots \text{Ec (19)}$$

El valor de a_3 se obtiene de la Figura 7-7 del MCDP, basado en el módulo de resiliencia de la sub base. Por su parte m_3 y m_2 se obtienen de la Tabla 6-2 del mismo documento, en función de la calidad de drenaje y el tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación.

Con esto el cálculo está casi completo sólo falta calcular el SN_{3^*} que aporta la base y se comprueba la siguiente ecuación:

$$SN_T \leq SN_{1^*} + SN_{2^*} + SN_{3^*} \dots\dots\dots \text{Ec (20)}$$

Si esto se cumple los espesores serán suficientes. Por último se verifican los espesores

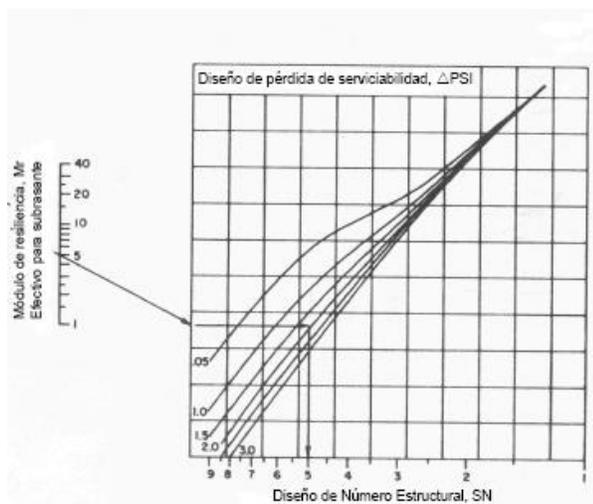


Figura 5. Etapa 3 cálculo del SN_T figura 7-1 Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. Fuente Barquero E. 2006.

Luego se repite el cálculo, pero ahora con el Mr de la base. Con este valor de SN_1 el siguiente paso es aislar los primeros términos de la ecuación de espesores $SN_1 = a_1 * D_1$ y se despeja el término D_1 en pulgadas, este se calcula dividiendo SN_1 entre el a_1 . El valor de a_1 se obtiene de la figura 7-3 del MCDP, en función

mínimos según la Tabla 7-2 del MCDP, en función de los ESAL'S de diseño.

Hidrología

El agua es el elemento base para la vida de los seres vivos, la sustancia que cubre $\frac{3}{4}$ partes del globo terrestre y se constituye por lo tanto en la sustancia más abundante en la Tierra. Es una fuerza importante que modifica constantemente la superficie terrestre, un factor esencial en la climatización de nuestro planeta (Ven Te Chow, 1994).

Para el análisis de las fases del agua en la tierra existe la hidrología, esta materia genera aplicaciones prácticas en procesos diarios como: diseño y operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento de agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación drenaje, generación de energía hidroeléctrica (Ven Te Chow, 1994). Se puede decir en resumen, que la hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su comportamiento, dentro de todas las etapas del ciclo hidrológico, su distribución en la superficie terrestre, propiedades físicas, químicas y la relación con los seres vivos, especialmente con el ser humano (Aparicio, J. 1992).

Conceptos generales

La hidrología encierra una gran cantidad de conceptos, que permiten comprender y analizar los eventos naturales tales como: las precipitaciones, las crecidas de ríos, aguas subterráneas, etc. En este capítulo se definen algunos conceptos fundamentales de hidrología básica que intervienen en el análisis hídrico y son relevantes en la aplicación de los distintos programas de cómputo para análisis hidrológico mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En primer lugar se debe definir el proceso básico que rige el comportamiento del agua en el planeta Tierra; el ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, abarca todos los caminos o laberintos por donde el agua circula en la hidrosfera y al ser un ciclo no tiene ni inicio ni final ya que sus procesos se dan en forma continua, por lo que se puede iniciar su análisis en cualquier punto (Ven Te Chow, 1994). Se dice entonces que existe una

cantidad de agua que se encuentra sobre la superficie de la tierra o en lugares cercanos como copas de árboles. Esta se evapora, como consecuencia directa de la radiación solar y la acción del viento y viaja hasta la atmósfera donde forma nubes que posteriormente se condensarán para producir una vez más las precipitaciones.

Cuando se producen estas precipitaciones existen varios caminos posibles para el agua, se puede evaporar antes de llegar al suelo, se puede quedar en las copas de árboles; si llega al suelo por su parte se puede infiltrar en el mismo o puede correr sobre el en forma de escorrentía y llegar a las corrientes de ríos y mares. En el caso de la precipitación que llega hasta las corrientes, esta puede en un porcentaje infiltrarse en el suelo, luego ser absorbida por plantas para posteriormente en el ciclo de alimentación, ser liberada por medio de transpiración. Por último, parte del agua infiltrada en el suelo formará mantos acuíferos y aflorará en perforaciones, manantiales.

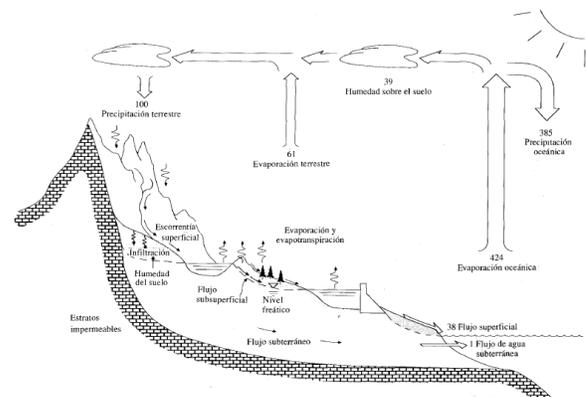


Figura 4. Ciclo hidrológico básico.
Fuente: Ven Te Chow, 1994.

El ciclo hidrológico ha tenido que enfrentar modificaciones especialmente en el tema de áreas permeables, que tiempos atrás representaban un alto porcentaje, hoy día gracias a la construcción se han modificado las redes naturales de drenaje, almacenamiento, escorrentía, recarga acuífera y calidad de flujo. (Méndez. M, 2009). Para el estudio de estos temas desde un punto de vista ingenieril, son esenciales las herramientas de análisis espacial, meteorología e hidráulica. En el caso específico de investigación en temas de drenaje, se trata de trabajar sobre un esquema resumido de las áreas de trabajo, según se muestra a continuación.

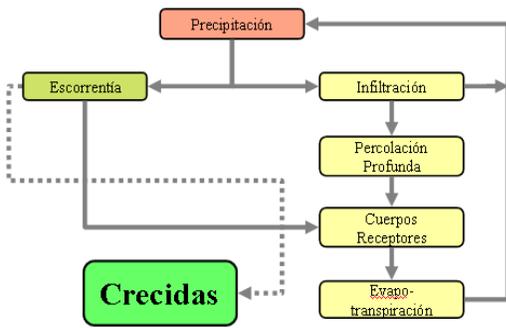


Figura 5. Esquema del ciclo hidrológico con énfasis en procesos de drenaje.

Fuente: AUTOR. 2009. Microsoft Power Point 2003

Por otro lado, así como el ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología la cuenca hidrológica es su unidad básica de estudio, por lo que se debe estudiar su concepto y algunas nociones fundamentales.

Una cuenca es un espacio físico de la superficie terrestre, en donde la precipitación cae sobre ella y tiende a ser drenada por el sistema de corrientes hacia un punto de salida ríos (Aparicio, J. 1992).

Considera esta definición, que además existe un proceso similar en lo que se conoce como cuenca subterránea cuya forma en planta es similar a la cuenca superficial y que transporta todas las aguas infiltradas durante el ciclo hidrológico. Las cuencas pueden ser endorreicas, cuando su punto de salida se encuentra dentro de los límites de la cuenca (como por ejemplo que el punto de salida es un lago) o exorreicas, cuando su punto de salida está en los límites de la cuenca, en otra corriente o en el mar.

La cuenca como elemento físico posee características geomorfológicas como: área de cuenca, tipo de suelo, orden de corrientes, pendiente de cuenca y de cauces. Una cuenca exorreica por ejemplo tiene las siguientes partes básicas, a saber: parte-aguas, que es una línea imaginaria formada por los puntos que separan una cuenca de otra, el área, que se puede considerar una proyección horizontal del parte agua que hoy se puede calcular con una buena exactitud, la corriente principal por donde se desfoga el caudal $Q(t)$ y las corrientes tributarias que aportan caudales $q(t)$, esto se muestra en la siguiente figura.

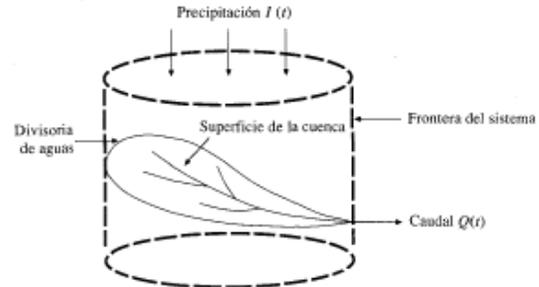


Figura 6. Cuenca y sus partes.
Fuente: Ven Te Chow, 1994.

Conocido el concepto de ciclo hidrológico y de cuenca, es conveniente hablar del agua que corre sobre o bajo la superficie terrestre y que por medio de una corriente es conducido al punto de salida de la cuenca, esto se conoce como escurrimiento. El escurrimiento a su vez se subdivide básicamente en dos clases: escurrimiento superficial (formado por escurrimiento sobre el terreno y las corrientes) y subterráneo (escurrimiento que se infiltra por debajo del nivel freático). El escurrimiento superficial es asociado a tormentas específicas, que genera una precipitación en exceso o efectiva y se conoce como escurrimiento directo, predomina para su análisis la ecuación de flujo uniforme de Manning (esta ecuación se presenta en el capítulo de diseño de canales de este proyecto), con velocidades en el flujo mayores 1 m/s y almacenamiento poco importante en comparación con el flujo subterráneo (Méndez. M. 2009).

El escurrimiento subterráneo, al correr por las capas internas de la tierra, lo hace más lentamente (tarda más en llegar a la salida de la cuenca) por lo que no se asocia a una tormenta en particular y se conoce entonces como escurrimiento base (Aparicio, J. 1994), sus características son: velocidades entre 1-100 cm/día, su ecuación base para el análisis es la ecuación de flujo de Darcy.

$$Q = k * i * A \dots \dots \dots Ec (21)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

K = Coeficiente de permeabilidad de Darcy (m/s)

A = Área de la sección transversal de la muestra (m^2).

i = Gradiente hidráulico (m/m).

El análisis de las escorrentías (*superficial o subterránea*) o también conocido como balance de masas se puede modelar digitalmente a partir de un proceso de cálculo de precipitación, función de producción (o sea según la cantidad de precipitación) y función de distribución (según sea escurrimiento base o escurrimiento directo) (Méndez. M. 2009).

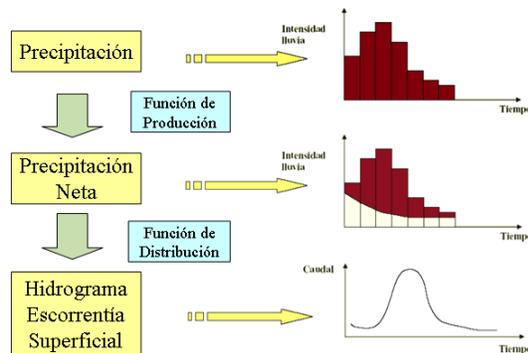


Figura 7. Proceso de modelación para análisis de balance de masas. Fuente: AUTOR. 2009. Microsoft Power Point 2003

Ahora, más importante que los tipos de escurrimiento es la rapidez de respuesta de una cuenca a un evento de tormenta en particular, ya que esto determinará la magnitud de las avenidas.

Gracias a los programas computacionales desarrollados actualmente la estimación de estos escurrimientos y especialmente el análisis de las crecidas y sus efectos, se puede realizar utilizando aplicaciones como los sistemas de información geográfica o SIG (CEDEX, 2008).

Las crecidas son aumentos de los caudales en cauces en periodos relativamente cortos, se pueden generar básicamente por tormentas importantes, o transporte de caudales. La modelación y el análisis de crecidas tiene dos objetivos básicos: realizar simulaciones que permitan predecir el comportamiento de cauces y corrientes antes de los eventos y utilizar los datos obtenidos (*caudales de diseño*) para dimensionar las obras hidráulicas que permiten su manejo. A partir de las simulaciones se pueden analizar simultáneamente distintos puntos de la red de drenaje y así administrar de la mejor manera los

recursos que tenemos a disposición (Blue Book, 2005).

En cuanto a los caudales de diseño, el análisis mediante SIG permitirá variar los escenarios cuantas veces sea necesario y observar el comportamiento aplicando distintos periodos de retorno.

Un aspecto importante que se puede lograr es delimitar zonas de riesgo de inundación e incluir estos datos en los planes reguladores, para uso de suelo de las distintas municipalidades (Méndez. M. 2009).

Función producción

Para el análisis de crecidas se requieren algunos datos fundamentales como: Datos estadísticos de caudales medios, en estaciones de aforo (*datos meteorológicos*) y simulaciones del proceso de precipitación escorrentía de una forma más o menos compleja.

Datos meteorológicos como precipitación se miden gracias a instrumentos como el pluviómetro, que es básicamente un recipiente abierto con una escala en la cual se lee la precipitación caída en un intervalo de tiempo que el observador conoce. Esta medición se hace en mm/hr. Otra opción es utilizando un pluviógrafo, que es un poco más detallado y registra precipitación y tiempo simultáneamente, sobre una escala, algo similar a lo que hace un sismógrafo (IMN Costa Rica, 2000).

Para ir un poco más profundo al analizar la precipitación se consideran varios parámetros como: la precipitación acumulada (mm), la duración de la tormenta que la produjo (*min*) y su correlación conocida como intensidad (*mm/hr*), además del período de retorno de la tormenta, basándose en registros estadísticos y la distribución de intensidades durante toda la tormenta (Villón, M. 1983).

Uno de los parámetros mencionados anteriormente es la intensidad de tormenta y su variabilidad durante el período de precipitación. Esta variabilidad se puede describir gracias al uso del hietograma, que es un gráfico de barras, con una curva, que expresa la precipitación en función del tiempo $P(t)$. Normalmente un hietograma se refiere a un día o una tormenta concreta.

Ya que los hietogramas son muy difíciles de construir, se utilizan gráficos de curvas IDF o intensidad, duración y frecuencia. Estas curvas

se obtienen al unir puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, para un mismo período de retorno (Blue Book, 2005).

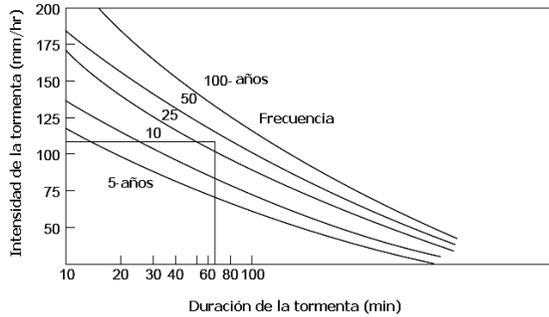


Figura 8. Curvas IDF. Fuente. (Blue Book. 2005) Microsoft Excel 2003.

En la figura 8, cada curva representa una correlación entre intensidad versus tiempo, para un determinado periodo de retorno. A diferencia de un hietograma las curvas IDF son una distribución temporal de la precipitación, estiman las máximas intensidades posibles que se pueden tener para diversas duraciones de tormentas en períodos de retorno dados.

Para el análisis de tormentas en Costa Rica, se cuenta con estudios realizados por profesionales de la Universidad Nacional, más específicamente por el Programa Morfoclimatología Aplicada y Dinámica Exogena (MADE), de la Escuela de Ciencias Geográficas, de esta universidad. A través de los estudios realizados han logrado obtener curvas IDF para las distintas provincias de Costa Rica. Por ejemplo a continuación se muestran las curvas IDF para la ciudad de Cartago, realizadas a partir de la metodología propuesta por esta institución.

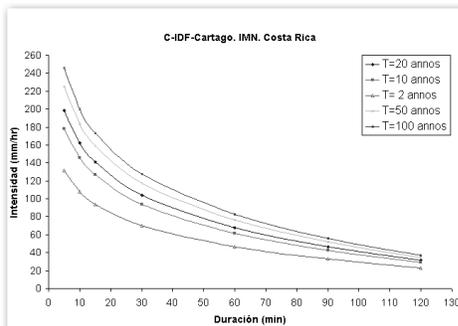


Figura 9. Curvas IDF, para la ciudad de Cartago en distintos periodos de retorno. Fuente: AUTOR, 2009. Microsoft Excel 2003.

Estas curvas se generan a partir de la metodología de Aparicio propuesta por el MADE, basándose para Cartago en la siguiente ecuación:

$$I = 156.89 - 28.46 * \ln(D) + 42.2 - 8.07 * \ln(D) * \ln(Tr) \quad \text{..Ec (22)}$$

Donde:

I = Intensidad de lluvia (mm/hr)

D = Duración del evento (min.)

Tr = Tiempo de retorno (años)

A partir de estas curvas se puede aplicar el método más conocido para la generación de hietogramas, que son los hietogramas sintéticos. En el campo de hietogramas sintéticos se pueden mencionar los siguientes: Hietograma Triangular del Soil Conservation Service de los Estado Unidos (SCS), Hietograma Bloques Alternos, Hietograma de Chicago, Curvas de Huff.

Por ejemplo, el hietograma Triangular del Soil Conservation Service de los Estado Unidos o SCS asume que la distribución de la intensidad se puede representar de forma triangular y que conociendo la duración de la tormenta (*igual al tiempo de concentración*) y la intensidad máxima esperada a partir de la curva IDF de interés, se lograría estimar la precipitación acumulada (*a intensidad constante*) a lo largo de la duración de una tormenta. Si ya se conoce el tiempo en que se produce la máxima intensidad (*tiempo pico*), se podrá determinar con éste el valor de la intensidad esperada, y los demás valores se podrán calcular mediante interpolación (Méndez. M. 2009).

Este tiempo pico es además función del coeficiente de avance (r) que varía entre 0.3 y 0.5 y se calcula como la relación que existe entre el tiempo antes del pico con respecto a la duración total. Un valor de $r=0.5$ corresponde a un tiempo pico que ocurre en la mitad de la tormenta y un valor de $r<0.5$ tendrá el pico antes de la mitad de la tormenta (Ven Te Chow, 1994).

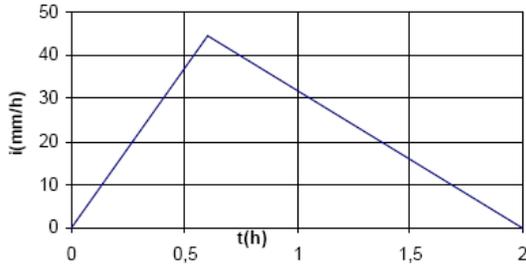


Figura 10. Ejemplo de hietograma triangular del SCS
Fuente: CEDEX, 2000.

En el caso del Hietograma Bloques Alternos, este se basa en intervalos de tiempo elegidos, para tormentas con una duración conocida; asume que el conjunto de intensidades de las curvas IDF, se distribuyen de manera que el valor mayor se coloca en el centro del gráfico y a su derecha e izquierda se van colocando el resto de valores manteniendo el orden decreciente, según lo muestra la siguiente figura:

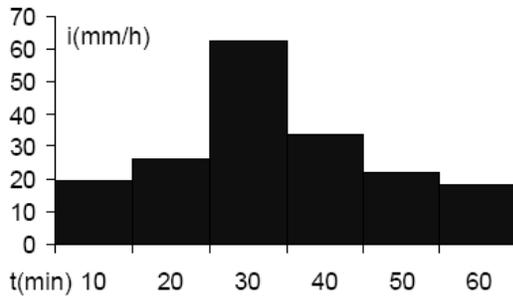


Figura 11. Esquema de organización de conjunto de intensidades según el método de bloques alternos.
Fuente: CEDEX, 2000

Mediante el proceso descrito anteriormente se llega a obtener un gráfico de bloque similar al mostrado en la figura 11 y uniendo los puntos medios del extremo superior de cada bloque se genera la curva o el hietograma representado con la figura siguiente.

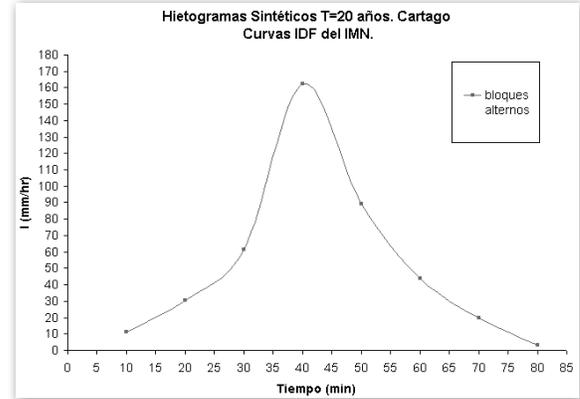


Figura 11. Hietograma construido a partir del método de bloques alternos. AUTOR, 2009. Microsoft Excel 2003.

Función de distribución

Luego de determinar la producción generada, según lo explicado en el apartado anterior, se debe proceder a analizar en qué medida ésta se convierte en escurrimiento directo, qué porcentaje queda atrapado en la vegetación, qué se evapora y, en fin, todas las posibles opciones que se dan dentro de este fenómeno. No todas las metodologías que se conoce hacen estas estimaciones de la misma manera, algunas consideran un proceso integral, mientras que otras pueden únicamente considerar algunas variables. A continuación se describen dos métodos para representar este planteamiento.

Método racional

Se asume un hietograma neto uniforme, donde el valor de la intensidad "i" permanecerá constante durante la tormenta, esto se hace considerando solamente aquella precipitación que produce escorrentía superficial, o sea el valor de i será un porcentaje de la escorrentía total (*superficial+subterránea*).

Para expresar la escorrentía neta se utiliza un coeficiente "c", que está relacionado con el tipo de superficie donde se produce la escorrentía directa y su permeabilidad. El método racional aplica para cuencas menores a 3000 km², con tiempos de concentración menores a 24 h.

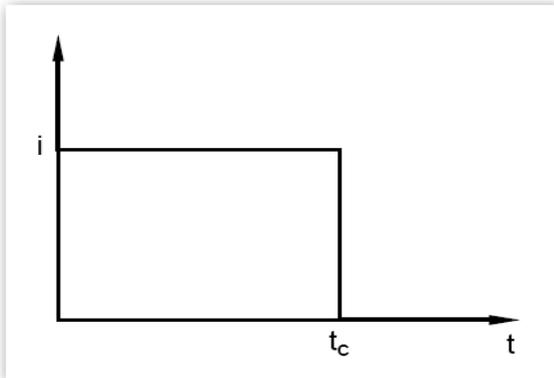


Figura 12. Hietograma para el método racional.
Fuente: Méndez. M. 2009.

El caudal pico en este método se calcula según la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C * I * A}{360} \dots\dots\dots Ec (23)$$

Donde:

- C = Coeficiente de escorrentía ($C < 1$)
- I = Intensidad de la precipitación real de duración igual al tiempo de concentración y de periodo de retorno T (mm/hr).
- A = Área de la cuenca (Km^2)
- Q = Caudal punta de la crecida de período de retorno T (m^3/s)

Método del SCS

El método del Servicio de Conservación de Suelos establece una relación entre la precipitación, la retención y la precipitación efectiva o escorrentía. El parámetro más importante de la tormenta es su altura acumulada está por encima de su intensidad.

Se asume así que la capacidad total de infiltración del suelo puede encontrarse en una familia de Números de Curva (CN) tabulados, los cuales han sido obtenidos de forma experimental a través de varias décadas.

Algo muy importante, y que diferencia este método, con respecto al método racional, es que los valores de CN agrupan todas las abstracciones, no solamente consideran la infiltración (CEDEX, 2002).

Los parámetros de entrada para este método son: el número de curva CN , la conductividad hidráulica del suelo (*utilizada para estimar un tiempo de separación mínimo entre los distintos eventos de lluvia*), y la condición de humedad antecedente.

Consecuentemente, la escorrentía en términos de columna lineal, queda definida como:

$$Q = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S} \dots\dots\dots Ec (24)$$

Donde:

- Q = Escorrentía directa (mm)
- P = Precipitación (mm)
- S = Infiltración potencial máxima (mm) según la ecuación:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \dots\dots\dots Ec (25)$$

Donde:

El número de curva CN está en función del uso de suelo, condición hidrológica, tipo de suelo y humedad antecedente y puede variar de 0 hasta 100. La condición hidrológica es definida según tres posibles niveles de cobertura vegetal en el área de la cuenca. Buena: $> 75\%$, Regular: entre 50 y 75% y Pobre: $< 50\%$. Por su parte el tipo de suelo se divide de acuerdo con su capacidad de saturación y conductividad hidráulica vertical. La condición hidrológica antecedente define el estado de humedad de la cuenca 5 días antes de la tormenta. Las tablas definidas por el SCS se limitan a una condición de humedad media, aunque existen ecuaciones que permiten calcular otros escenarios. La condición de humedad promedio asume pendientes de 5% y, al igual que con la condición de humedad, existen ecuaciones que permiten ajustar los valores de CN para otras condiciones de pendiente (Méndez. M. 2009).

Tiempo concentración

Luego de estimar las funciones de producción y la distribución de las precipitaciones, el siguiente

parámetro en importancia es el Tiempo de Concentración (TC)

El tiempo de concentración es el tiempo para el cual toda la cuenca empieza a contribuir con el caudal de salida o escorrentía directa, o sea el tiempo de flujo desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Ven Te Chow, 1994). El tiempo de concentración se verá afectado por los siguientes factores: la longitud que recorre la escorrentía sobre la superficie (L); esta debe ser medida sobre la línea de mayor pendiente, desde el extremo de la cuenca de drenaje hasta el canal o conducto que la va a drenar. Por otro lado la pendiente promedio de la superficie (s), ya que el valor del TC es inversamente proporcional al valor de "s". Por último están la rugosidad de la superficie, que afecta directamente la velocidad con la que se desplaza el agua, (*a una mayor rugosidad se tendrá una menor velocidad en el recorrido*) y la profundidad de la corriente (y), este valor no es característico de la cuenca, pero sí depende de la precipitación (Blue Book, 2005).

El tiempo de concentración se compone del tiempo de entrada, que es el tiempo que tarda la escorrentía en recorrer la distancia "L", y el tiempo de tránsito, que es el tiempo que transcurre desde que el cuerpo receptor capta el agua hasta el punto de entrega de la cuenca o punto de salida (Méndez. M. 2009).

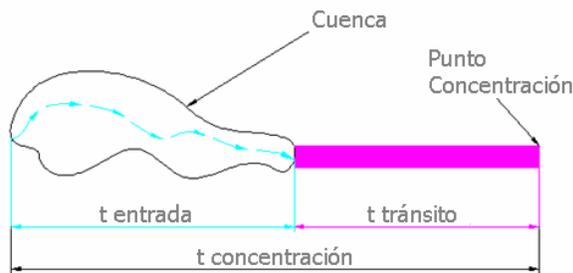


Figura 13. Ilustración del tiempo de concentración.
Fuente Méndez M. 2009

Existen diversos métodos empíricos para la estimación del tiempo de concentración, dos de los más utilizados son Kirpich y el método del SCS. La ecuación de Kirpich se presenta a continuación:

$$TC_{Kirpich} = 0.0195 * (L^3 / H)^{0.385} \text{..Ec (26)}$$

Donde:

$TC_{Kirpich}$ = Tiempo de concentración (s).

L = Longitud máxima de recorrido (m)

H = Diferencia de elevaciones entre los puntos iniciales y finales (m)

Por su parte la ecuación del SCS es:

$$TC_{SCS} = \frac{0.02872 * L^{0.8} * [(1000 / CN) - 9]^{1.67}}{S^{0.50}} \text{..Ec (27)}$$

Donde:

TC_{SCS} = Tiempo de concentración ($min.$)

L = Longitud hidráulica de la cuenca (m) la cual se define mediante la expresión empírica.

$$L = 110 * A^{0.6} \text{.....Ec (28)}$$

A = Área de la cuenca (Ha)

S = pendiente promedio de la cuenca (%)

CN = Número de curva para condición de humedad promedio.

Análisis espacial en hidrología

Como se describió en los capítulos anteriores, luego de analizar la función de producción y la función de distribución, se busca determinar el valor del tiempo de concentración para el sistema. Para realizar este proceso de la mejor manera, es necesaria toda una parametrización física de la cuenca y su relación con los mecanismos de precipitación versus escorrentía. Es por esto y por la complejidad del proceso que se debe recurrir a sistemas de análisis espacial ligados a SIG raster, capaces de describir la distribución espacial y temporal de las variables hidrológicas, geomorfológicas, topológicas, e hidrometeorológicas del sistema.

En los estudios hidrológicos mediante análisis espacial se trabaja con modelos de cuencas, Digital Elevation Models (DEM 's), Response Units Hydrologicals (HRU 's), y redes, entre otras fuentes de información, por lo que es vital generar un estudio espacial combinado y así maximizar las posibilidades de análisis y la obtención de resultados. En este capítulo se

considerarán las bases del análisis espacial combinado utilizando el software MapWindow.

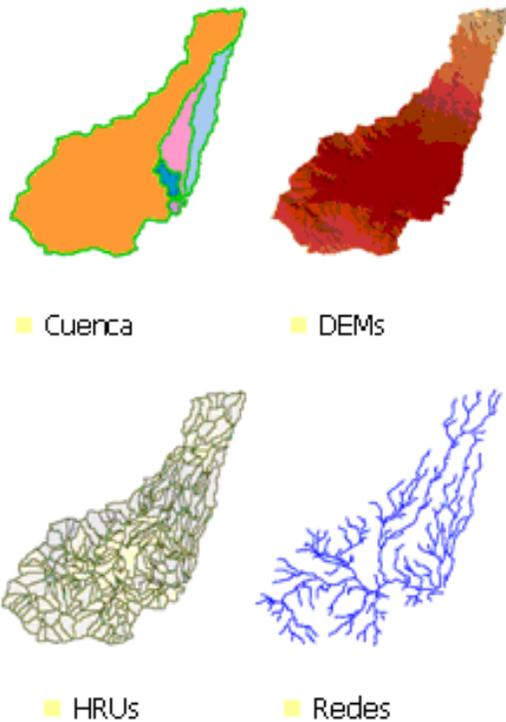


Figura 14. Fuentes de información en el análisis espacial. Fuente: Méndez. M. 2009



Figura 15. Análisis espacial combinado. Fuente: Méndez. M. 2009.

La posibilidad que ofrece el análisis espacial para hidrología es que puede abarcar de la mejor manera toda la variable hidrológica, se integra en este análisis aspectos de cantidad y calidades de aguas, características del suelo, humedad, precipitaciones, mediciones de equipos y estaciones metereológicas, detección remota mediante sistemas satelitales y fotografía aérea.

Toda esta información es necesaria para la toma de decisiones mediante GIS y por eso es indispensable su constante actualización y conservación, mediante bases de datos. Estas bases de datos representan una colección de informes con una referencia espacial que se comporta como un modelo representando la realidad. Cada dato de esta información tendrá dos características claves: primero los datos espaciales que incluirán su posición geográfica y la posibilidad de saber qué es, y por otro lado sus atributos o propiedades que refieran dónde está.

La formación de bases de datos a partir de información espacialmente referida, se da gracias a la existencia de dos esquemas para su codificación: esquema de Objetos discretos y esquema de Objetos continuos (Méndez. M. 2009).

Esquema de objetos discretos

Para los elementos discretos o esquema vectorial se utilizan elementos vectoriales primitivos de carácter finito. Estos elementos son básicamente: puntos o nudos con coordenadas (x, y, z) Estos se utilizarían para representar estaciones de medición, pozos o puntos de muestreo. Líneas, que van de un punto a otro, se utilizan vértices para definir su geometría, y representar así caminos, contornos y tuberías. Polígonos, se utilizan para generar objetos que no pueden representarse a partir de líneas y puntos, como por ejemplo: unidades de uso, campos agrícolas, lagos.

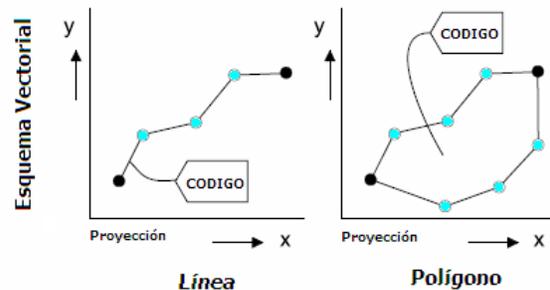


Figura 16. Esquema vectorial para la línea y el polígono, como bases para el esquema de codificación de los objetos discretos. Fuente: Méndez. M

Los formatos utilizados para manejar los datos vectorialmente son: Shape (*forma*) con extensión *SHP, que es fichero de programación que almacena información generada con sistemas de información geográfica. Tiene una estructura simple y versátil, pueden contener una única clase de datos vectoriales (*puntos, líneas, polígonos*). El formato Coverage (*cobertura*) por su parte es el formato de ARCInfo, y la diferencia con respecto al formato Shape es básicamente que pueden haber líneas y puntos en el mismo "coverage", no así puntos y polígonos. CAD es la extensión de archivos creados a partir de los programas de diseño asistido por computadora (Computer Aided Design) y ASCII que es el acrónimo para "American Standard Code for Information Interchange" (Peña. J. 1999).

Esquema objetos continuos

Por otro lado, el análisis de los objetos continuos se fundamenta en un esquema raster. Mediante el análisis geométrico de celdas o píxeles, se parte de un origen conocido y se organizan las celdas formando filas y columnas. La idea básica es que cada celda sea del mismo tamaño conocido; por lo general se utilizan celdas cuadradas pero pueden ser rectangulares.

La celda tendrá un atributo numérico, que para la computadora será solamente un valor. El significado se lo da el usuario dependiendo de lo que esté analizando; por ejemplo, altura, luminosidad, precipitación, salinidad, dureza, etc.

Al ver una unión de estas celdas en columnas y filas se estará formando a la vez una malla. El tamaño de esta malla estará definido por su extensión, espaciamiento y "no data value"; los valores descritos pueden ser decimales o enteros.

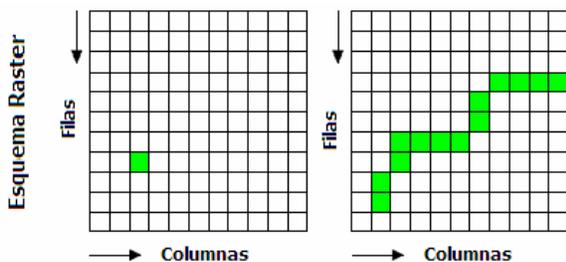


Figura 17. Representación de las celdas o píxeles formando columnas, filas y Mallas. Fuente Méndez. M.

El valor dado a la celda se mantiene uniforme e isotrópico en toda la extensión de la misma. Al crear una malla con pocas celdas se estará limitando la representatividad del atributo seleccionado, será necesaria entonces una malla formada por una gran cantidad de celdas para generar un modelo más representativo. Esta densidad de celdas, por ejemplo en un DEM (*Digital Elevation Model*), irá en función de la topografía que se esté analizando, ya que no es igual si el terreno tiene una pendiente del 1% o si tiene una pendiente del 12%. Se debe analizar por tanto y escoger la malla adecuada para cada modelo.

Algebra raster

En el algebra del proceso raster, habrá mallas de entradas de datos que generarán, por su interacción celda por celda, mallas de salida de datos, como se representa a continuación.

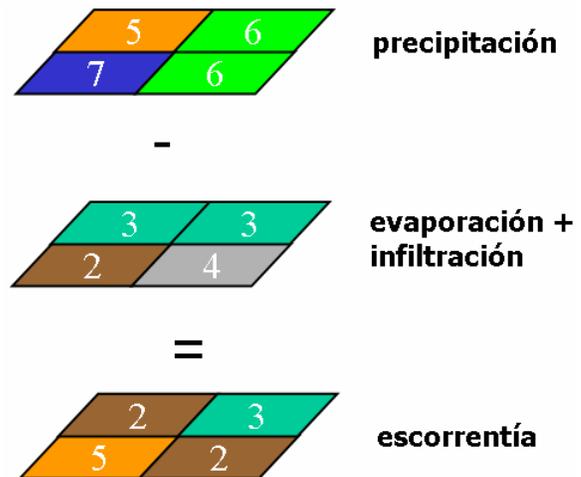


Figura 18. Algebra del proceso raster. Fuente Tarbaton. 2009.

En la figura 18, se muestra la interacción de mallas celda por celda. Se observa como la celda con valor numérico de 5 en la malla de precipitación, interactúa con la celda de la malla Evaporación+transpiración que posee su misma ubicación (*valor numérico 3 a la izquierda*), se aplica la instrucción matemática $\text{precipitación} - (\text{evaporación} + \text{transpiración}) = \text{escorrentía}$ para

todas las celdas, generando la malla Escorrentía, que en este caso representa la malla de salida.

La aplicación del álgebra raster a la hidrología, permite crear gran variedad de capas temáticas, para análisis de: intensidad de precipitación, uso de suelo y cobertura, escorrentía con base en el modelo hidrometeorológico, concentración y propagación hidráulica.

La generación de estas capas raster temáticas se da a partir de métodos de interpolación para raster.

Pendiente topográfica (slope)

La pendiente puede ser representada por tres formas básicas: por medio de coordenadas rectangulares con un vector y sus componentes (S_x, S_y), por coordenadas polares con la magnitud (*slope*) del vector y su dirección (aspecto) (S, α) o por "Surface derivative" ∇z ($dz/dx, dz/dy$). Para determinar pendiente existe el método D8 que busca definir pendientes topográficas (*slope*) basándose en lo que se conoce como "la dirección de descenso rápido" (Direction of Steepest Descent), o sea se busca la celda más próxima con el parámetro más bajo, generando una caída más rápida con la mayor pendiente.

El modelo D8 aproxima la dirección de flujo mediante 8 posibles direcciones discretas (ya que una celda puede estar rodeada por máximo 8 celdas más).

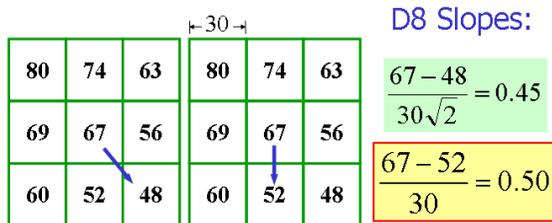


Figura 19. Método D8 para determinar pendientes topográficas. Tarbaton, M.

Se observa en la figura 19 como el proceso en la malla de la izquierda inicia en el valor 67 y luego busca el valor numérico más bajo en la malla, que en este caso es el valor numérico 48, generando así la mayor pendiente posible con un $\Delta Y = 19$ y un $\Delta x = 30\sqrt{2}$ (según triángulo rectángulo especial 45, 45, 90). De igual manera se da el proceso en la malla de la derecha con un

$\Delta Y = 15$ y un $\Delta x = 30$ (este delta X se debe a que ahora la dirección del movimiento es sobre un cateto del triángulo especial 45, 45, 90).

Por otro lado existe también el método del Algoritmo D_{∞} de Tarbaton. Este algoritmo optimiza el modelo D8 ya que incluye una variable angular de aspecto con respecto a las celdas raster.

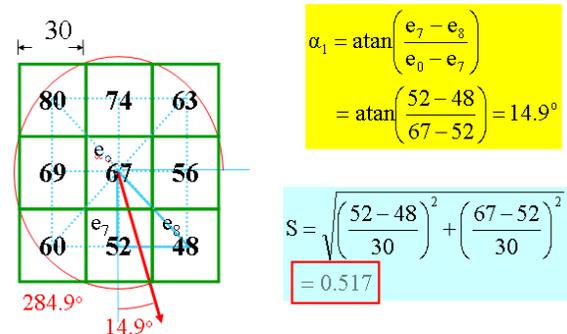


Figura 20. Ecuaciones y ejemplo del algoritmo D_{∞} de Tarbaton. M.2009

Se observa en la figura 20 las ecuaciones y el proceso desarrollado mediante el algoritmo D_{∞} de Tarbaton, además del nuevo parámetro o variable angular de aspecto que se incluye. (Méndez, M. 2009).

Delimitación de una cuenca hidrográfica

Al analizar una cuenca existe la posibilidad de considerarla como un todo o tomar las subcuencas y considerar la variabilidad y los diversos grados de aportación (área, precipitación, escorrentía) de cada una de las HRU. La idea es generar un análisis que sea representativo de la realidad hidrológica y de los procesos que ocurren. Esto se puede desarrollar de igual manera utilizando software como el MapWindow Gis.

Conceptos básicos

Topografía y drenaje: El proceso inicia con el flujo de agua que esculpe por así decirlo el terreno. Por medio de erosión y sedimentación del material definen su topografía (considerando además que existen otros procesos naturales que

definen la topografía como sismología y vulcanología).

Al existir una topografía definida, esta marcará el rumbo de los nuevos flujos, la escorrentía y los nuevos procesos de acumulación de material producto derivados de estas acciones. Hidrológicamente hablando la cuenca es considerada la unidad fundamental del análisis y será definida por estos procesos y la topografía generada en ellos. Al analizarse la cuenca se obtiene información de su extensión, forma, parteaguas y puntos de concentración, conceptos que se analizaron anteriormente.

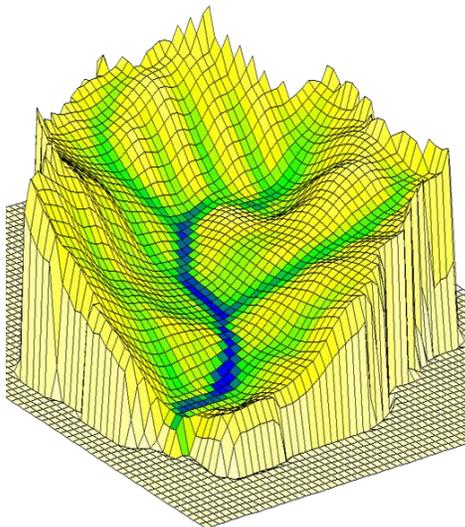


Figura 21. Modelación de la topografía debido a los flujos de agua. Fuente: MapWindow GIS. M 2009.

Gracias a la visión global que generan los DEM'S es posible, a partir de ellos, identificar las características que definen la cuenca y así, parametrizarla.

Entre los aspectos más importantes para este proceso están: acondicionamiento o eliminación de concavidades, ya que estas representan un problema para los sistemas de información global. Las concavidades pueden ser naturales (*ejemplo embalses*) o artificiales (*generadas en los DEM's*). Desde el punto de vista de las celdas, son un grupo de celdas sin un gradiente de drenaje inmediato, que pueden provocar que parte del modelo de drenaje quede aislado del análisis; es por esto que la eliminación de estas concavidades debe ser el primer paso al trabajar con DEM's.

Para este propósito se puede incrementar la elevación del punto más bajo, hasta tener un

gradiente que genere el drenaje; posteriormente hay que buscar la dirección de flujo por medio de algoritmos como el D8, determinando las líneas de flujo como la línea de máxima pendiente en la malla de direcciones.

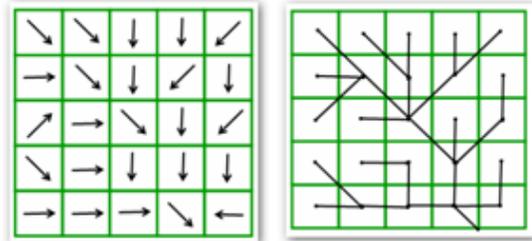


Figura 22. Malla de direcciones de flujo en capa raster. Fuente: ESRI. M. 2009

Otro tema importante son las acumulaciones de flujo. Se calcularán por medio del D8/TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), en términos de una acumulación por celda; luego se determinarán áreas tributarias que serán entregadas en punto o vertientes, se calcula el número de celdas que drenarán hacia este punto y se determina un trazo general para las líneas de flujo.

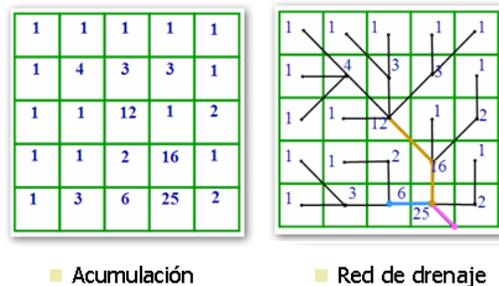


Figura 23. Construcción de las líneas de flujo y puntos de acumulación. Fuente: ESRI ArcINFO.

Luego de definir los cauces que componen la red de drenaje, se debe definir un valor de celdas mínimo para que se presente acumulación o no, es decir de este número de celdas en adelante se formará un punto de acumulación. Esto se conoce como umbral de acumulación y se establece una red de drenaje para ese valor de umbral. Para la definición del valor de este umbral no existen reglas específicas, sin embargo se debe tratar en la medida de lo posible de respetar la red de drenaje natural observada, analizar la escala, el

grado de detalle deseado y el propósito de la investigación.

Una referencia que se puede utilizar para estimar el número de umbral es utilizar un número con dos órdenes de magnitud por debajo del área en análisis, sin embargo es mejor analizar cada caso específicamente. Los umbrales pequeños generan más tiempo de análisis, los umbrales grandes pueden dejar por fuera la variabilidad a menor escala (Méndez. M. 2009).

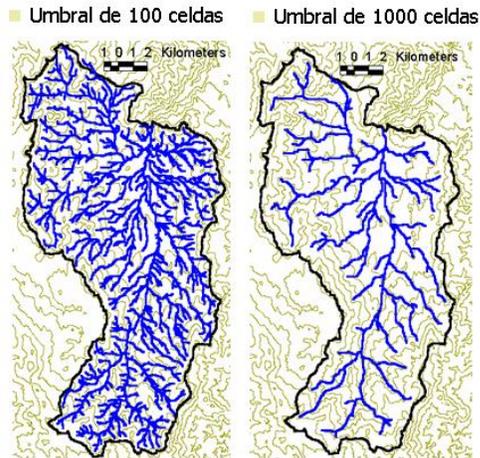


Figura 24. Variaciones con el umbral de drenaje Clasificación de Cauces. Fuente Méndez. M. 2009.

Una vez generado los rasters de acumulación, se crea, a través de TauDEM, un raster de clasificación de cauces siguiendo los principios de la ley de Strahler. Las reglas base para aplicar esta ley son: los segmentos que no tienen cauces tributarios se definirán como de primer orden, posteriormente si se unen dos corrientes de orden “n”, se generará una corriente de orden “n+1” y por último, al encontrarse dos corrientes de distinto orden, prevalecerá la corriente con el orden mayor (Artur. N. 1989).

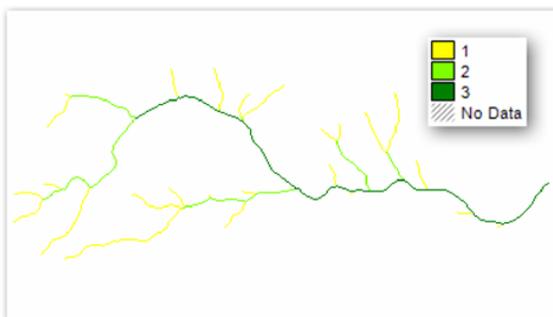


Figura 25. Aplicación de la Ley de órdenes de Strahler. Fuente: Méndez. M.2009

En la figura 25 se observa como se define en este ejemplo una corriente de tercer orden (*verde oscuro*), esta se va formando a partir de la unión de corrientes de primer orden (*amarillas*) y en los casos donde las corrientes de orden 1 se encuentran con la corriente de orden 2 (*verde claro*) u orden 3, se mantiene el orden de la mayor.

Posteriormente a este proceso de clasificación de cauces, la capa raster se vectoriza y se convierte en una nueva capa shape con estos atributos más los atributos del análisis espacial. La generación de esta capa shape se produce a través de líneas que pasan por los centros de las celdas en la capa raster y los puntos de concentración; se ubican en las celdas de salida de cada área tributaria.

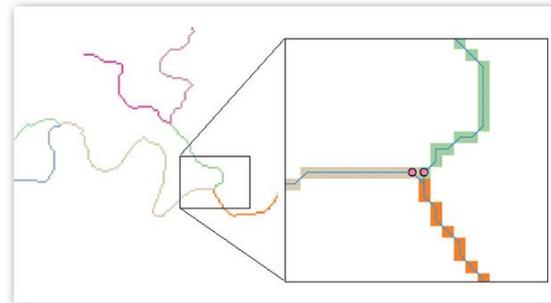


Figura 26. Generación de líneas en las capas shape a partir de los centros de celdas raster. Fuente Méndez M. 2009

Generación vectorial

En el análisis espacial raster se generan características y geoprocursos que pasarán posteriormente a ser atributos de las capas vectoriales que se desarrollen (*capas *SHP*), estos atributos son compatibles con modeladores hidráulicos similares al SWMM, lo que permite analizar y proponer redes de drenaje artificiales para las áreas tributarias que se están interviniendo.

Las áreas tributarias son elementos fundamentales en la generación del estudio hidrológico de una cuenca. En este caso se generan a partir del umbral de área y la capa raster generada en el análisis de la acumulación. La capa raster de áreas tributarias estará limitada por las características físicas del terreno. Cada

área tributaria tendrá una clase y ésta se define en relación con la capa vectorial de cauces que la drenan. Posteriormente, al igual que en el caso de la capa de cauces, se genera luego una capa vectorial de áreas, con los atributos del análisis espacial.

En resumen se generarán subcuencas que nacen de puntos de concentración en la parte inferior de las cuencas. La unión de subcuencas conduce a la generación de la cuenca hidrológica principal (Méndez. M. 2009).

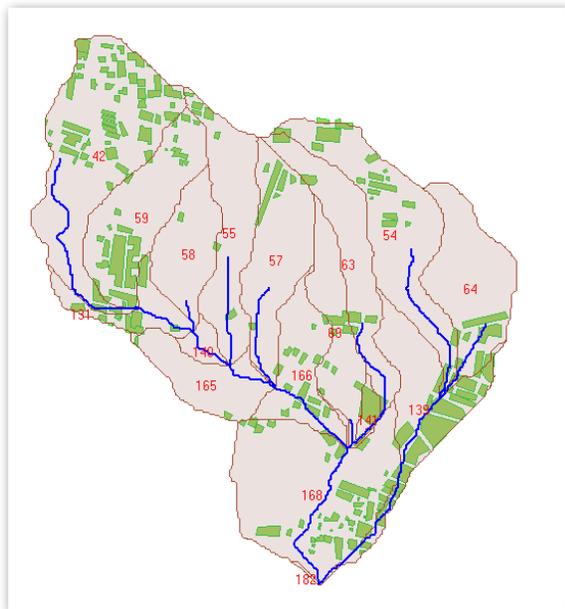


Figura 27: Formación de subcuencas a partir de puntos de concentración. Fuente Méndez. M. 2009

En las siguientes figuras se muestran ejemplos de los atributos que describen las capas shape para la HRU's y la red de drenaje.

Field Name	Field Value
PolygonID	42
StreamLink	76
StreamLen	690
DSNodeID	-1
DSWSID	131
US1WSID	-1
US2WSID	-1
Area_M	179118.75
Area_Acre	44.261138718
Area_SqMi	0.0691580292
AveSlope	6.83759247452879
Area_km2	0.179
Perim_km	2.462

Figura 28: Tabla de atributos para la capa shape del polígono número 42 mostrado en la figura anterior (HRU's). MapWindow GIS 2009

Field Name	Field Value
LINKNO	76
DSLINKNO	103
USLINKNO1	-1
USLINKNO2	-1
dsNodeID	-1
Order	1
Length	690.8
Magnitude	1
DS_Cont_Ar	179125
Drop	18.7
Slope	2.7071280917
Straight_L	507.7
US_Cont_Ar	63650
WSNO	42
DOUT_END	3948.2
DOUT_START	4639
DOUT_MID	4293.6
ElevLow	1374.6
Elevhigh	1393.3
MeanWidth	0.4596998268
MeanDepth	0.0653431056
DSAreaAcre	44.262683125
DSAreaSqMi	0.0691604423
USAreaAcre	15.72823325
USAreaSqMi	0.0245753644

Figura 29. Tabla de atributos para un de los ramales de drenaje que conforman la red, mostrada en la figura 27. MapWindow GIS 2009

MapWindow Gis

Se debe iniciar definiendo de una forma general el concepto que abarca MapWindow. Sus diseñadores pensaron en un Sistema de Información Geográfica programable que pudiese apoyar el análisis y la visualización de datos geoespaciales; además de que fuere posible utilizarlo como una herramienta que sirva en la investigación de los proyectos de ingeniería, sin la necesidad de que los usuarios se conviertan en expertos de los SIG (*sistemas de información geográfica*).

Este programa le permite al usuario, interactuar en una interfaz gráfica de mapas superpuestos, como por ejemplo se pueden utilizar mapas del USGS (*United States Geological Survey*). MapWindow es un software de código abierto, es libre de utilizar y de redistribuir. El software base incluye toda una serie de plug-ins necesarios para su funcionamiento y uno de sus valores más importantes es que éstos se están creando

constantemente, por lo que el programa es extensible.

En cuanto a las bases de datos GIS, estas pueden estar disponibles dependiendo de las posibilidades de los distintos países, por lo que se debe consultar con la entidad responsable del manejo de esta información en cada región del mundo.

Inicio interfase MapWindow

En el inicio del programa MapWindow y al cargar algún proyecto se mostrará una interfase como la que se muestra en la figura a continuación:

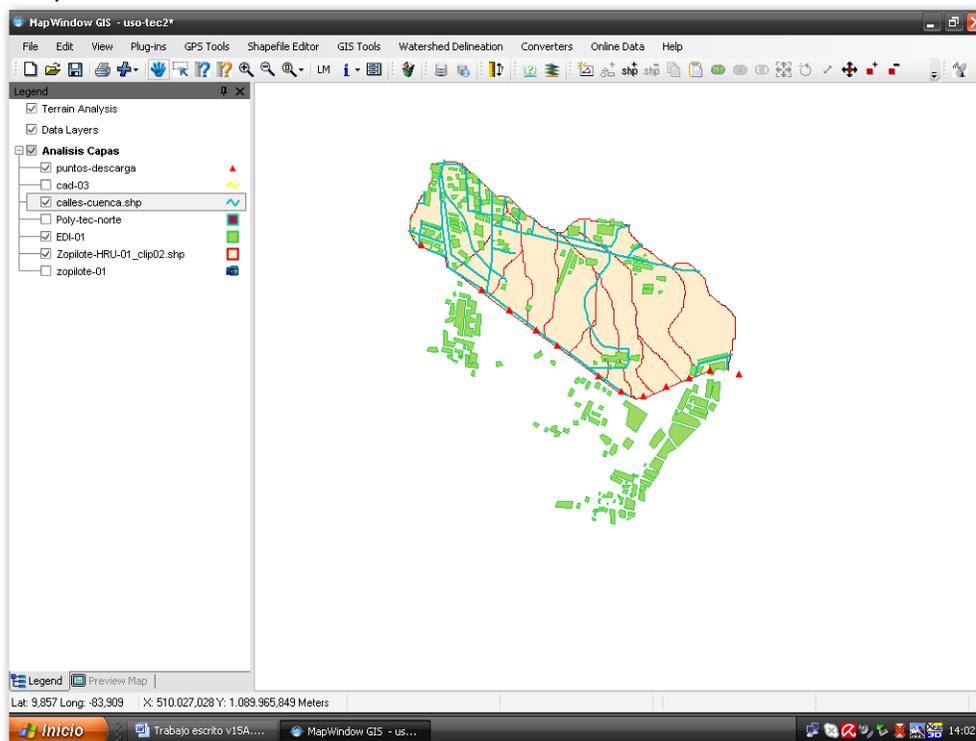


Figura 30. Interfase de inicio MapWindow Gis.
Fuente: (Quick Guide to MapWindow GIS Desktop, 2007)

Dentro de la interfase inicial del programa se encuentra la barra principal de herramientas con varios menús desplegables, cada uno de ellos tiene diversa funciones.



Figura 31. Barra de herramientas MapWindow Gis.
Fuente: (Quick Guide to MapWindow GIS Desktop, 2007)

En el caso del menú “File” este despliega las opciones: crear un nuevo proyecto, abrir uno existente, guardar el proyecto en el que se está trabajando, imprimir y salir entre otras.

Por su parte el menú “Edit” despliega las opciones: copiar (*algún elemento seleccionado*), exportar (*mapas, mapas georeferenciados y leyendas*) y vistas previas (*permite actualizar la pantalla, en toda su extensión o solo en la vista actual*).

En el caso del menú “View” este muestra las opciones de: agregar, eliminar una o todas las capas del proyecto, mostrar algunas opciones de escalas para el mapa, realizar un zoom en sus distintas variedades como “zoom in” o “zoom out”, y la opción de panel donde se puede mostrar o esconder la vista previa del mapa o las leyendas.

Posteriormente aparece el menú de “plug-ins”, el cual permite editar plug-ins o archivos shape, otra de sus opciones es acceder a las herramientas GIS (*estas se dividen en herramientas para modelo vectorial, raster o imagen*), convertir archivos a formato Shape, o editarlos.

En el menú editar archivos Shape, existe una opción que muestra una barra de herramientas específica para estos procesos.

Esta barra tiene las siguientes funciones: el primer ícono de la izquierda representa la opción de crear un nuevo “Shape File”, el segundo ícono permite agregar un nuevo shape al “shape File” actual, el siguiente ícono representa la función inversa, el cuarto ícono permite mover algún vértice del shape seleccionado, los dos últimos símbolos representan poder agregar o quitar vértices del shape.

De regreso en el menú principal se encuentra la opción “Help”, como es normal en los programas con este tipo de interfaz. En este menú, están las opciones de: buscar

documentación tanto en línea como en la base de datos del software, además de atajos de teclado, y una descripción de la fuente del programa.

En la parte inferior de la barra de herramientas se encuentra la barra de iconos de herramientas. Esta barra de iconos incluye las opciones de agregar o remover capas (*símbolo de cruz*), desplazar vista (*ícono de mano*), seleccionar objetos (*ícono de flecha*), medir distancias (*signo de interrogación celeste*), medir áreas (*signo de interrogación amarillo*), opciones de zoom (*íconos de lupas*), identificar objetos (*ícono de la letra i minúscula*), y por último propiedades de los objetos (*ícono de tabla de celdas*).

Una vez conocidas las barras de herramientas de uso básico en el programa, se puede iniciar un proyecto.

Al iniciar se deberán encender los plug-ins y algunas herramientas; alterando ajustes el usuario se podrá acostumbrar al manejo del programa, ya que le ayudará a conocer y memorizar la ubicación de las distintas herramientas. Un proyecto nuevo tendrá una extensión “mwprj” y estará completamente vacío para que el usuario agregue lo que considere necesario para su análisis.

Una vez abierto un nuevo proyecto, se puede acceder a la parte de configuración, esto en el menú “File” en la opción “Settings”, este proceso abrirá una lista de opciones que se deben configurar. En esta lista se establecen opciones como por ejemplo: unidades de los datos en el mapa (*como longitud y altitud*), mostrar unidades adicionales (*Kilómetros, millas*), mostrar o no unidades de los datos en el mapa, entre otras opciones.

Otras opciones básica para el manejo inicial del programa son: cargar un proyecto existente, en el menú “File” con el comando “Open”, o salvar los cambios actuales, mediante la opción “Save” en este mismo menú.

En lo que concierne a añadir datos a los mapas o a nuevas capas hay básicamente dos posibilidades: la primera son los datos raster, como por ejemplo una imagen (*generalmente aérea o satelital*), en el caso específico de este proyecto, las imágenes aéreas utilizadas provienen del Convenio de información entre el ITCR y la Municipalidad de Cartago.

La segunda posibilidad corresponde a los datos vectoriales, que están compuestos por formas o bien por capas de alguna forma

“shapefile”. En el caso de los shape file, MapWindow soporta tres formatos básicos: puntos, líneas y polígonos.

Uso del espacio “Legend”

El espacio “legend”, es una representación gráfica de todas las capas que se están utilizando actualmente en el proyecto; a continuación se muestra este espacio:

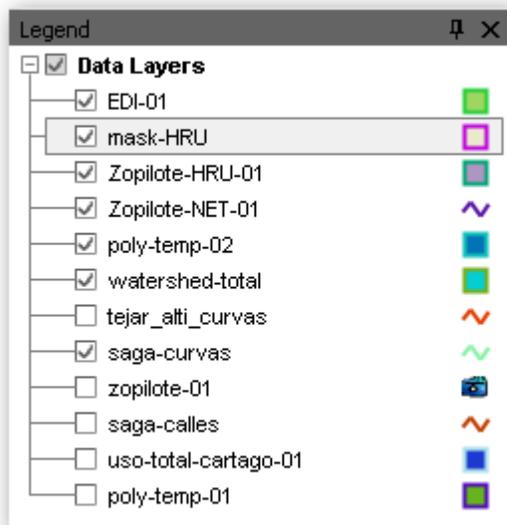


Figura 32. Espacio Legend en MapWindow.
Fuente: (Quick Guide to MapWindow GIS Desktop, 2007)

Este espacio del programa ofrece la posibilidad de manipular la funcionalidad de las capas, su nombre, posición en el mapa (*delante o detrás de otras capas*). Este orden está indicado en la leyenda, la primera capa. Será la que esté arriba en el mapa y esto se puede variar constantemente según sea la necesidad de visibilidad del usuario. La variación se hace solamente dando clic y arrastrando los nombres de las capas de abajo hacia arriba o inversamente.

Cada línea representa una capa de datos en el proyecto. El cuadro a la derecha es un indicador para la identificación de cada capa. Por ejemplo, si el usuario tiene un polígono, el color de este será el mismo que el que indica el cuadro al lado del nombre de la capa que lo identifica, en la zona de “legend”. Otra posibilidad es dar clic derecho sobre el nombre de alguna de las capas en esta zona y acceder a la opción “properties”.

Esto le permite al usuario modificar y conocer sus propiedades, como por ejemplo: color, grado de transparencia, etiquetas entre otros.

Otra opción que ofrece el software es un esquema de coloreo, que le permite al usuario distinguir características de una capa por medio de colores. Para utilizarlo se puede acceder a él por medio del siguiente procedimiento: primero se debe abrir el editor de leyenda para la capa seleccionada, posteriormente se debe dar clic en el espacio de “Coloring Écheme” y se abrirá un menú, en este se debe seleccionar el formato de número que se adapte y la propiedad de la capa que se quiere resaltar, de acuerdo con las posibilidades que haya. Por último, se da clic sobre el ícono con forma de rayo si se quiere utilizar un esquema predefinido o sobre el ícono de + si se quiere agregar un color específico para cada clase.

Continuando con las opciones que da MapWindow, está la posibilidad de hacer que algunas capas específicas solo aparezcan cuando el mapa está en una escala definida; esto es muy útil especialmente si se está trabajando con alguna capa que tiene muchos detalles y afectan las posibilidades de análisis cuando se observa toda una zona, esto porque no permiten ver las demás capas. Estas capas son muy importantes en ciertas vistas y porcentajes de zoom definidos por el usuario, que es al final de cuentas el que conoce sus necesidades. Para acceder a esta opción se debe escoger primero el zoom en el que el usuario quiere que la capa aparezca, se debe dar doble clic en la capa que aparece en la zona de leyenda y para la cual queremos que aplique esta función, posteriormente se da clic sobre el cuadro a la derecha de la opción “Dynamic Visibility” y se vuelve a dar clic en la opción que aparece.

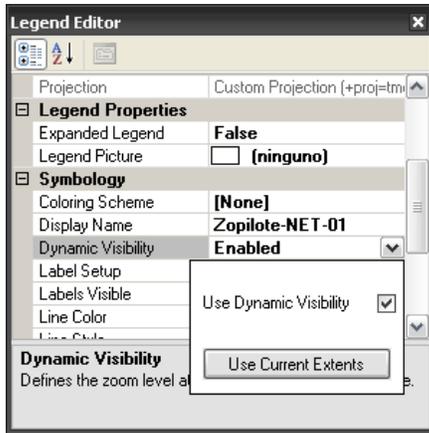


Figura 33: Proceso para aplicar la función de “Dynamic Visibility”. Fuente: (Quick Guide to MapWindow GIS Desktop, 2007)

El usuario podría necesitar agregar etiquetas o “labels” a las capas, por lo que es útil conocer el proceso básico para este fin: se debe dar doble clic sobre la capa o capa a la que se le desea agregar una etiqueta, luego se debe dar clic en “label set up”, para que se presente el editor de etiquetas; en este menú se debe escoger al menos la etiqueta principal que se desea que aparezca y el color de la misma, pero existen otras opciones como agregar una segunda etiqueta auxiliar a la capa. Al igual que se pueden agregar etiquetas, el programa permite eliminarlas.

Crear y editar una capa

Un proceso básico y necesario para el análisis de proyectos es la creación y edición de capas de datos. Lo primero que se debe hacer es verificar que el editor de “Shapefiles” esté activado, esto se puede hacer dando clic en el menú Plug-ins de la barra de herramientas y aplicar un signo de “check” en “Shapefile editor”. En la barra de ícono se debe dar clic en el ícono con la figura encerrada en un cuadro. Este proceso hará aparecer un cuadro de diálogo. Una vez en este cuadro, se debe seleccionar el tipo de “shapefile” que se desea crear, por ejemplo un punto o un polígono. Adicionalmente se debe nombrar este objeto para reconocerlo en el cuadro de leyenda. Para agregar una forma a la capa creada bastará con dar clic sobre el ícono con la leyenda “shape” en la barra de íconos principal. Esta forma puede

ser modificada posteriormente agregando vértices por ejemplo.

Otra opción básica que ofrece MapWindow es que existe una tabla de atributos para las capas creadas. Esta tabla está formada por espacios conocidos como campo, que pueden agregarse o eliminarse según se muestra a continuación:

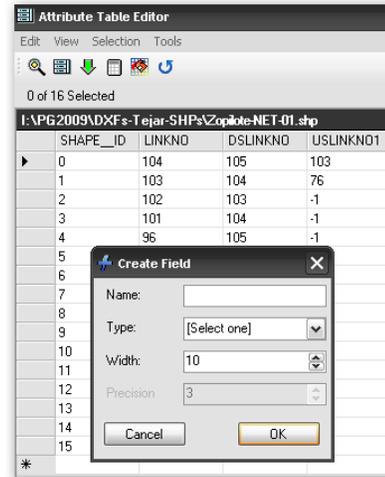


Figura 34: Editor de tabla de atributos. Fuente: (Quick Guide to MapWindow GIS Desktop, 2007)

En la figura anterior se muestra el acceso al editor de la tabla de atributos en las capas. Se accesa a él por medio del ícono con forma de tabla de Excel en la barra de herramientas, posteriormente en la opción editar mostrada en la vista anterior, se abre el cuadro de diálogo “Create a Field” (*crear un campo*), en donde se debe incluir básicamente el nombre del campo, el tipo de variable que va a guardar y la precisión. Posteriormente con un clic en el botón “ok” quedará todo listo. Ya estando el campo agregado se le puede asignar que realice una función específica como se hace en Excel de Microsoft.

Otra opción muy utilizada con la tabla de atributos es un plug-in que permite calcular la longitud de una línea, el perímetro o el área de un polígono y agregar estos datos a una tabla de atributos. Esto permite por ejemplo, si se tiene el área de un lote en m² y se quiere conocer en hectáreas, se utiliza este plug-in y la tabla de atributos se actualizará agregando el dato del área del terreno en la unidad de medida solicitada, lo cual puede resultar muy útil si se está manejando mucha información, como por

ejemplo no un lote sino 50 (*Quick Guide to MapWindow GIS Desktop .2007*).

Este sería un resumen de las operaciones básicas en la interfase del programa MapWindow Gis.

Diseño de canales

Flujo en canales abiertos: la idea básica del flujo en cales abiertos es que una de las superficies del fluido estará libre, probablemente en contacto con el aire, por el contrario de una estructura cerrada a presión. Se puede observar este tipo de estructuras tanto en la naturaleza (*como ríos grandes, de flujo tranquilo*) o creadas artificialmente (*como conductos para suministro de aguas de riego, canales para navegación, alcantarillas para carreteras*) (Hidráulica del flujo en canales abiertos, 1996).

Conceptos básicos

Para conocer básicamente el comportamiento del flujo libre en canales es necesario entender o asimilar algunos conceptos que se describirán a continuación.

Los canales se caracterizan por una dimensión que se conoce como radio hidráulico. Este concepto corresponde a una relación matemática entre el área neta de la sección transversal y su perímetro mojado según la siguiente ecuación:

$$R = A / Pm \dots\dots\dots Ec (29)$$

Donde:

- P = Radio hidráulico (m)
- A = Área neta de la sección (m^2)
- Pm = Perímetro mojado (m),

El perímetro mojado es igual a la suma de longitudes de perímetro de la sección que realmente esté en contacto con el agua o fluido transportado. (Mott. R 1996).

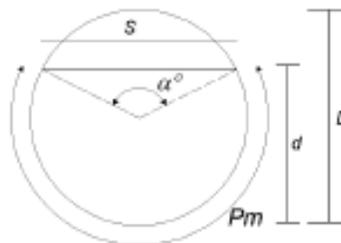


Figura 35: Perímetro mojado en una tubería parcialmente llena. Fuente: <http://www.nacobre.com.mx> 13 abril 2009

Para clasificar el flujo dentro de un canal, generalmente se utilizan las definiciones de flujo uniforme y flujo variado, además del número de Reynolds y especialmente el número de Froude. El flujo uniforme corresponde a un flujo con velocidad constante y una profundidad de flujo en el canal no variable, esto dentro del tramo en análisis. Para lograr esto la sección del canal debe permanecer constante a lo largo del mismo. Puede darse además un flujo uniformemente variado si la sección del canal no es prismática, o sea su sección es la misma pero las dimensiones de esta varían uniformemente. Por su parte el flujo variado se dará si la profundidad del fluido varía a lo largo del canal. Este flujo puede ser variado rápidamente o de forma gradual (Mott. R, 1996).

El número de Reynolds para canales abiertos se calcula como:

$$N_R = \frac{v * R}{\nu} \dots\dots\dots Ec (30)$$

Donde:

- N_R = Número de Reynolds
- ν = Viscosidad cinemática del fluido
- R = Radio hidráulico de la sección (m).
- v = Velocidad del fluido (m/s).

Por su parte, el número de Froude es una relación entre fuerzas inerciales y fuerzas de gravedad; se define según la siguiente ecuación:

$$N_F = \frac{v}{\sqrt{g * y_h}} \dots\dots\dots Ec (31)$$

Donde:

N_F = Número de Froude

v = Velocidad del flujo

g = Valor de la gravedad en el lugar.

$y_h = A/T$, con T como el grosor de la superficie libre del fluido en la parte superior del canal y "A" el área hidráulica. Fuente: (Mott. R.1996)

El número de Froude junto con el número de Reynolds, definen el tipo del flujo según las siguientes condiciones:

Subcrítico-laminar. $N_R < 500, N_F < 1.0$

Subcrítico-turbulento. $N_R > 2000, N_F < 1.0$

Supercrítico-turbulento. $N_R > 2000, N_F > 1.0$

Supercrítico-laminar. $N_R < 500, N_F > 1.0$

Cuando el número de Froude sea igual a 1, entonces estará en el estado de flujo crítico, estado que no se recomienda para diseñar estructuras hidráulicas, ya que es un estado cambiante; puede variar fluctuar entre los estados con flujo subcrítico y supercrítico, de acuerdo a la grafica de energía específica vrs profundidad crítica (Mays L. 2001).

Flujo uniforme

El análisis del flujo uniforme se hace mediante la ecuación de Manning. Esta ecuación fue desarrollada por Robert Manning en 1890, de ahí su nombre. La ecuación representa una expresión para la velocidad promedio del flujo uniforme. En unidades del SI se define como:

$$v = \frac{1.00}{n} * R^{1/2} * S^{1/2} \dots\dots\dots Ec (32)$$

Donde:

v = Velocidad promedio del flujo uniforme (m/s)

n = Factor de resistencia de Manning.

R = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente del canal (m/m).

A partir de esta ecuación, e incluyendo el término del área hidráulica, se puede estimar el caudal de transporte, según la ecuación:

$$Q = \frac{1.00}{n} * A * R^{2/3} * S^{1/2} \dots Ec (33)$$

Donde:

Q = Caudal (m³/s)

A = Área hidráulica (m²)

R = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente del canal (m/m).

n = Factor de resistencia de Manning.

El factor de resistencia de Manning depende de la superficie por donde circula el fluido, su condición y rugosidad. Estos valores se encuentran tabulados tanto para canales hechos en materiales naturales como artificiales, como por ejemplo concreto.

Una buena referencia para estos valores de "n" es la presentada en el libro Stormwater Collections Systems Design Handbook, en su apéndice 3.A, para valores de rugosidad o coeficientes "n". Esta referencia se adjunta en la sección de anexos.

En cuanto a la geometría del canal, se utilizan algunas figuras geométricas básicas, o una combinación de las mismas. Dentro de las figuras más comunes están: trapezoidales, triangulares, rectangulares y circulares. Para estas figuras se tienen tablas de distintos autores con sus características hidráulicas de área, perímetro mojado y radio hidráulico. De estas formas geométricas, la usada con mayor frecuencia es la trapezoidal, debido a que la relación entre el área de flujo y el perímetro mojado es grande, lo que la hace más eficiente. (Chanson, H. 2002)

Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno que se presenta en algunas ocasiones en el flujo libre, es una transición de movimiento rápido (*flujo supercrítico*), a movimiento lento (*flujo subcrítico*). Este fenómeno algunas veces se debe a fallos, en el diseño aunque en algunas otras ocasiones es parte del mismo, con la intención de aprovechar sus características a nivel energético, ya que resulta un mecanismo de disipación fuerte de energía (Chanson, H. 2002). Un resalto hidráulico genera pérdidas de energía ya que con él se da una turbulencia que viene a

representar un elemento proceso generador de perdidas. El análisis del resalto hidráulico es complicado, debido a las constantes variaciones en el tipo de flujo dentro del resalto.

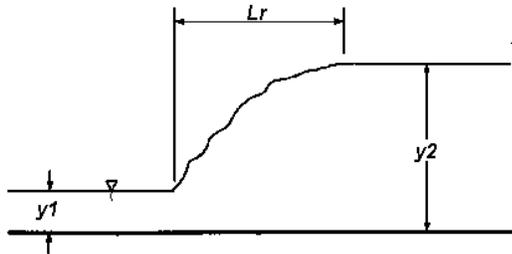


Figura 36. Resalto hidráulico. Y1 tirante supercrítico, Y2 tirante subcrítico y Lr longitud de resalto. Fuente www.fluidos.eia.edu.co/hidráulica 13 de abril 2009.

Para calcular el valor del tirante subcrítico en el resalto hidráulico se puede utilizar la ecuación:

$$y_2 = (y_1 / 2) * (\sqrt{1 + 8N_{F1}^2} - 1) \dots Ec (34)$$

Donde:

y_1 = Tirante supercrítico (m)

y_2 = Tirante subcrítico (m)

N_{F1} = Número de Froude sector supercrítico.

Y la pérdida de energía se puede estimar como:

$$\Delta E = (y_2 - y_1)^3 / 4y_1 * y_2 \dots Ec (35)$$

Donde:

y_1 = Tirante supercrítico (m)

y_2 = Tirante subcrítico (m)

$\Delta E = E_1 - E_2$ = Cambio de energía en el resalto. Fuente: (Mott. R .1996).

Construcción de canales

En la antigüedad la variedad de materiales utilizados abarcaba una gama amplia, que

incluía el uso en algunos casos de madera y acero en láminas. Actualmente se buscan materiales más económicos y, sobretudo, con mejores propiedades físicas y químicas que le permitan a la estructura tener una vida útil mayor. Según la finalidad perseguida y la naturaleza del canal, se pueden aplicar diversas técnicas de construcción y materias primas.

Los materiales que se utilizan hoy en día en obras fluviales son, en su mayor parte, típicos de las mismas, ya que raras veces sirven para otros tipos de construcciones. En abundancia se utiliza piedras para fondos de canal y empedrados, siempre y cuando sean capaces de resistir los agentes externos. Se prefiere utilizar rocas de elevado peso específico y en fragmentos de 0.3 a 0.5 m de diámetro, según sean las dimensiones de la obra (Schoklitsch. A. 1920). Cuando se dificulta obtener piedras, se utilizan concretos modificados con la intención de obtener propiedades específicas como impermeabilidad, bajo calor de hidratación (que reduzca el agrietamiento), alta velocidad de fraguado y alta resistencia temprana. Los concretos están formados básicamente por tres componentes a conocer: cemento, agregados y agua, aunque como se mencionó estos son modificados con elementos como aditivos y puzolanas.

Los cementos utilizados no deben ser cementos Pórtland ordinarios, sin modificación ya que estos aportan a la mezcla una reacción química fuertemente exotérmica, provocando contracción, disipación de calor y agrietamiento, lo que a su vez generaría perdidas en el caudal transportado y debilitamiento de la estructura. Por tanto es preferible utilizar un cemento de bajo calor de hidratación (*tipo IV de la ASTM*), o cemento Pórtland modificado (*tipo II de la ASTM*). Los problemas térmicos se pueden aliviar con el uso de aditivos y materiales como las puzolanas.

En cuanto a los agregados, se considera óptimo y preferible utilizar gravillas naturales redondeadas o irregulares que agregados de roca triturada. De igual manera las arenas naturales son mejores que los finos triturados. Los agregados deben estar limpios y libres de meteorización superficial o impurezas. Se debe además buscar una alta densidad de la mezcla y agregados con buena resistencia a la abrasión.

Por último, el agua utilizada para la mezcla debe estar libre de contaminación química, incluyendo contaminantes orgánicos.

Como un estándar que se puede utilizar, se dice que el agua debe ser apropiada para el consumo humano.

En cuanto a las puzolanas, estas son sustancias básicamente de silicio y aluminio que generan una reacción química con el hidróxido de calcio del cemento y forman compuestos cementantes adicionales. El uso de puzolanas reemplaza en un 25-50%, el uso de cemento. Las puzolanas reducen el calor de hidratación, la resistencia a largo plazo se aumenta levemente y se reducen los costos finales de la obra.

Los aditivos, por otro lado, reducen la necesidad de agua, aumentan la manejabilidad de la mezcla, mejoran la impermeabilidad de la misma y reducen la velocidad de fraguado en climas calientes.

En cuanto a los parámetros responsables del control de las propiedades de la mezcla se consideran básicamente el contenido de cemento, el contenido de agua, y de estos se analizan a partir de su relación conocida como, relación agua-cemento. Las características principales deseables de densidad, resistencia, durabilidad y permeabilidad, son influenciadas favorablemente por el incremento en el contenido de cemento y/o reducción de la relación agua-cemento. Al seleccionar una mezcla existen entonces dos condiciones básicas: el control de las características térmicas y el costo mínimo compatible con la resistencia deseada y la durabilidad adecuada.

Ya in situ las propiedades del concreto dependerán de lograr una densidad máxima a través de una buena compactación y esto una vez más estará relacionado con la manejabilidad de la mezcla y la forma de proceder en la obra (Novak. P. 2001).

Modelo SWMM

SWMM significa "Storm Water Management Model" (Modelo de Gestión de Aguas Pluviales). Fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico e hidráulico de una red de drenaje de sección abierta o abovedada de forma agregada o distribuida. El sistema de SWMM funciona con base el modelo de compartimentos, conformado por un módulo de hidrología, un módulo de propagación y un módulo de tránsito hidráulico. El módulo de

escorrentía o hidrológico de SWMM funciona con una serie de cuencas en las que teóricamente cae la precipitación y se genera la escorrentía. Por su lado, el módulo de propagación corresponde al análisis de las subcuencas y los tiempos de concentración, que conectan la precipitación desde el momento que cae, hasta el punto de inicio del módulo de transporte. Durante esta etapa de este módulo se incluye en el análisis datos, como por ejemplo: porcentajes de pendientes, áreas impermeables, permeables, el valor del número de curva con el que se determina posteriormente los caudales y que en este caso es de 80 para todas las subcuencas, por último se incluye el valor de "n" de Manning, valor que se selecciona de las tablas típicas que el mismo software ofrece dentro de sus archivos de documentación.

En cuanto al módulo de tránsito o hidráulico de SWMM, analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores.

Entre sus aplicaciones típicas se pueden mencionar: permite realizar diseño y dimensionamiento de componentes de la red de drenaje para prevenir inundaciones, dimensionar estructuras de retención así como protección de la calidad de las aguas, delimitar zonas de inundación en barrancos y cauces naturales, diseñar estrategias de control de la red para minimizar el número de descargas de sistemas unitarios y realizar análisis en materia de sistemas sanitarios, entre otras funciones.

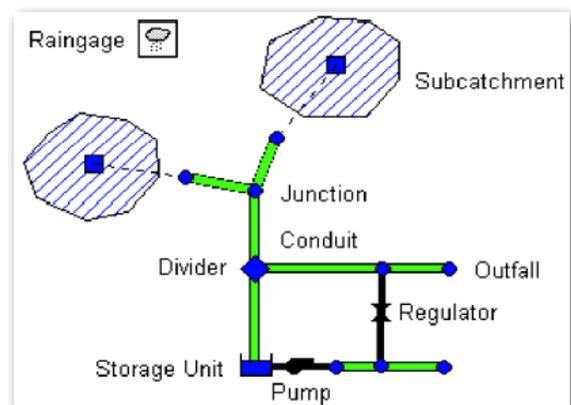


Figura 37: Modelo de Compartimentos. Se muestra la precipitación (Hidrología), las subcuencas (propagación) y conductos (transporte) Fuente: Help File SWMM versión 5.0

La aplicación posee básicamente capacidades en temas en hidrometeorología, hidráulica y calidad de aguas.

En cuanto a la hidrometeorología, el sistema es capaz de simular el proceso lluvia-escorrentía para las cuencas en estudio, estimar las abstracciones de la precipitación total y la tasa de infiltración hacia los estratos no saturados, obtener la evaporación en virtud de parámetros meteorológicos y analizar la recarga de acuíferos.

Por otro lado en el tema de hidráulica simula la propagación de flujo en redes de drenaje con ilimitada cantidad de elementos, modela elementos especiales de control en redes civiles como depósitos de retención, estaciones de bombeo y vertederos, utiliza Flujo Uniforme, Onda Cinemática u Onda Dinámica como

métodos de propagación del flujo en la red de drenaje.

Por último en lo que respecta a Calidad de Aguas permite: simular la acumulación y la remoción de cargas contaminantes desde la cuenca y estimar la propagación, crecimiento o consumo de contaminantes a lo largo de la red de drenaje o depósitos (Help File SWMM, versión 5.0).

Interfaz gráfica del sistema SWMM

Al iniciar la aplicación SWMM se despliega una ventana como la mostrada en la figura siguiente. Esta corresponde al modo de inicio para proyecto, aparece el modelo y una interfaz con sus barras de herramientas y espacios de trabajo.

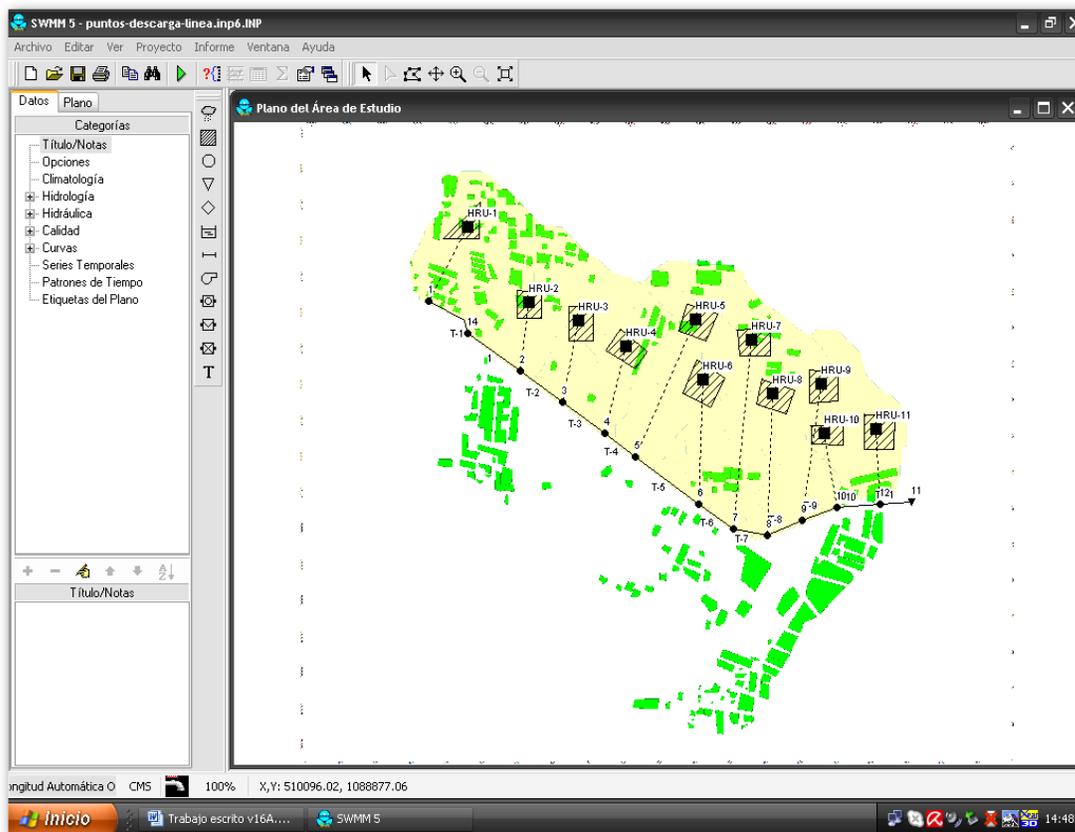


Figura 38: Muestra de interfaz de inicio SWMM. Fuente: SWMM versión 5.0

Existe en la parte superior izquierda una barra de menú, similar a la utilizada normalmente en programas desarrollados en ambiente Windows,

con un menú desplegable de: "File", "Edit", "View", "Project", "Report", "Window" y "Help", que define a su vez una serie de funciones,

permitiendo el desarrollo y análisis de los proyectos.

En el caso del menú "File" este contiene las funciones básicas para abrir, crear nuevos proyectos, imprimir, salvar cambios y exportar el documento hacia algunas otras aplicaciones, como AutoCAD. Por su parte el menú "Edit" permite, entre otras cosas, seleccionar, copiar y pegar elementos de proyecto. Continuando con el menú "View", éste le permite al usuario utilizar las aplicaciones de "zoom" y definir qué objetos quiere que estén visibles, como por ejemplo etiquetas, barras de herramientas, etc. En el menú "Project" aparece la opción "Run Project" que permite correr la simulación del caso en diseño. El menú "Window", por su parte, define las ventanas que se muestran en el momento. Por último, el menú "Help" contiene todo el soporte para el usuario y su capacitación en el uso del software.

Aparte de la barra de menús desplegables, aparecen en la interfaz del programa barras de íconos con distintas funciones. Básicamente se muestran dos barras de íconos: la primera se muestra a continuación e incluye funciones como: salvar, crear un nuevo proyecto, imprimir, copiar, buscar, pero también incluye íconos de funciones específicas de la aplicación como por ejemplo: el ícono con el triángulo verde permite correr la simulación, el que presenta agua en color celeste permite mostrar perfiles longitudinales del sistema en análisis, como por ejemplo un canal, y apreciar mejor su comportamiento en el momento de correr la simulación.

La segunda barra de íconos corresponde a una herramienta que le permite al usuario ir plasmando el sistema. Contiene íconos que le facilitan el agregar elementos como: cuencas, nodos, salidas, entre otros elementos que se pueden incluir en un sistema hidráulico.

Posteriormente a la apertura de un nuevo proyecto, el proceso a seguir dependerá de las necesidades del usuario y el alcance del proyecto. En el caso específico de este trabajo se incluyó, dentro de la labor, importar las capas correspondientes a áreas tributarias, puntos de descarga de cada subcuenca y trazado de la carretera, todo georeferenciado. Luego de esto se incluyeron las propiedades físicas de cada subcuenca como pendiente y área, datos obtenidos previamente de MapWindow Gis.

En la siguiente figura se muestra la tabla dinámica de ingreso de datos para las subcuencas; esta incluye: el nombre de la subcuenca, coordenadas "x, y" según la georeferenciación, área total, porcentaje de pendiente promedio, porcentaje de área impermeabilizada y no impermeabilizada, método de cálculo para la infiltración (en este caso método de curva), y nombre del nodo en donde descarga, entre otras cosa.

Property	Value
Name	HRU-2
X-Coordinate	509212.228
Y-Coordinate	1089632.032
Description	
Tag	
Rain Gage	PRECI-1
Outlet	2
Area	5.031
Width	133.14
% Slope	7.94
% Imperv	31.60
N-Imperv	0.015
N-Perv	0.15
Dstore-Imperv	0.3
Dstore-Perv	0.3
%Zero-Imperv	100
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0
User-assigned name of subcatchment	

Figura 39: Tabla de ingreso de datos para las subcuencas
Fuente: SWMM versión 5.0

Luego de definir las subcuencas y sus propiedades se procedió en este caso a definir, con base en los puntos de control de las subcuencas, la ruta que debía seguir el canal y la tubería propuesta. El ingreso de las propiedades de los nodos se hace en una tabla similar a la utilizada para las subcuencas. De manera similar se manejan los distintos elementos del sistema.

Luego de definir los elementos del sistema y sus características físicas, el siguiente paso comprende definir la serie temporal por utilizar para el cálculo de los hietogramas y, consecuentemente, la estimación por parte del sistema de las precipitaciones.

Generada esta parte del proceso, lo que prosigue es correr la simulación e iniciar la

interpretación de los resultados. Para desarrollar esta etapa existen partes en la interfaz que permiten, entre otras cosas, tener a mano los parámetros que se ingresaron, por ejemplo, la serie temporal anterior. Esto se observa en el cuadro ubicado a la izquierda de la pantalla con título “Data”

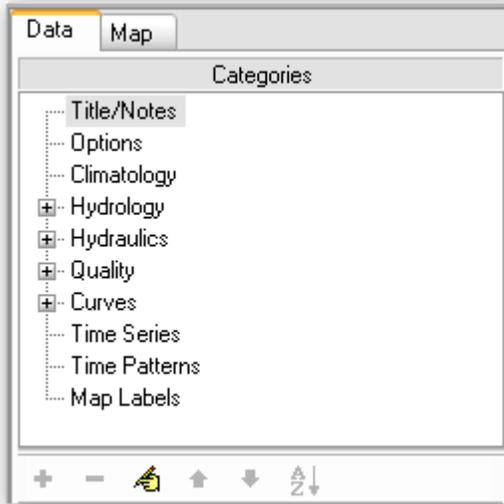


Figura 40: Espacio “Data” en la interfaz de SWMM
Fuente: SWMM versión 5.0

En esta misma sección, dando clic sobre la cejilla “Map”, se despliega otro elemento que esta vez muestra las opciones “Subcatch View”, “Node View”, “Link View”. Estas permiten seleccionar parámetros de las subcuencas, líneas y nodos que se necesita se muestren en pantalla; por ejemplo: en el menú de “Subcatch View” se puede seleccionar la opción de mostrar el área de la subcuenca; en el menú “Node”, por su parte, puede estar activa la propiedad profundidad y, por último, en el menú “Link View” se pueden apreciar los rangos de velocidad que se dan en los conductos durante la simulación. Además se despliega a la derecha toda una simbología de los datos mostrados.

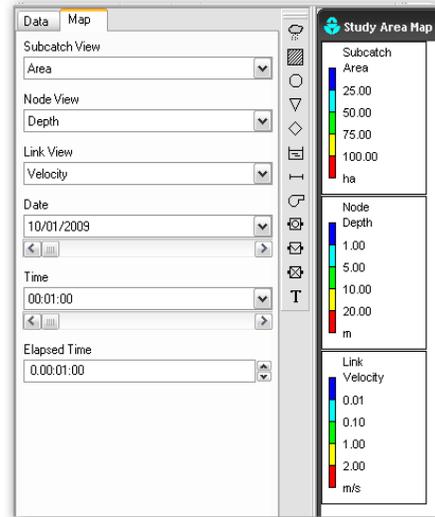


Figura 41: Espacio “Map” de la interfaz de SWMM.
Fuente: SWMM versión 5.0

Por último, para terminar de resumir las habilidades básicas de este software, es muy importante la parte de representación de resultados que permite básicamente dos opciones: mostrar un perfil longitudinal de las líneas y observar su comportamiento durante las simulaciones o graficar alguna variable de interés para el análisis.



Figura42: Perfil de representación de las líneas y su comportamiento durante la simulación
Fuente: SWMM versión 5.0

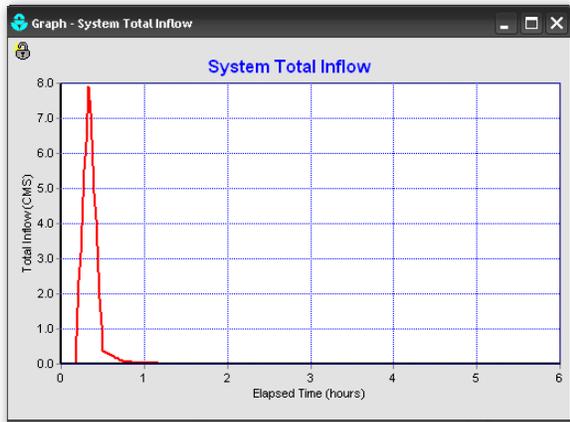


Figura 43: Hidrograma de análisis. Fuente: SWMM versión 5.0

El software posee otras habilidades, pero básicamente esta guía representa una buena introducción para uso y aprovechamiento. El proceso para el diseño en general se vuelve un proceso interactivo hasta conseguir cumplir las bases teóricas propuestas.

Introducción

Los altos índices de expansión urbana, aunados a cambios sobre el uso del suelo y condiciones climáticas cada vez más severas; contrastan con los eventos de rápida escorrentía ante lluvias de alta intensidad, lo cual a su vez está íntimamente ligado al riesgo de inundación.

Ausencia de obras de canalización pluvial adecuadas, provocan en distintas partes del país, innumerables casos que van desde escorrentía fluyendo sobre la carpeta de rodamiento, lo que se traduce en huecos, hasta inundaciones de zonas bajas que afectan viviendas, producen daños materiales y aumentan la posibilidad de propagación de plagas y enfermedades como el dengue.

Este proyecto analiza y trata de dar una solución a un caso específico, de problemas de inundación generados a partir de malas prácticas constructivas y de administración territorial. El proyecto por evaluar se desarrolla en Cartago, y su principal protagonista es la quebrada Zopilote que experimenta una sobrecarga hídrica, con escorrentía proveniente del sector oriental del casco urbano de Cartago y el sector sur del campus del ITCR y cuyo punto de concentración desemboca en el sector noroeste de Dulce Nombre, a la altura del cementerio de esta localidad. La escorrentía viaja por un canal de tierra que se encuentra en el límite sur del ITCR (*ver Figura 44*), y cuya capacidad hídrica no es la adecuada, lo que provoca rebalses de agua en su punto de concentración antes mencionado. Por otro lado el caudal que sí llega a la quebrada, provoca su desbordamiento y esto trae consigo inundaciones en viviendas aledañas, generación de malos olores y mosquitos.

Al describir el problema se ponen en evidencia básicamente dos parámetros claves en el estudio, las características de la cuenca que se tratan de determinar y analizar a partir del uso de sistemas de información geográfica para conocer las áreas tributarias, redes de flujo, niveles

topográficos, usos de suelo, pendientes, entre otros aspectos.

El otro parámetro clave es la escorrentía generada durante los eventos de precipitación. En este tema es muy importante analizar la función producción, que se basa en curvas de intensidad, duración y frecuencia para determinar la cantidad de lluvia que cae sobre la superficie de la cuenca en consideración. Posteriormente se analiza la función de distribución considerando que la precipitación tiene varios caminos que tomar como quedarse en la copa de los árboles o llegar al suelo y convertirse en escorrentía superficial o subterránea por ejemplo. Estas estimaciones se cubren con teorías de análisis como el Método Racional o el método de curva del Servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos. Dentro de este análisis se encuentra el parámetro de tiempo de concentración, que ayudará básicamente a estimar los tiempos de movilización de la escorrentía superficial, desde el punto más lejano en la cuenca hasta el punto de desfogue.

Conocidos estos términos teóricamente se puede estimar el caudal generado durante las precipitaciones y que en este caso es el responsable de los problemas de inundación en este sector del país.

Luego con estos datos la idea que se desarrolla en este proyecto es canalizar a un lugar distinto el caudal antes determinado con la intención de eliminar su efecto sobre la quebrada Zopilote, y entregar las aguas a un río con un cauce que permite un mejor manejo de las mismas, en este caso el río Toyogres situado más al este de la zona en conflicto. Al surgir la necesidad de conducir este caudal hacia otro punto de desfogue es que se considera analizar posibles soluciones, y estudios previos que sirvan de base para buscar una solución integral al problema.

Luego de analizar múltiples posibilidades se encuentra que existe un estudio vial, para un eje que pasa en las cercanías de esta zona y que conecta el sector sur del ITCR con Caballo Blanco, pasando en algún momento por el río Toyogres.

Así es como nace la opción de diseñar el tramo vial entre estos puntos y desarrollar un canal en paralelo con la calle hasta desfogar en el cauce mencionado.

En la década de los noventa el INVU había propuesto un diseño geométrico horizontal y vertical para este tramo de eje vial, mas no se terminó de desarrollar, esta información fue proporcionada por el convenio de información existente entre la Municipalidad de Cartago y el ITCR. Analizando esta propuesta se decide readecuarla y rediseñarla de acuerdo con las necesidades actuales, los volúmenes de tránsito al día de hoy y las expectativas de uso para la ruta de esta carretera como posible ruta para el canal.

Este proyecto trata de complementar de alguna forma la idea que en la década de los noventa se tuvo para el diseño de este tramo vial, integrando a la vez una solución al problema de aguas que vive esta zona de Dulce Nombre de Cartago. Por otro lado se ejecuta el cálculo de movimiento de tierras para la ruta, aspecto que en el diseño anterior no se logró llegar a plasmar. Además se intenta de alguna forma considerar de una mejor manera las condiciones naturales del terreno y la existencia de otras obras viales cercanas, que en aquellos momentos no existían. Se incluye un diseño para el pavimento adecuado a la demanda actual.

Con la finalidad de dar una solución al problema expuesto, el proyecto establece como objetivo general el siguiente:

- Diseñar el tramo del eje vial Guadalupe-Caballo Blanco del plan vial de la ciudad de Cartago, con especial énfasis en la evaluación hidrológica del área tributaria asociada y el dimensionamiento de las obras hidráulicas necesarias

Y como objetivos específicos, se establecen los siguientes:

- Llevar a cabo una revisión preliminar de la información disponible para el área tributaria asociada, incluyendo registros históricos, estudios previos e información cartográfica.
- Evaluar, replantear y georeferenciar del trazado geométrico original.
- Diseñar altimétricamente el trazado definitivo.
- Realizar los estudios geotécnicos necesarios al tiempo que se calcula y cuantifica el moviendo de tierras.
- Evaluar y parametrizar el área tributaria asociada mediante sistema de información geográfica. Estimar los caudales máximos de tormenta ligados a las fuentes de información disponibles. Dimensionar y diseñar las obras hidráulicas necesarias.
- Diseñar la superficie de rodamiento del tramo vial contemplado.
- Realizar una estimación de costos para las obras a construir.

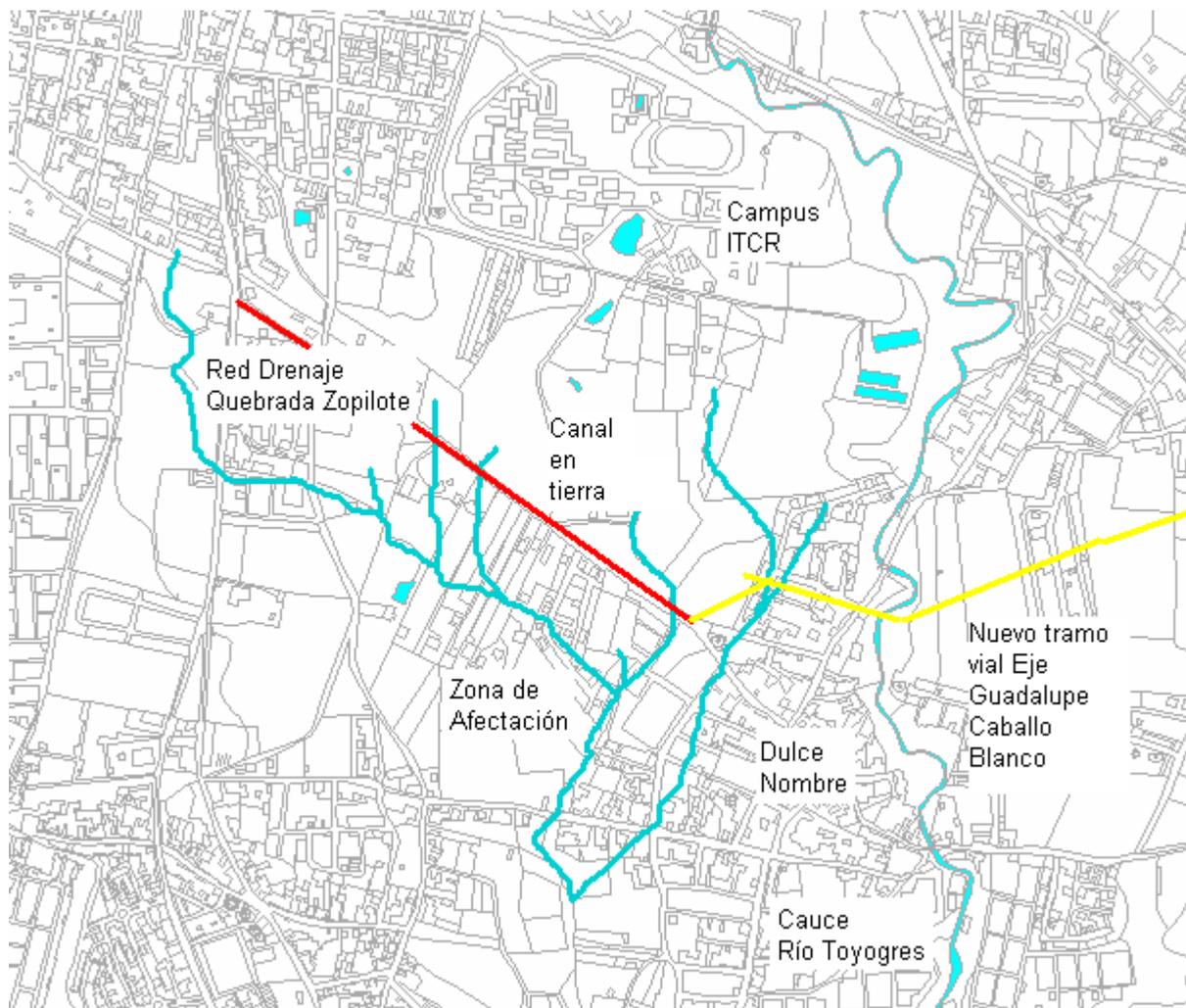


Figura 44: Ubicación geográfica de zona en análisis. Fuente: Autor, 2009. MapWindow GIS 2009

Metodología

La metodología planteada a continuación sigue la estructura y secuencia establecida por los objetivos específicos mediante acciones concretas y programadas a través de tiempo

Como en la mayoría de las investigaciones científicas, el inicio del proyecto se basó en el estudio y la revisión preliminar de la información existente.

Básicamente en esta primera etapa se buscó obtener información que involucrara estudios viales, datos de levantamientos planimétricos, altimétricos y de volúmenes de tránsito para las vías involucradas. Se complementó con investigación en materia de análisis de suelos, estudios hidrológicos de la *Comisión Nacional de Emergencia (CNE)* y el Ministerio Nacional de Ambiente y Energía (*MINAE*). Por otro lado se consideró acciones ciudadanas como recursos planteados al Ministerio de Salud (*MINSA*) y la Municipalidad de Cartago; toda esta información involucra la zona en análisis y en general el caso específico que se busca solucionar mediante la elaboración de este proyecto.

Además de esta información se utilizó cartografía digital 1:10 000 en formato *DGN* y fotografías aéreas 1:25000 del proyecto PRUGAM para la hoja cartográfica "Tejar", con la intención de tener una visión global del terreno, los pueblos involucrados los cauces de quebradas o ríos cercanos y así caracterizar de la mejor manera la cuenca en análisis. Otro aspecto que se tomó en cuenta fue la aplicación e interpretación de mapas de uso de suelo para la provincia de Cartago, realizados en el 2006 durante el convenio de cooperación entre UNA-ITCR-Universidad de Alberta. Por último, en lo que respecta al ITCR, se analizó su crecimiento en infraestructura a futuro a través de su Plan de desarrollo para el campus. Esta última información fue brindada por la Oficina de Ingeniería de esta institución.

Posteriormente a esta etapa de recopilación de información se inició un proceso

de evaluación y replanteo del trazado geométrico original de 1997 (*obtenido durante la etapa de recapitulación de información*), propuesto para el tramo vial en estudio, lo cual incluyó: una digitalización de los planos originalmente propuestos por el INVU, seguido de una evaluación de aspectos básicos en las consideraciones preliminares de un vía, como por ejemplo: la categorización de la carretera, nivel de tránsito proyectado, nivel de servicio para el cual se diseñaría la vía, velocidad de operación, la sección vial propuesta, radios de giro, entre otros aspectos del diseño planimétrico. Para concluir esta etapa se realizó un replanteamiento total del trazado geométrico definitivo con base en puntos de control geodésicos de campo.

En la tercera etapa se evaluó el diseño altimétrico y se obtuvo mediante el análisis de pendientes, una valoración preliminar de posibles volúmenes de corte/ relleno y el rediseño de curvas verticales, generándose un trazo vertical definitivo.

En análisis posteriores se continuó con la realización de estudios geotécnicos, el establecimiento de las secciones de control, la ubicación del material, y en general todas las labores correspondientes a la cuantificación del movimiento de tierras. Luego se procedió a realizar algunas pruebas de laboratorio y tratar así de determinar el módulo de resiliencia del suelo (a utilizar como posible subrasante), este valor es esencial para desarrollar el diseño de los espesores en una estructura de pavimento con carpeta asfáltica.

Dejando un poco de lado el diseño de carreteras, se inició el proceso para la evaluación y parametrización del área tributaria asociada al análisis hidrológico; esto mediante el Sistema de Información Geográfica de dominio público MapWindow GIS. Se incluyó dentro de este proceso, la reproyección de las capas temáticas vectorial y raster de la cartografía digital 1:10000 del proyecto PRUGAM, asociadas a la hoja cartográfica Tejar. Además se generaron los

modelos de elevación digital (*DEM's*) a partir de las capas vectoriales de curvas de nivel, se definió un tamaño de celda de 5x5m, considerándose adecuado para el análisis de áreas urbanas, se procesaron los modelos de elevación digital mediante el algoritmo TauDEM generándose posteriormente las unidades hidrogeológicas fundamentales (*HRU's*) y la red de drenaje natural. Se incluyó dentro de esta etapa para el análisis hidrológico, el procesamiento de los mapas temáticos de uso del suelo (*mencionados dentro de la información recopilada*), con la intención de conocer parte de las variables que afectan la escorrentía superficial, determinar áreas permeables e impermeables. Se incluyó también dentro del análisis la obtención de valores promedio de pendiente del terreno, datos que afectan de manera directa el tiempo de concentración.

Como se adelantó en la etapa anterior, luego del análisis espacial el paso a seguir era la estimación de los caudales máximos de tormenta, contando ya con los parámetros físicos de las subcuencas. A partir del diseño de la carretera se hizo necesario desarrollar una propuesta para la obra hidráulica que captaría y conduciría la escorrentía generada por el área tributaria en consideración, como una manera de ir definiendo la solución para el problema.

Tal vez la parte más importante de esta etapa fue utilizar la información disponible en el tema de hietogramas para predecir los caudales sobre las áreas tributarias. A falta de hietogramas reales fue necesaria la generación de hietogramas sintéticos a partir de curvas Intensidad – Duración - Frecuencia, desarrolladas para la zona de Cartago por parte del Instituto Meteorológico Nacional. El modelo utilizado para la estimación de escorrentía, fue el Modelo de Número de Curva del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos, basándose en un NC de 80 igual para cada área tributaria.

Este proceso así como el dimensionamiento y el diseño de un canal y/o tramo de tubería como posible solución, se analizó utilizando el Modelo de Compartimentos de SWMM y bajo el precepto estricto de un flujo uniforme, considerando los estados de flujo en las secciones críticas (*subcrítico, supercrítico*) y desarrollando estructuras hidráulicas de transición y entrega. El uso de este programa de computo (*SWMM*), se dio con la intención de promover el uso de este tipo de tecnologías que

permiten obtener de cierta manera resultados más representativos de la realidad del problema.

Por último se debió dar solución a la carpeta de rodamiento de la estructura vial, seleccionando entre las posibles opciones y determinando los espesores de las capas que conformaría su estructura. Este proceso se basó en los lineamientos establecidos en los acuerdos centroamericanos para el diseño de vías, en su Manual Centroamericano de Diseño Geométrico y el Manual de Diseño de Pavimentos. La metodología que se aplicó responde a un proceso de diseño propuesto por entidades gubernamentales de los Estados Unidos que se trató de adaptar a la realidad de los países del Centro de América.

Alcances y limitaciones

Al tratarse de un proyecto que involucra el uso de información generada por otras entidades, se transmiten de alguna forma las limitaciones que estas instituciones tuvieron al generar los datos.

En primera instancia la información que se conserva para el caso del diseño del tramo vial Guadalupe Caballo Blanco a la altura de Dulce Nombre corresponde a un número de láminas o planos hechos manualmente (*hace más de diez años y que a la fecha están incompletos*) de muy buena calidad, pero que al digitalizarse por medio de un escáner pierden en gran medida la escala, se afectan los espesores de pluma y sobre todo la resolución de las imágenes que, ante un zoom grande se degradan (*se muestran sus píxeles*).

La información escrita suministrada no está completa, existe un archivo de documentos conservado por el Sr. Marco Vinicio Campos, vecino de la zona, que reúne un porcentaje de los datos que se ha generado. La otra parte se ha perdido durante el proceso, desde el año 2006 a la fecha.

Para darle continuidad al proceso de análisis y evaluación para el diseño geométrico de 1997, que se plantea en los objetivos del proyecto, cabe destacar que no existe una memoria de cálculo, que respalde los planos del diseño vial. Como se comentó anteriormente solo se cuenta con algunas láminas en donde se mencionan ciertos parámetros que se tomaron en cuenta, como un valor de velocidad de diseño, radios mínimos de curvatura horizontal y pendientes verticales. Con la memoria de cálculo

presente el proyecto podría explotar más esta parte del análisis y generar información valiosa que complemente la investigación.

Por otro lado en la etapa de diseño vial, la mayor limitante es la información topográfica de la zona, no tanto en el tema de curvas de nivel, sino más bien en lo que respecta a la estructura vial existente a la fecha y que puede estar variando respecto a lo planteado en planos del INVU. Este trabajo se limita a los niveles planteados en estos planos, y se considera necesario un estudio topográfico completo que incluya: tramo de circunvalación en la sección entre el antiguo matadero de Cartago y el cementerio de Dulce Nombre, sus obras hidráulicas actuales, cercanías al río Toyogres y terrenos en donde se han construido urbanizaciones a la fecha, que en 1997 no estaban consideradas. Además se afecta el cálculo del movimiento de tierras y se debe verificar, con las variaciones actuales en niveles.

En el caso de diseño de espesores para la carpeta de rodamiento, el proyecto considera el análisis de la estructura de pavimento para una superficie de rodamiento hecha en asfalto. Correspondió a este proyecto el cálculo de ejes equivalentes y la propuesta de espesores para la carpeta, base y subbase. No está dentro de su alcance, el diseño como tal de la mezcla asfáltica, de las especificaciones técnicas de los materiales y cualquier otro elemento que se deba considerar al generar una propuesta de diseño de una estructura de pavimento.

Para finalizar, los alcances del proyecto en el tema de las carreteras, se debe mencionar que, la señalización, diseño de intersecciones, y superestructuras como el puente propuesto, no están dentro del alcance de este proyecto.

Dejando atrás el diseño vial y tomando en cuenta el análisis espacial, hay que decir que este se genera, a partir de curvas de nivel desarrolladas recientemente por el PRUGAM. Estas curvas se trazaron a cada 2.5 m (*cabe mencionar que es un trabajo de muy buena calidad*) y se consideró que utilizar celdas de 5x5 metros, para la generación del modelo de elevación digital (*DEM's por sus siglas en inglés*) era suficientemente representativo de las áreas urbanas y por lo tanto de este proyecto. Hay que recordar que el valor dado a la celda se mantiene uniforme e isotrópico en toda la extensión de la misma y esto limita de alguna forma la

representatividad del atributo seleccionado y por lo tanto del modelo.

Continuando con el alcance en cuanto al análisis espacial, hay que mencionar que no se tomaron en cuenta las calles ubicadas en la zona de trabajo, para la delimitación de área tributarias, ya que esto implicaría un proceso espacial, que va más allá del dominio actual del autor del proyecto. Durante el desarrollo del análisis espacial y la caracterización de la cuenca se utilizó una "orthophoto", brindada por el PRUGAM. Esta tiene una resolución específica y limitada. Su uso para el análisis GIS, se basa, en la interpretación del autor, al seleccionar y estimar las áreas impermeables su juicio determinará en gran medida la exactitud de los resultados. Por otro lado al ser una imagen raster los píxeles empiezan a influir en ciertos niveles de zoom, por lo que algo que se tomó como un área de techo puede ser perfectamente otro elemento como por ejemplo una parcela con un tono de suelo café grisáceo. Esto limita un poco el análisis del uso del suelo y por lo tanto influye directamente en la estimación de caudales.

Para la estimación de caudales y el diseño de las obras hidráulicas necesarias para conducir el agua generada por escorrentía hacia el río Toyogres se consideró lo siguiente. El análisis hidrológico se basó en hietogramas definidos a partir de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (*IDF*), esto a falta de hietogramas reales. Las curvas IDF fueron generadas por el Instituto Meteorológico Nacional (*IMN*) para la ciudad de Cartago. Se implementó el Modelo de Compartimentos de SWMM, con datos de caudal generados mediante el Método de Número de Curva (*NC*), utilizando un NC de 80, considerándose este proceder aceptable para realizar un balance de masas a nivel de subcuencas dentro de áreas urbanas. Ya con el valor de caudal obtenido, el paso siguiente fue incluir el diseño de algún elemento hidráulico de transporte de aguas, en este caso un canal y una tubería circular. Se simuló diferentes escenarios con la característica general para todos, de que se utilizó y realizó el análisis solamente para los criterios de flujo uniforme. Por otro lado el diseño de los elementos hidráulicos de captación y transporte de aguas para el tramo de carretera posterior al puente propuesto sobre el río Toyogres no estaba dentro del alcance del estudio, se debe complementar por lo tanto esta información.

Resultados

El desarrollo del proyecto siguió un proceso de acuerdo a lo previsto en la metodología y basándose en los objetivos planteados. En primer lugar se dio una revisión de la información existente suministrada por el Sr. Marco Vinicio Campos y la oficina de ingeniería de la Municipalidad de Cartago. Se presenta en esta sección un resumen de los documentos

aportados cronológicamente por distintas entidades. Lo más importante de rescatar es que previo a este proyecto ya otras oficinas han generado reportes e informes técnicos que sustentan el valor de la investigación.

Cuadro 4. Resumen Cronológico de Documentación Encontrada Parte 1

Documento	Fecha	Tipo	Presentado por	Finalidad
Planos INVU	1997	Planos	Municipalidad de Cartago	Diseño geométrico tramo de eje vial a la altura de Dulce Nombre
1	09-Oct-06	Carta información	Sr. Marco Vinicio Campos	Informar situación, plantear solución y presentar firmas.
2794797	09-Oct-06	Recolección de firmas	Vecinos zona afectada	Solicitud obras de mejoramiento zona problemática
DPM-INF-772-2006	26-Dic-06	Informe Técnico CNE	Geólogo. Esteban Bonilla	Informe de inspección realizado en zona afectada CNE.
M-V-C-M-0806-2007	05-Feb-07	Carta de solicitud	Sr. Marco Vinicio Campos	Solicitud de ejecución de consideraciones presentadas en el informe técnico del Geólogo Esteban Bonilla CNE.
02016-2007-DHR	22-Mar-07	Informe Defensoría de los Habitantes	Lic. Luis Alejandro Richmond Solís-Licd. Hazel Días Meléndez.	Emitir recomendaciones ante recurso interpuesto por vecinos afectados.
DPM-INF-0807-2007	10-Jun-07	Informe Técnico CNE	Geóloga. Dione Barahona	Segundo informe Técnico reconsiderando lo planteado en el primer informe del 2006, en busca de un nuevo pronunciamiento.
MS-ARSC-250-08	16-Abr-08	Carta de información	Director Área Rectora de Salud	Respuesta a oficio NO DM-226, planteado por la Dra. María Luisa Ávila, Ministra de Salud, en consulta sobre estado actual de la situación.

Cuadro 4. Resumen Cronológico de Documentación Encontrada Parte 2				
Documento	Fecha	Tipo	Presentado por	Finalidad
RCE-DR-0386-2008	14-May-08	Carta de información	Dr. Oscar Bermúdez García Dirección Regional de Salud Cartago.	Dar manifiesto a la Ministra de Salud de que se atendió la queja presentada por Sr. Marco Vinicio Mata y se han tomado las acciones pertinentes del caso.
DM-5473-08	28-May-08	Carta de información	Dra. María Luisa Ávila MS	Envío de información a Sr. Marco Vinicio Campos, con oficio presentado por Dr. Oscar Bermúdez de la Dirección Regional de Salud de Cartago
M-V-C-M-0419-N1-CIRCO-2008	11-Dic-08	Carta de solicitud	Sr. Marco Vinicio Campos	Solicitud de ayuda para realizar estudios técnicos que permitan buscar una posible solución al problema. A la vez se plantea una denuncia ya que se indica el ITCR es responsable de parte del problema que se genera, gracias a su producción de aguas pluviales.

Microsoft Excel 2003.

Posterior a la recapitulación de información, vino la fase de análisis de esta, donde el elemento principal fue el diseño geométrico propuesto en 1997. Este análisis se hizo a la luz del Manual Centroamericano de Diseño de Carreteras y la información obtenida se presenta a continuación:

Cuadro 5. Evaluación Trazado Geométrico Planos INVU 1997 Parte 1				
Criterio a Evaluar	Dato según diseño	MCDC	Cumple o no Cumple	Observación
TPDA	10380	NA	NA	
Tipo de Terreno	Ondulado	Plano (sin pendientes), ondulado (pendientes leves) y montañoso (pendientes altas)	Cumple	
Tipo de área	Suburbana	Rural (campo), Urbana (ciudad) y suburbana (mezcla de ambas)	Cumple	
Tipo de vía	Troncal	Principal, colectora, troncal, camino vecinal	Cumple	

Microsoft Excel 2003

Cuadro 5. Evaluación Trazado Geométrico Planos INVU 1997 Parte 2				
Criterio a Evaluar	Dato según diseño	MCDC	Cumple o no Cumple	Observación
Velocidad de diseño	50 Km/h	80-70 Km/h	No cumple	Su velocidad de diseño está baja respecto al tipo de terreno y TPDA (Ver cuadro 4.1 MCDC)
Nivel de Servicio	C	C = Zona estable con sensación de pérdida de libertad para seleccionar velocidad	Cumple	Esto según la velocidad de diseño propuesta
Derecho de vía	14m	NA	NA	Es razonable tomando en cuenta el entorno y el TPDA
Distancia mínima visibilidad de parada en plano	75	57m mín. Según Cuadro 4.6.a del MCDC	Cumple	
Distancia mínima adelantamiento.	400	345m mín. Según Cuadro 4,7 del MCDC	Cumple	
Tasa de sobreelavación	6,0%	6,0% para vías suburbanas según Cuadro 4.9.b del MCDC	Cumple	
Radio mínimo en curvas horizontales	250-300-400	90m mín. según Cuadro 4.10 del MCDC para Velocidad de diseño de 50km/h	Cumple	
Pendientes verticales máxima	4,0%	10%	Cumple	Según recomendaciones Ing. Eduardo Barquero
Pendientes verticales mínima	0,7%	0,50%	Cumple	Según recomendaciones Ing. Eduardo Barquero
Distancia mínima visibilidad de parada en pendiente	80	66m mín. Según Cuadro 4.6.b del MCDC	Cumple	
Espesor promedio de subbase	26,67	NA	NA	Se verificará versus diseño actual
Espesor promedio de base	25	NA	NA	Se verificará versus diseño actual
Espesor promedio de carpeta	7,5	NA	NA	Se verificará versus diseño actual

(Fuente de datos Planos INVU, 1997) Microsoft Excel 2003.

Resultados análisis espacial

Los resultados presentados a continuación corresponden al análisis espacial realizado mediante sistemas de información geográfica. Para este caso en específico se desarrolló utilizando Map Window Gis como software base para la caracterización física y delimitación de la cuenca en análisis.

Inicialmente se tenía un área de influencia global. Esta se delimitó posteriormente en función del área de drenaje de la quebrada Zopilote. Las imágenes mostradas son un aporte del Convenio de Cooperación entre el ITCR-Municipalidad de Cartago, para el desarrollo de un proyecto que involucra el análisis de la quebrada Zopilote y especialmente del río Toyogres. Esta delimitación inicial se muestra en la siguiente figura.



Figura 45: Área global de influencia.
Software: MapWindow GIS.

Posteriormente al análisis inicial de esta área se determinó que una posible solución es interceptar la escorrentía y desviarla hacia el río Toyogres, mediante algún elemento hidráulico de transporte. El río Toyogres queda fuera del análisis de este proyecto se considera un elemento capaz de recibir el caudal generado por escorrentía en el área de drenaje de la quebrada Zopilote.

La interceptación de la escorrentía se haría con una obra hidráulica ubicada más o menos donde actualmente está el canal de tierra al costado norte de la carretera que conduce hacia Dulce Nombre en el sector sur del ITCR. En la siguiente figura se muestra el área final contemplada dentro de este análisis como un porcentaje del área global de influencia.



Figura 46: Nueva área tributaria a considerar.
Software: MapWindow Gis.

A partir del modelo de elevación digital generado con las curvas de nivel, representantes del relieve de la zona, se determinó la red de flujo y las áreas tributarias asociadas, así como sus respectivos puntos de descarga. Todo esto se refleja en la figura anterior.

Posterior a la definición de la red de flujo y sus áreas tributarias asociadas se obtuvieron los porcentajes de áreas permeables, así como los porcentajes de áreas impermeables. Mediante la observación de la imagen área se determinaron áreas de techo, calles, principalmente como los elementos que generan zonas impermeables. Esto se ilustra en la figura 47.

Continuando con la generación de datos durante el análisis espacial, se logró resumir en un cuadro las características físicas principales de las subcuencas en análisis, incluyendo su área, pendiente promedio, porcentaje de área permeable e impermeable. Esto en resumen representa la parametrización física de las áreas. Se muestra esta información en el Cuadro 6.

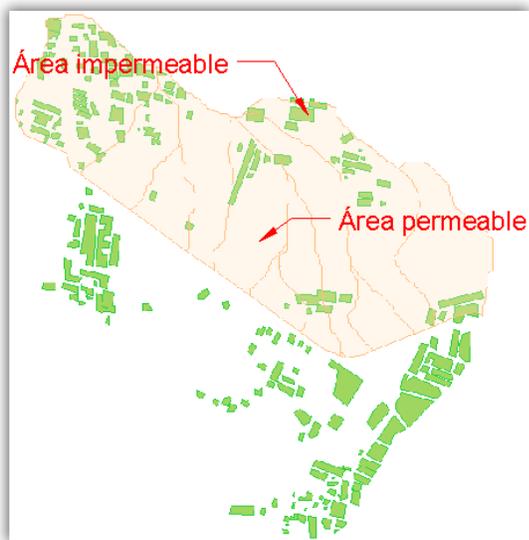


Figura 47: Estimación de área impermeables (verdes) y permeables (naranja).
Software: MapWindow Gis.

Cuadro 6. Características Físicas de las Subcuencas									
Shape ID	Área (m2)	Área (ha)	Pendiente promedio (%)	Área calles (ha)	Área de edificaciones (ha)	Área imper (ha)	Área permeable (ha)	% área imper.	% de área permeable
0	130,00	0,01	8,39	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	100,00
1	22050,00	2,21	6,24	0,00	0,00	0,00	2,21	0,00	100,00
2	17370,00	1,74	9,66	0,12	0,02	0,14	1,60	7,77	92,22
3	38450,00	3,85	10,67	1,13	0,43	1,56	2,28	40,68	59,32
4	82540,00	8,25	12,22	0,37	0,67	1,04	7,21	12,60	87,40
5	30740,00	3,07	12,19	0,77	0,04	0,81	2,27	26,22	73,78
6	72620,00	7,26	11,20	0,48	0,53	1,01	6,25	13,91	86,09
7	73500,00	7,35	8,40	0,19	0,40	0,59	6,76	8,03	91,97
8	118630,00	11,86	8,87	0,76	1,09	1,85	10,01	15,59	84,40
9	50310,00	5,03	7,95	1,33	0,26	1,59	3,44	31,60	68,39
10	62240,00	6,22	8,39	0,34	0,26	0,60	5,62	9,64	90,36
11	121470,00	12,15	6,83	3,61	3,02	6,63	5,52	54,58	45,42
Total	690050,00	69,01		9,10	6,71	15,82	53,19	22,92	77,08

Microsoft Excel 2003

Resultado análisis hidrológico

Este capítulo de resultados incluye: generación de hietogramas para intensidad máxima en la ciudad de Cartago, un resumen de parámetros estáticos y dinámicos del modelo, el análisis de caudales generados durante los eventos de precipitación y la definición del sistema colector de aguas.

Como parte del módulo hidrológico de SWMM, la primera fase se dedicó a obtener a través de las curvas de IDF (*generadas por el IMN*), los hietogramas de intensidad máxima para la ciudad de Cartago. Estas curvas se obtuvieron variando el período de retorno, en intervalos de duración definidos y a través de la ecuación del

MADE Ec (36). El Cuadro 7 muestra los datos generados al aplicar esta ecuación.

$$I = 156.89 - (28.46 * \ln(\text{dur})) + (42.2 - 8.07 * \ln(D)) * \ln(\text{Pr}) \quad \text{..Ec (36)}$$

Cuadro 7. Intensidades máximas (mm/hr) para diferentes duraciones y períodos de retornos de la ciudad de Cartago								
D (min.)	Período de retorno (años)							
	200,00	100,00	50,00	20,00	10,00	2,00	0,50	0,25
5,00	265,85	245,60	225,35	198,59	178,34	131,33	90,84	70,56
10,00	216,47	200,10	183,74	162,10	145,70	107,73	74,99	58,62
15,00	187,59	173,40	159,39	140,75	126,65	93,92	65,72	51,62
30,00	138,21	127,90	117,77	104,26	94,04	70,31	49,87	39,65
60,00	88,80	82,46	76,15	67,77	61,40	46,70	34,02	27,68
90,00	59,95	55,88	51,81	46,42	42,35	32,80	24,75	20,68
120,00	39,46	37,00	34,53	31,28	28,81	23,10	18,17	15,71

Microsoft Excel 2003

Posteriormente se graficaron curvas para distintos períodos de retorno, con la duración en

minutos en el eje de las "x" e intensidad en el eje de las "y".

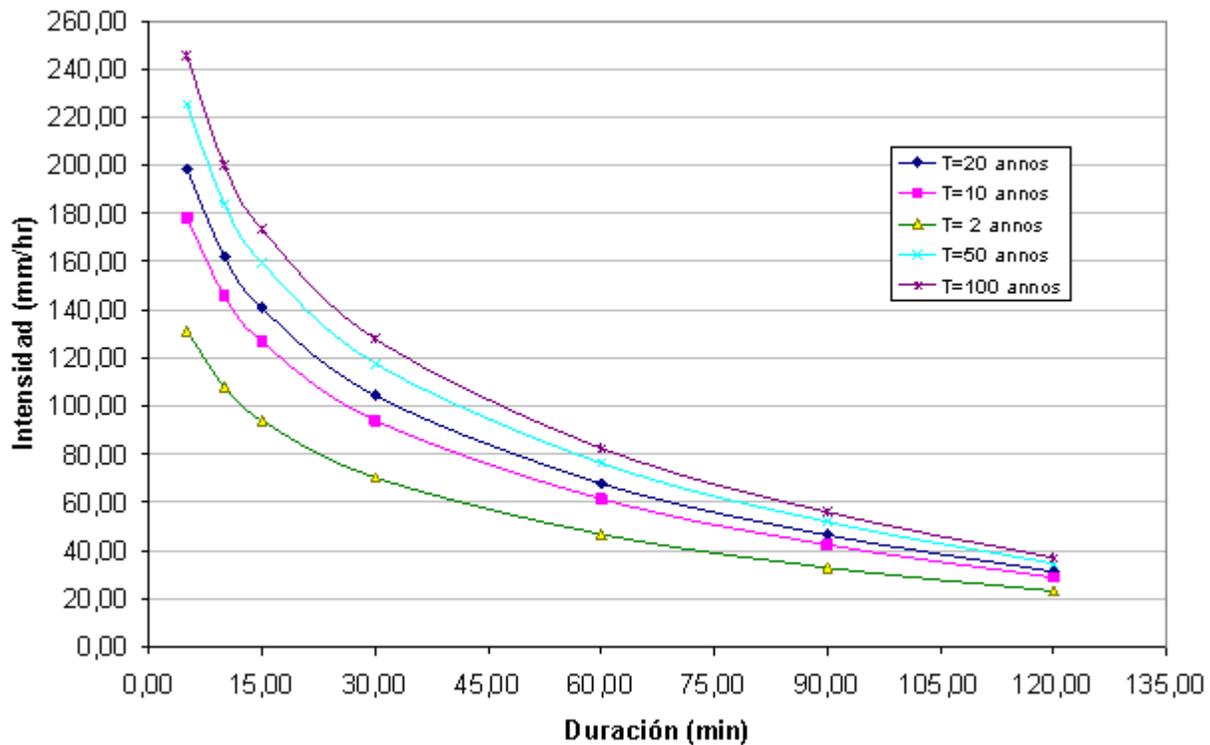


Figura 48. Curvas IDF para la provincia de Cartago. Fuente: Autor 2009, con ecuación proporcionada por el MADE. Microsoft Excel 2003

Continuando con el proceso y una vez generadas las curvas IDF, existía la posibilidad de aplicar distintos métodos para generar el hietograma. Se aplicaron los métodos de Huff, de Chicago y de Bloques Alternos. Este último fue el seleccionado para continuar con el desarrollo del proyecto.

Los datos obtenidos para intensidad mediante el método de Bloques Alternos se presentan en los Cuadros 8 y 9

Cuadro 8. Datos Intensidad esperada Bloques Alternos	
I esperada (mm/hr)	Duración (min.)
237,29	5,00
160,77	10,00
128,02	15,00
86,74	30,00
58,76	60,00
46,80	90,00
39,81	120,00
50,00	80,00

Microsoft Excel 2003

Cuadro 9. Datos ecuaciones para hietograma sintético de bloques alternos T=20 años para Cartago. Duración total 80 min.

T-absoluto (min.)	I (mm/hr)
0,00	16,45
5,00	17,73
10,00	19,34
15,00	21,42
20,00	24,28
25,00	28,54
30,00	35,84
35,00	52,90
40,00	192,82
45,00	52,90
50,00	35,84
55,00	28,54
60,00	24,28
65,00	21,42
70,00	19,34
75,00	17,73
80,00	16,45

Microsoft Excel 2003

Luego de la generación de los datos necesarios, se procedió a graficar los hietogramas, resultantes para cada uno de los métodos y

especialmente para el método de Bloques Alternos seleccionado.

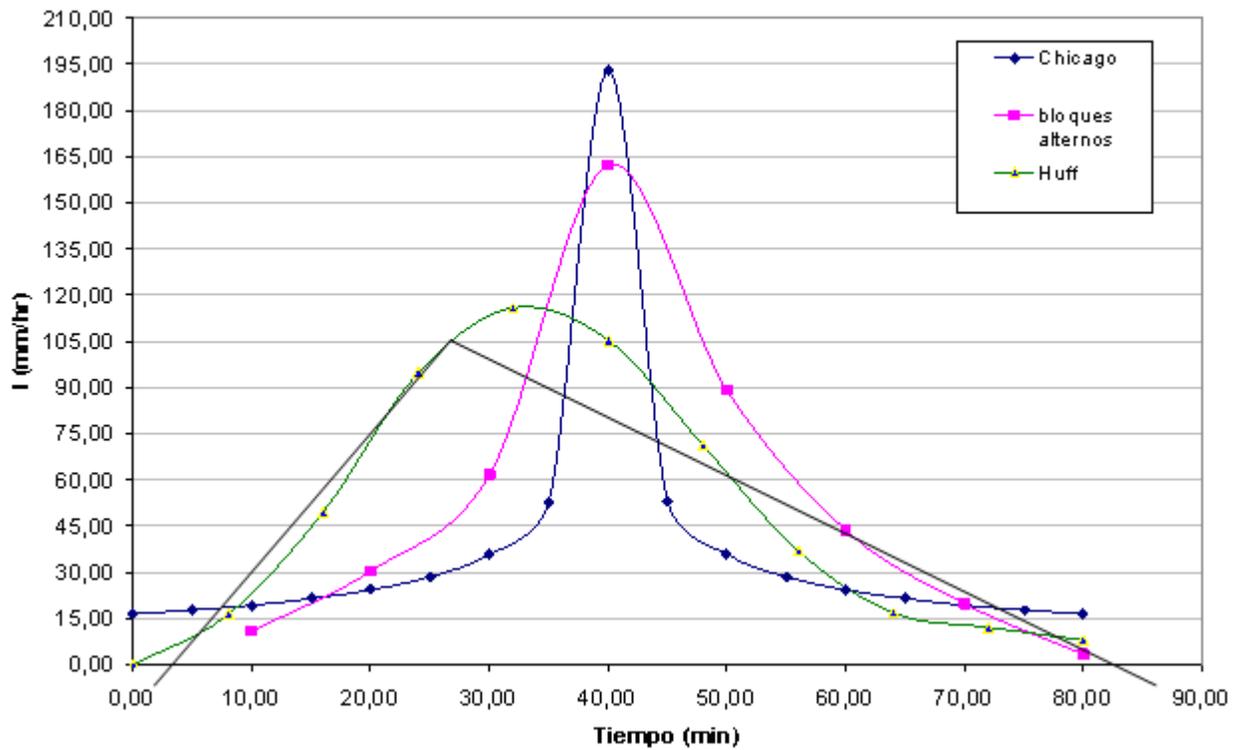


Figura 49: Hietogramas generados a partir de las curvas IDF. Fuente: Autor, 2009 Microsoft Excel 2003

Luego de incluir en el sistema de SWMM las características físicas de cada HRU, el software genera un hidrograma, que representa el caudal generado por toda la cuenca basándose en los datos de precipitación que se ingresaron.

Para este análisis en particular se obtuvo un caudal máximo acumulado en la entrega al Toyogres de 8.0 m³/s, según lo muestra, el hidrograma siguiente.

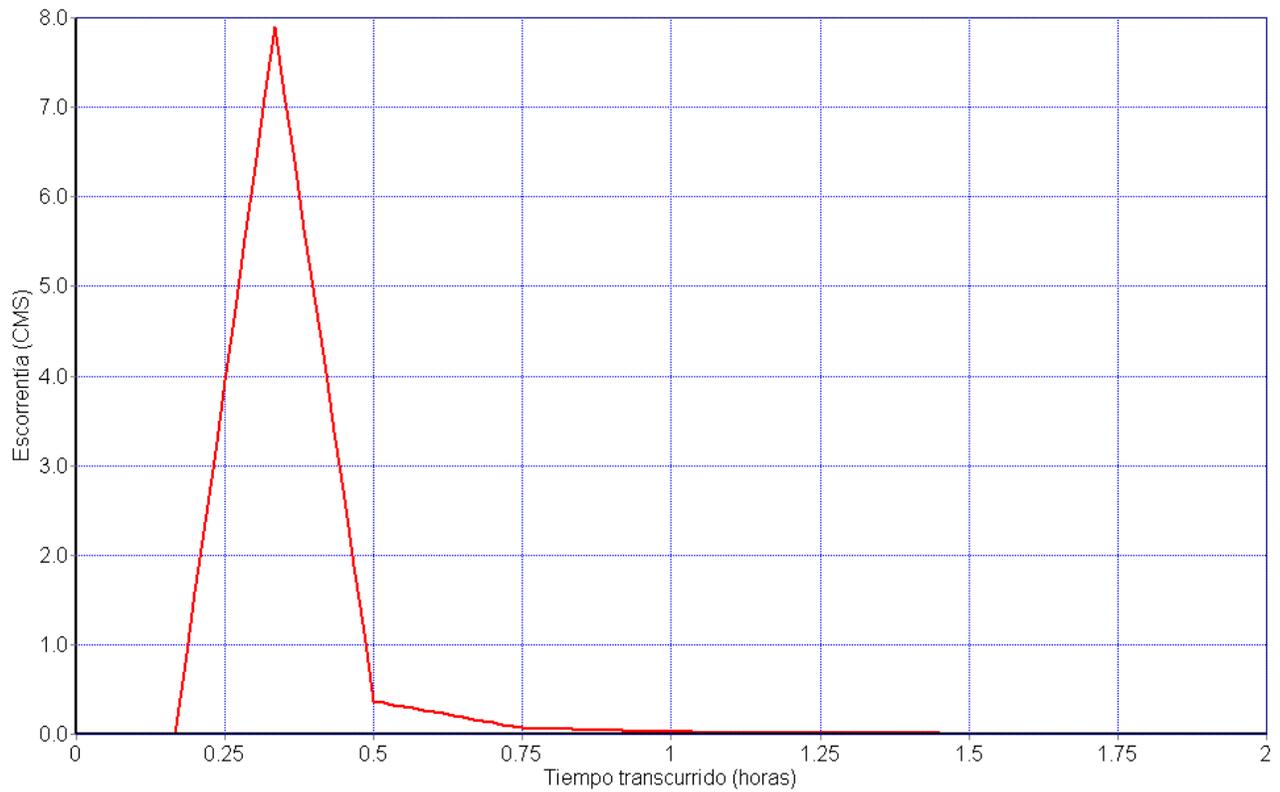


Figura 50: Hidrograma para la cuenca en análisis. Software: MapWindow Gis.

Con este caudal se inició la búsqueda de un arreglo para el sistema de colección y transporte. Se manejaron cuatro escenarios base, en donde se variaba más que todo el perfil del elemento de transporte, el número de nudos y las pendientes. En esta sección se presenta únicamente el escenario seleccionado que en este caso es el número cuatro. Los demás escenarios son tema de análisis más adelante.

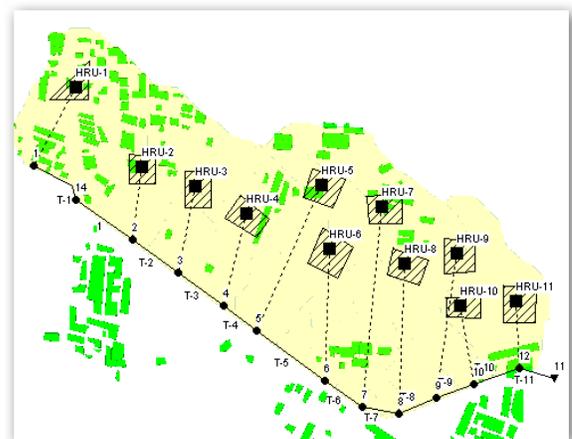


Figura 51: Modelo hidráulico correspondiente a la cuarta opción. Software: MapWindow Gis.

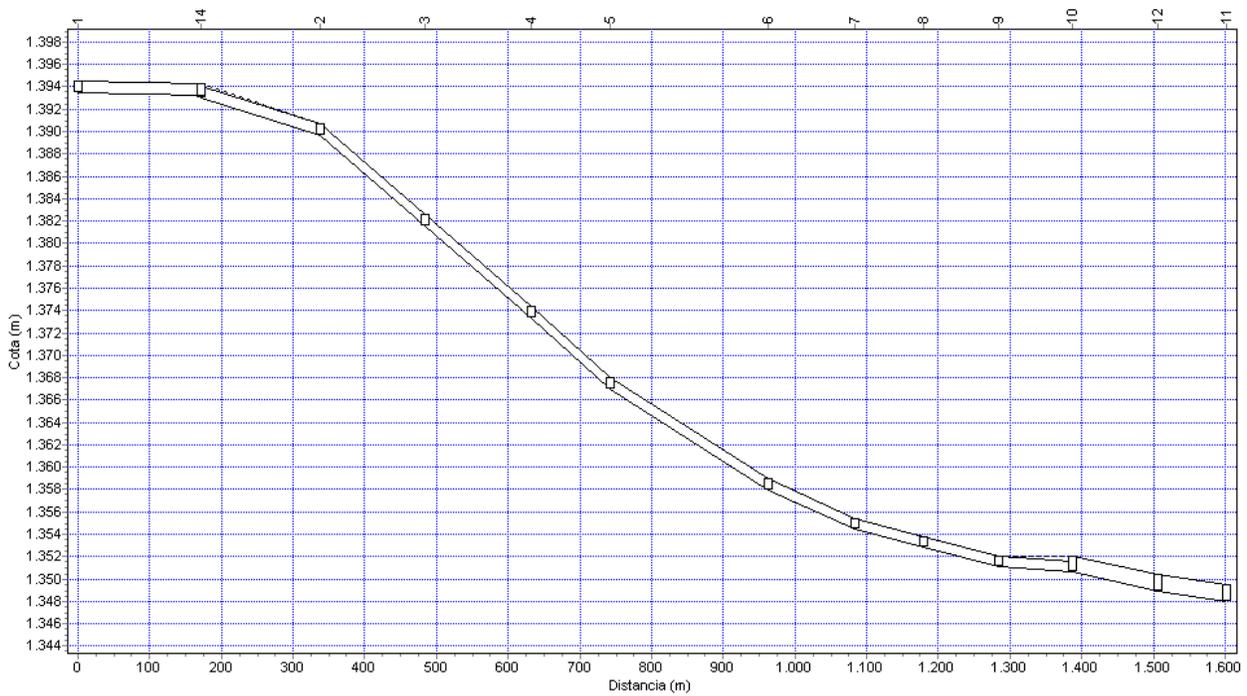


Figura 52: Perfil de estructura hidráulica para el cuarto arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis.

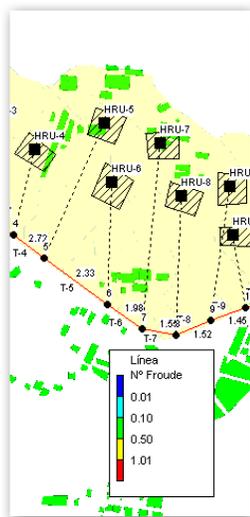


Figura 53: Valores de número de Froude para el cuarto arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis

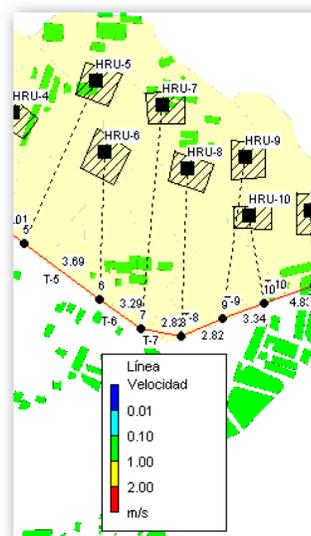


Figura 54: Valores de velocidad para cuarto arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis.

En el cuadro 10 se presentan las características físicas e hidráulicas del modelo en su opción # 4.

Cuadro 10. Características modelo hidráulico opción 4							
Tramo	Cota de fondo inicial (m)	Cota de fondo final (m)	Tipo de elemento	Longitud (m)	Pendiente	Velocidad máxima (m/s)	# de Froude
T-1	1393,50	1393,05	Canal	171,25	-0,26%	1,79	0,99
1	1393,05	1389,70	Canal	166,38	-2,01%	3,87	2
T-2	1389,70	1381,60	Canal	145,82	-5,55%	5,3	2,81
T-3	1381,60	1373,32	Canal	148,67	-5,57%	5,46	2,83
T-4	1373,32	1367,00	Canal	110,1	-5,74%	5,65	2,88
T-5	1367,00	1357,95	Canal	221,19	-4,09%	5,15	2,46
T-6	1357,95	1354,49	Canal	120,25	-2,88%	4,57	2,09
T-7	1354,49	1352,79	Canal	95,54	-1,78%	3,89	1,64
T-8	1352,79	1351,06	Canal	105,14	-1,65%	3,87	1,61
T-9	1351,06	1350,59	Tubería	102,47	-0,46%	4,44	1,33
T-10	1350,59	1348,89	Tubería	119,86	-1,42%	6,62	2,24
T-11	1348,89	1348,00	Tubería	95,29	-0,93%	5,68	1,73

Microsoft Excel 2003

Cuadro 11. Resumen de escorrentía en cuencas				
Cuenca	Precipitación total mm	Infiltración total mm	Escorrentía total mm	Coefficiente de escorrentía
HRU-1	26,67	11,83	14,84	0,56
HRU-2	26,67	17,94	8,73	0,33
HRU-3	26,67	19,04	7,63	0,29
HRU-4	26,67	23,79	2,88	0,11
HRU-5	26,67	22,59	4,09	0,15
HRU-6	26,67	25,01	1,66	0,06
HRU-7	26,67	15,55	11,13	0,42
HRU-8	26,67	24,36	2,31	0,09
HRU-9	26,67	25,95	0,72	0,03
HRU-10	26,67	22,29	4,38	0,16
HRU-11	26,67	22,84	3,83	0,14
Promedios	26,67	21,02	5,65	0,21

Microsoft Excel 2003

Es importante mencionar que las características y dimensiones tanto de la tubería circular como del canal se presentan en las láminas o planos que se incluyen en la sección de resultados posteriormente. Se incluye además toda la ruta del canal y su perfil altimétrico hasta el punto de entrega en el río Toyogres.

Diseño del pavimento

Después de llevar a cabo las etapas de información preliminar, valoración del diseño geométrico propuesto en 1997, y generar un rediseño de este, se determinó la estructura de pavimentos, basándose en el Manual de Diseño de Pavimentos y el TPDa suministrado por el MOPT. Los resultados se resumen en los siguientes cuadros.

Cuadro 12. TPDa y distribución de Tránsito Carretera hacia Paraíso									
		Livianos (%)		Pesados (%)				Total (%)	
Año	TPD	Automóvil	Carga liviana	Buses	2 Ejes	3 Ejes	4 Ejes	Livianos	Pesados
2005	12931	64,20	18,27	8,30	7,01	1,10	1,12	82,47	17,53
2006	13578	55,13	22,30	6,64	11,15	2,04	2,74	77,43	22,57
2008	12648	62,12	14,45	9,10	9,61	1,48	3,25	76,57	23,43
2018*	10118	62,11	14,45	9,10	9,61	1,48	3,25	76,56	23,44

Microsoft Excel 2003

El TPDa, junto con la composición del tránsito permitió obtener los datos de Ejes Equivalentes y generar a partir de este valor el diseño del pavimento.

Cuadro 13. Estimación de ESAL'S					
Tipo de vehículo	Cantidad de vehículos diarios	Factor de crecimiento	Tránsito de diseño	ESAL'S factor	ESAL'S de diseño
Livianos					
Vehículos livianos	6.284,54	1.463,04	3.356.004.903,87	0,0002	671.200,98
Carga					
Camión CL	2.382,88	554,74	5.694.574,98	0,0714	406.592,65
Camión C2	972,38	226,37	1.158.344,84	2,2672	2.626.199,42
Camión C3	149,75	34,86	73.715,21	1,5952	117.590,51
Articulados					
T3S2	328,85	76,56	211.919,10	2,7228	577.013,32
TPDa	10.118,40		3.363.143.458,00		4.398.596,87
Factor de dirección		0,5			
Factor de carril		1			
ESAL'S por carril de diseño		2.199.298			

Microsoft Excel 2003

Con el dato de Ejes Equivalentes el siguiente paso consistió en el análisis de los espesores para la estructura de pavimentos. Para iniciar este proceso se reunieron los valores de Mr, y los parámetros "a" y

"mi", relacionados con las condiciones de drenaje.

Cuadro 14. Cálculo CBR y Mr Muestra SL1-SL2				
Compact	Resistencia	Resistencia	CBR	CBR
(%)	0,1"	0,2"	0,1"	0,2"
93	4,76	6,79	6,76	6,43
96	5,10	7,01	7,24	6,64
98	5,78	8,03	8,21	7,60
CBR	7,1	Mr=	7,1*750	5325 Mpa

Microsoft Excel 2003

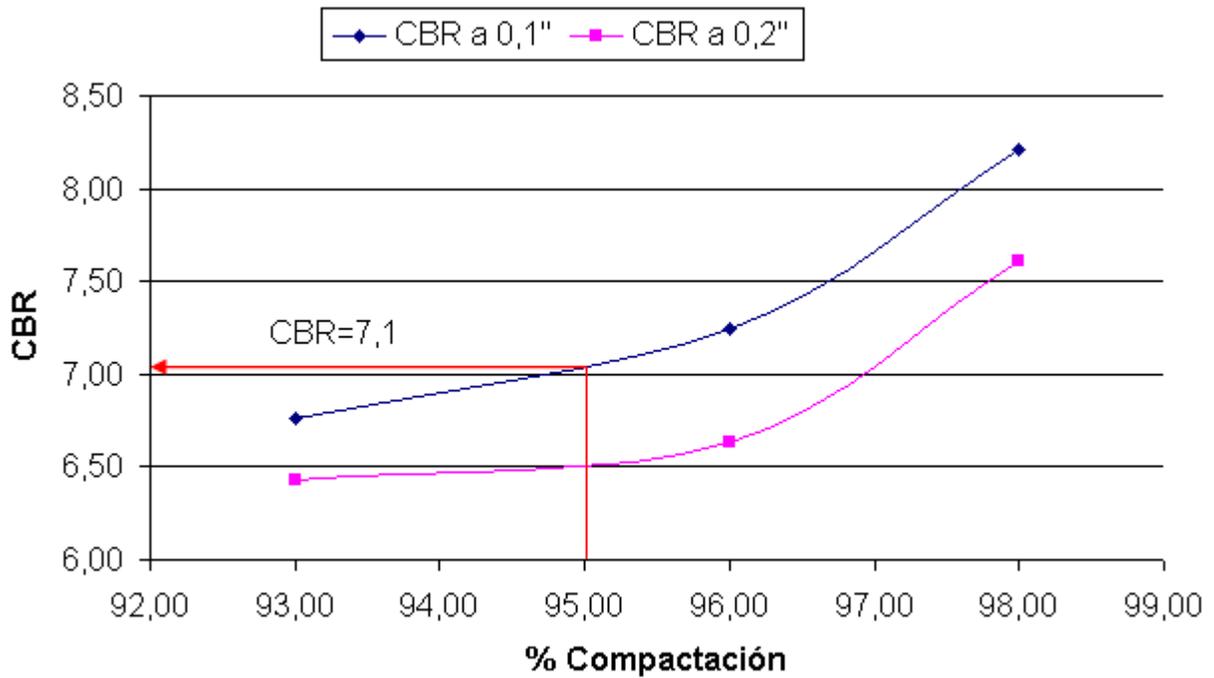


Figura 55: Estimación de CBR para muestra SL1-SL2
Microsoft Excel 2003



Figura 56: Muestra SL1-SL2
Microsoft Excel 2003

Cuadro 15. Cálculo CBR y Mr Muestra SL3-SL4				
Compact	Resistencia	Resistencia	CBR	CBR
(%)	0,1"	0,2"	0,1"	0,2"
87	2,96	4,2	4,2	4,0
93	6,23	8,36	8,8	7,9
97	9,26	12,3	13,2	11,6
CBR=	11	Mr=	11*750	8250 MPa

Microsoft Excel 2003

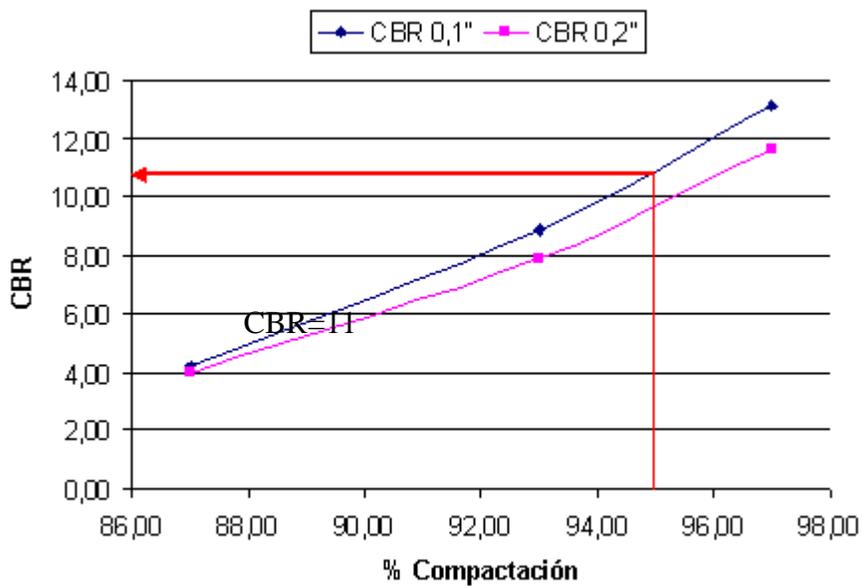


Figura 57: Estimación de CBR para muestra SL3-SL4
Microsoft Excel 2003



Figura 58: Muestra SL3-SL4

Cuadro 16. Datos de Diseño Espesores Estructura de Pavimento			
Material	Mr (Mpa-psi)	ai	mi
Capa Asfáltica	2760 (400000)	0,43	-
Base	207 (30000)	0,14	0,80
Subbase	97 (14000)	0,10	0,70
Subrasante (material SL1-SL2)	36 (5350)	-	-

Microsoft Excel 2003

Algunos datos extra, mencionados en el método de diseño del Instituto de Pavimentos de los Estados Unidos se muestran en el Cuadro 17

Cuadro 17. Datos Estadísticos para Diseño de Espesores	
Desviación Estándar (So)	0,35
Pérdida de serviciabilidad (Δ PSI)	2,00
Confiability (%R)	95,00
W18	2.199.289,00

Microsoft Excel 2003

Finalmente se generó por medio del diseño una propuesta de espesores para la carpeta asfáltica, la base y la subbase, se reúnen estos datos en el Cuadro 18

Cuadro 18. Espesores según diseño			
Elemento	Calculado	Mínimo según MCDP	A colocar
Capa Asfáltica (cm.)	15,24	9,00	15,24
Base (cm.)	12,70	15,00	15,00
Subbase (cm.)	40,64	-	40,64

Microsoft Excel 2003

Cuadro: Estimación de Costos Proyecto						
ITEM	DESCRIPCIÓN ITEM DE PAGO	UNIDAD	€/UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL	SUBTOTAL
1	EXPLANACIONES					\$47.463
1,1	Excavación vías de acceso	m ³	2,3	10.000	\$22.500	
1,2	Remoción de derrumbes	m ³	1,6	1.000	\$1.588	
1,3	Relleno compactado con material selecto	m ³ -Km	0,3	30.000	\$9.375	
1,4	Trasporte de materiales provenientes de Excavaciones	m ³ -Km	0,4	40.000	\$14.000	
2	SUB-BASES, BASES Y PAVIMENTOS					\$254.331
2,1	SubBase granular	m ³	6,0	4.088	\$24.324	
2,2	Base granular	m ³	12,1	1.533	\$18.511	
2,3	Imprimación	m ²	0,6	12.264	\$7.512	
2,4	Riego de liga	m ²	0,5	38.836	\$19.903	
2,5	Concreto asfáltico-Mezcla densa en caliente MDC-1	m ³	95,4	1.533	\$146.267	
2,6	Concreto asfáltico-Mezcla densa en caliente MDC-2	m ³	127,2	0	\$0	
2,7	Trasporte de materiales de sub-base, base y pavimento	m ³ -Km	0,3	71.540	\$22.356	
2,8	Geotextil	m ²	1,5	10.220	\$15.458	

3	ESTRUCTURAS Y DRENAJE Y OBRAS VARIAS					\$41.958
3,1	Excavaciones misceláneas	m ³	6,3	756	\$4.725	
3,4	Cunetas revestidas en concreto	m ³	98,5	378	\$37.233	
4	ESTRUCTURA DE CANAL, TUBERÍA Y OBRAS VARIAS					\$336.836
	CANAL					
4,1	Concreto 21 Mpa	m ³	152,6	308,18604	\$47.029	
4,2	Lastre compactado	m ³	105,3	513,6434	\$54.068	
4,3	Piedra Laha	m ³	61,4	740,54	\$45.472	
	TUBERÍA 152 CM					
4,4	Tubería 152 cm en 6m, suministro y colocación	un	582,0	39	\$22.620	
4,5	Lastre compactado	m ³	105,3	1.200	\$126.316	
4,6	Lastre cemento 105 Kg/cm2	m ³	106,8	219	\$23.342	
4,7	Excavación	m ³	2,3	3.000	\$6.750	
4,8	Relleno compactado	m ³	0,3	18.000	\$5.625	
	OBRA TRANSICIÓN					
4,9	Transición canal-tubería	glb	3508,8	1	\$3.509	
	OBRA DE ENTREGA					
4,10	Entrega tubería-río Toyogres	glb	2105,3	1	\$2.105	
5	SEÑALIZACIÓN					\$102.239
5,1	Líneas de demarcación	m	0,9	5.600	\$5.110	
5,2	Tachas reflectivas unidireccionales	un	7,7	467	\$3.582	
5,3	Tachas reflectivas bidireccionales	un	7,7	233	\$1.791	
5,4	Señales verticales de tránsito	un	90,2	6	\$523	
5,5	Postes de kilometraje	un	32,9	1	\$46	
5,6	Defensa metálica	m	98,7	924	\$91.187	
5	PUENTES	m	22500	73	\$1.642.500	\$1.642.500
TOTAL					\$2.425.327	
COSTO/ Mlineal (con puente) en 7,30 m de ancho=					\$1.732	

Figura 59: Estimación de costos.
Microsoft Excel 2003

Análisis de resultados

El inicio de este proyecto incluyó el análisis de la información previamente desarrollada por otras entidades y organizaciones, que desean dar una solución al tema.

Analizando la información recopilada, desde el año 2006 se determina que durante este proceso los habitantes de la zona afectada han tratado de resolver el problema canalizándolo a través de intercambio constante de información y solicitudes a diferentes entidades del gobierno tanto local, como a nivel nacional. Se incluyen la Municipalidad de Cartago, el Ministerio de Salud, la Defensoría de los Habitantes, Comisión Nacional de Emergencias y el Instituto Tecnológico de Costa Rica entre otras.

El 85% de la información enviada y recibida han sido cartas de quejas y respuestas, nada concreto en cuanto a alguna posible solución. Dentro de estos documentos lo realmente importante es analizar los dos informes técnicos presentados por los geólogos de la Comisión Nacional de Emergencias, cuyos documentos se numeran DPM-INF-772-2006 generado por el geólogo Esteban Bonilla y DPM-INF-0807-2007 generado por la Geóloga Dione Barahona. Al leer dichos documentos se encuentra que prácticamente son iguales, ya que el generado por Dione Barahona fue realizado como una reconsideración a lo definido por Esteban Bonilla un año atrás (*Convenio de información ITCR-Municipalidad de Cartago, 2009*).

Dentro de los aspectos planteados en estos documentos, se encuentran: datos generales de ubicación geográfica, una sección de análisis y conclusiones, normativa relacionada y medidas de prevención y mitigación.

Según el Cuadro # 1 del informe DPM-INF-0807-2007 se identifican los siguientes problemas: desde el sector frente a Transportes COMAVI hasta la Urbanización Clara Rosa se presenta ausencia de estructuras hidráulicas

debidamente diseñadas e impermeabilizadas, que permitan hacer frente a las solicitudes en los eventos de precipitación, esto provoca desbordamientos de los canales construidos en tierra e inundaciones que afectan las viviendas cercanas.

Por otro lado en algunas casas de habitación como la de la Sra. Laura Soto, se genera otro tipo de problema: existen tramos del río que se entubaron por debajo de los lotes donde actualmente existen casas habitadas; al cambiarse la sección hidráulica y ser esta inferior a la natural, se produce el desbordamiento de la estructura. En este informe también se detalla otras consecuencias de las inundaciones, como por ejemplo destrucción de la carpeta de rodamiento y aceras, esto se produce básicamente, por la erosión del material (*Bonilla E, 2006*).

Se consideró además, como parte del análisis de este problema por parte de la CNE, leyes que de alguna manera aplican para prevenir a futuro situaciones como esta, ya que a la fecha, muchos de los elementos planteados en estos reglamentos no se pueden implementar, por ejemplo zonas de protección de ríos y planes de ordenamiento territorial (*Barahona D, 2007*). En este caso específico el entubamiento de ríos y la falta de ordenamiento territorial es prácticamente irreversible por lo que es necesario plantear una solución real y que se pueda aplicar en estos momentos. Esta idea fue fundamentalmente el objetivo de este proyecto.

Se mencionan medidas de prevención y mitigación en estos informes técnicos. Cabe destacar que se sugiere llevar a cabo tareas de limpieza regulares de desechos sólidos, en los cauces afectados y las estructuras de drenaje presentes al momento de realizar el informe (*Barahona D, 2007*). Esta medida se considera que es independiente de si existe o no una estructura de concreto o solo un canal de tierra, ya que cualesquiera que sea, la limpieza y el mantenimiento de estos elementos es

fundamental siempre, por lo tanto esta medida es válida también para el canal de concreto revestido, diseñado en este trabajo.

Se incluyen además en el documento DPM-INF-0807-2007 el ampliar elementos hidráulicos existentes y revisar profundamente la emisión a futuro de permisos de construcción en zonas donde se puedan prever estas situaciones. Al respecto se considera que parte del problema, es la disponibilidad que tiene tanto el Gobierno local, como la empresa privada y entes educativos, de información actualizada y verás en el campo de la meteorología. Más allá de considerar los volúmenes de agua precipitados en épocas de inviernos, es importante tener datos que sean representativos de cada uno de los eventos de tormenta y así generar un diseño adecuado y económico.

La recopilación de estos informes permitió tener un contacto con la cara social del problema y comprender mejor todo el desarrollo del conflicto.

Dentro de la información resumida cronológicamente en el Cuadro 4 de este documento, se cita como primer punto, los planos de diseño geométrico generados por el INVU en 1997, para el tramo del eje vial Guadalupe Caballo Blanco a la altura de Dulce Nombre. Adelantando un poco el análisis, luego de conocer el problema y la información existente, se generó la idea de encausar hacia otra dirección las aguas de lluvia, que generan el problema. Esto llevó a investigar un poco si existía algún proyecto similar o del que se pudiese ver beneficiado este estudio, como una base para desarrollarlo. Sale entonces a escena un proyecto vial de 1997, que le daría continuidad a la circunvalación de Cartago, justo pasando por la zona en análisis y que además cruzaría en algún momento el río Toyogres. Esto permite llevar una obra hidráulica más o menos en paralelo con esta carretera y entregar las aguas al cauce de del Toyogres. Como parte de este proceso se desarrolló el Cuadro 5 del apartado "Resultados". Analizando la información que se muestra en este cuadro se determina entre otras cosas lo siguiente: la escogencia de una sección vial con un derecho de vía de 14m, esta escogencia se debe a la disponibilidad de espacio, el entorno vial existente y la presencia en el diseño vial de un puente que al aumentar el número de carriles, incrementaría el costo total de la obra. Por otro lado, el volumen de tránsito en la vía Paraíso-

Cartago, para esa época, rondaba los 9433 vehículos diarios, posiblemente esta vía fue considerada para hacer las estimaciones de de tránsito de diseño y según el Manual Centroamericano de Diseño de Carreteras establece, para este nivel de tránsito y el tipo de relieve existente (ondulado), la velocidad de diseño rondaría los 70 km/h, y en cambio se propone solo 50 km/h. Esta medida afecta el nivel de servicio estimado para la vía ("c" en este caso) y se está limitando a tener posibles problemas de tránsito. Los radios de curvatura son directamente proporcionales a la velocidad de diseño, asumiendo que esta selección de la velocidad fuese correcta, el radio mínimo permitido por el MCDC es de 90m mínimo, en este caso utilizan valores entre los 250-350 m. Las pendientes verticales propuestas están entre 0.7-4.0%, el manual sugiere valores entre 0.5-10%. Estos datos junto con algunos otros que califican el diseño anterior se encuentran resumidos, en el Cuadro 5, como se comentó anteriormente.

Como se mostró antes y como parte de la investigación se incluyó el análisis del trazado geométrico existente y se determinaron algunos problemas que se dan como consecuencia de no ejecutar este proyecto al momento de su diseño y la mala planificación territorial que generaron obras que al día de hoy afectan el trazado anterior.

Por esto y básicamente por desarrollar una solución de calidad, se generó un diseño vial totalmente nuevo, conservando únicamente la ruta propuesta en 1997. Durante el proceso de rediseño, se analizaron cinco posibles escenarios, y se fue descartando cada uno, hasta dejar la propuesta número cinco como definitiva. A continuación se analiza cada escenario y se justifica su descarte.

El primer escenario comprendía el trazo anterior completamente igual. Al analizarlo se encontró que el esquema plantea llegar al río Toyogres con el nivel de la rasante de una calle que cruza de sur a norte, junto a este río. Para aquel entonces cuando el diseño fue propuesto, probablemente no se consideró el incremento en las áreas impermeables y por lo tanto el aumento en la escorrentía superficial que va a dar a este cauce. La importancia de esta vía y los principios de calidad que se deben respetar al diseñar impiden actualmente colocar la carretera en este nivel a sabiendas que durante eventos de

precipitación el agua estaría pasando por encima de esta vía, lo cual es inaceptable y peligroso.

Se considera que este inconveniente es suficiente para descartar esta primera opción y se propuso por lo tanto la opción del segundo escenario.

Para este segundo escenario, la idea que se manejó fue proponer desviar la ruta original, hacia el norte buscando un nivel de terreno más alto por donde cruzar el río, evitando así los problemas de inundación en las cercanías de este. Al respecto y consultado con profesionales como el Ing. Rolando Fournier (*profesor del ITCR*), se llegó a la conclusión que esta opción, si bien elimina el problema de inundaciones, genera dos problemas diferentes. El primero y más importante es que la longitud del puente, se dispara casi a los 100m; esto representaría un costo, casi imposible de enfrentar y anularía la viabilidad económica del proyecto. Por otro lado al desviar la ruta hacia el norte, se estaría acercando la vía al sector sur de Caballo Blanco, sector que no tiene la capacidad vial para manejar los posibles volúmenes de tránsito que estarían circulando. Para terminar de definir el futuro de este escenario se planteó la idea a los ingenieros municipales quienes ratificaron que se debía descartar esta opción y volver sobre la ruta inicialmente planteada en los noventa.

Conociendo esta serie de impedimentos se buscó retomar el diseño original, como fue sugerido, pero evitando de alguna manera niveles tan bajos como los definidos en planos. Luego de revisar una y otra vez las posibilidades se determinó que lo mejor técnicamente, no así económicamente, era proponer un puente elevado sobre el Toyogres y la calle que atraviesa esta zona. Dicha estructura evitaría la cercanía con el cauce y los desbordamientos del mismo no afectarían la infraestructura propuesta. La mayor problemática de esta propuesta es claramente el tema económico, ya que, si bien es cierto el segundo escenario planteaba un puente de longitud mayor, se involucra una súper estructura de cerca los 73 m de largo que afectará el presupuesto para estas labores.

La reacción de los representantes de la Municipalidad de Cartago, fue que aunque la propuesta incluye esta estructura, es posiblemente la única opción que se tiene. Hay que recordar que actualmente existen urbanizaciones construidas y variaciones en la ruta involucrarían problemas de expropiación.

Definida la ruta para el nuevo diseño y bajo el precepto de la existencia del puente mencionado, quedó la posibilidad de generar el nuevo diseño geométrico. Este nuevo escenario tiene que ver ya no con la ruta horizontal de la vía, sino más bien con la primera propuesta de diseño vertical, las pendientes y la generación de altos volúmenes de corte y relleno. Por otro lado, aparece un nuevo parámetro a considerar, y es que las pendientes de la carretera actual que conecta el antiguo matadero con el cementerio de Dulce Nombre sobrepasan el 5%. El tramo entre el cementerio y el Toyogres, por la ruta propuesta, por el contrario tiene pendientes bajas cercanas al 2%. Este contraste de pendientes puede verse traducido en resaltos hidráulicos en la estructura de transporte creada para el manejo de la escorrentía.

Por último, se dio un quinto escenario, resultante de un balance entre los escenarios anteriores, buscando solucionar los nuevos problemas de pendientes y previendo posibles cortes y rellenos, de tal manera que el balance de masas sea equilibrado. Los resultados obtenidos incluyen curvas horizontales de transición, no solamente curvas circulares que resultan peligrosas y que se utilizan únicamente en desarrollos residenciales, radios de giro amplios, con valores entre 200 y 300m, relativamente pocas curvas en el trazado horizontal, lo que mejora la velocidad de circulación (*cercana a los 70 km/h*), y que permite disminuir riesgos de accidentes e incrementar el confort en el usuario. Las pendientes se propusieron bajo el precepto de evitar pendientes mayores al 6%, que afectan directamente la conducción provocando cambios de marcha y reducción de la velocidad. Además se buscó evitar la sensación de columpio en la carretera, con curvas circulares de radios amplios, que suavizan el trazado.

El movimiento de tierras es mínimo para la carretera y se ve alterado en cuanto a los volúmenes de corte, debido a la presencia del canal, que en la mayoría de los casos requiere una gaveta para la colocación de la estructura. Se debe recordar por lo tanto que los volúmenes de corte y relleno están en un 70% en función del movimiento de tierras para el canal y no para la carretera. Factores que influyeron nuevamente en este cálculo, son básicamente el tener que buscar pendientes bajas para el canal y la diferencia de niveles que existe en el terreno.

El nuevo diseño geométrico y los datos de volúmenes de movimiento de tierras se pueden valorar más ampliamente en las láminas que se presentan en la sección de "Resultados" del presente informe.

El resumen del análisis espacial generado se reúne en el Cuadro 6 de la sección de resultados. Sin embargo estos datos obtenidos tienen, todo un trasfondo de trabajo generado. Es muy importante comentar las distintas etapas llevadas a cabo.

En una primera instancia se trabajó con un modelo de elevación digital generado a partir de las curvas de nivel facilitadas por el PRUGAM. Estas curvas representan la topografía del lugar, que a su vez arroja información sobre: forma de la cuenca, extensión, parte aguas, y posibles puntos de concentración. A través del DEM, se derivó información paramétrica relevante para caracterizar la cuenca, entre la que se tiene: derivación del campo de flujo, datos de pendiente y aspecto y acumulación de flujo. A partir de la acumulación y por medio de TauDEM, se creó una imagen raster que considera la clasificación de cauces de acuerdo a la Ley de Strahler. En este proyecto en particular se obtuvieron corrientes que varían de orden entre los valores de 1 a 3 como valor máximo, en la zona de concentración cercana al cementerio de Dulce Nombre. Con base en esta nueva capa raster, se vectoriza, generando una nueva capa shape, que conserva los valores y datos propios del análisis anterior. Con base en la acumulación se generó posteriormente otra capa raster, pero que esta vez incluye las áreas tributarias para la red de flujo definida y que además es función de las características físicas del terreno; esto porque los niveles del mismo van definiendo hacia cual corriente se drena la escorrentía que se produce. Igualmente que en el tema de red de flujo, se generó una capa vectorial solo para las áreas tributarias en cuestión. Hay que recordar que la idea fundamental es tener un análisis espacial combinado, como se mencionó antes en el marco teórico, y con estas capas generadas el camino hacia este análisis combinado estaba casi listo.

Para terminar de completar el análisis combinado, se generaron capas vectoriales de uso de suelo, con lo que se estimó que el área impermeable representa solamente, para este caso, un 23%, aproximadamente del total de área en análisis, según lo muestra el Cuadro 6. ¿Qué

quiere decir esto o en qué se traduce?, básicamente en que el agua infiltrada será mayor a la que corra en forma de escorrentía superficial. Esto se analizará más detenidamente en la sección de hidrología.

Luego de este trabajo, se obtuvo finalmente la combinación de capas de trabajo la cual se muestra en la figura 46 y a partir de esta se determinaron todas las características físicas de la cuenca en general, permitiendo posteriormente ingresar en el módulo de trabajo de SWMM.

Ahora sí analizando los datos obtenidos y resumidos en el Cuadro 6, se puede decir que las curvas de nivel definen áreas tributarias de una gran variedad de tamaños; por ejemplo, existen valores que van desde metros hasta casi 13 ha. Ello toma importancia en el sentido de que la cantidad de escorrentía generada va directamente proporcional, con las áreas, entonces la producción en los puntos de descarga genera actualmente mayores o menores problemas según sea la ubicación del sitio en análisis respecto a estos puntos de descarga. En cuanto a los valores de pendiente del terreno, estos varían entre 6.80 y 12.22%, Tomando importancia estos datos en el sentido de que si se retoma el marco teórico de esta materia, se recordará que la pendiente influye en un 100.00%, en los tiempos de concentración de cada área tributaria a mayor pendiente como el caso del 12.22%, menor será su tiempo de concentración, claro considerando que este parámetro no funciona solo, sino que es un equilibrio directo con el área y la longitud entre el punto más lejano y el punto de entrega en cada subcuenca.

El área de edificaciones y calles resultará importante siempre, ya que contribuyen a incrementar el porcentaje de área impermeable. Se debe recordar que actualmente existen pavimentos capaces de contribuir a aumentar el área permeable, contrario a lo que siempre se ha considerado. Por ejemplo, el uso de adoquines aporta hasta un 50% de permeabilidad respecto a un asfalto tradicional; aún más recientemente se ha iniciado la producción de asfaltos 100% permeables, que se deben considerar a futuro, con la intención de disminuir la escorrentía superficial, facilitar el diseño de obras de recolección y transporte y sobretodo disminuir costos para que el Estado pueda tener una gestión más efectiva.

Todo esto comentado anteriormente y referente a áreas permeables e impermeables, fue parte del proceso de caracterización del uso de suelo necesario en el desarrollo del proyecto. Como se comentó dentro de los alcances y limitaciones del documento, para realizar la estimación de áreas impermeables se utilizó una "orthophoto" brindada por el PRUGAM; la resolución y la interpretación del autor genera una incertidumbre alrededor de la exactitud de los datos (*áreas permeables*), pero, aún así, esta es menor a la incertidumbre que se puede generar si se hubiese utilizado una capa de uso de suelo para la región central de Cartago generada tal vez hace más de cinco años. En resumen, la ventaja de este proceso fue que la fotografía refleja verazmente la realidad actual del tema de uso del suelo, ya que como por todos es conocido dentro del desarrollo de una provincia, nunca se cumple al 100% lo establecido en su plan regulador.

Dentro de los resultados obtenidos en el tema de análisis hidrológico, existen dos puntos que son los más sobresalientes y por ende importantes de considerar dentro de este análisis. El primer punto a discutir es los hietogramas obtenidos a partir de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, del IMN.

En primer lugar las curvas IDF se obtuvieron de aplicar las ecuaciones propuestas por el MADE, utilizando la metodología de Aparicio. Esto se refleja en el Cuadro 7 de la sección de resultados. Los datos son solo para la Ciudad de Cartago y están determinados por periodos de retorno entre 3 meses (*0.25 años*) y los doscientos años. Con consideraciones de duración del evento desde 5min hasta la hora y media (*90min*) generando valores de intensidad que se pueden encasillar en un rango de 15.71-265.85 mm/hr. Ahora la importancia de estos datos es que para generar los caudales de diseño, primero se debe determinar la intensidad que se considerará en el modelo de SWMM. En el caso específico de este proyecto se consideró un valor de 160mm/hr, aproximadamente que se genera para una duración de 10 minutos, con un período de retorno de 20 años. Este valor se identifica en el Cuadro 8. A partir de este dato SWMM generará sus estimaciones de la fase de producción.

Una vez generadas las curvas IDF para distintos períodos de retorno y como se explicó en el Capítulo de Marco Teórico, se pueden aplicar

distintos métodos para generar el hietograma de la zona, la Figura 49 muestra los hietogramas según los métodos de Hietograma de Chicago, Curvas de Huff y Bloques Alternos. Como se observa, el generado a partir de las Curvas de Huff tiene un desfase vertical respecto al resultado obtenido, mediante los otros métodos, lo que hace pensar que no es el más recomendable para elegir. Por otro lado, el generado con el Método de Chicago, es el extremo superior en cuanto al valor máximo de intensidad, si se quiere utilizar un hietograma más representativo este no es el más adecuado. En un nivel superior de forma general se encuentra el hietograma de Bloques Alternos, que vendría a representar el caso más grave. Básicamente por estas razones se eligió utilizar el método de Bloques Alternos para ingresarlo en el Modelos de SWMM y así cubrirse de alguna manera la espalda, pues si la estructura diseñada resiste el evento predicho por el hietograma del método de Bloques Alternos, teóricamente tendría que resistir cualquier otro evento.

Una vez realizado el estudio de curvas IDF y la generación de hietogramas, el siguiente paso, fue utilizar el software Storm Water Managment Model (SWMM), para estimar el caudal total producido en las área tributarias generadoras del problema. Básicamente en esta etapa se encontraron las mayores dificultades de información, ya que todo lo relacionado al campo de la meteorología es complejo y sobretodo información difícil de conseguir. Es necesaria una alta representatividad de los eventos de tormenta y actualmente los espacios junto con los dispositivos ubicados en zonas del país para recolección de datos son muy limitados. La certeza de los datos obtenidos no se puede garantizar y por lo tanto es una fuente considerable de error que hay que tener presente.

Inicialmente los esfuerzos estuvieron en ingresar al sistema las propiedades físicas que se determinaron durante el análisis espacial, por ejemplo pendiente, áreas, hietograma, etc. Por otro lado se inició la definición de la ruta que seguiría la obra hidráulica de transporte que se requería diseñar, esto se basó en la ubicación de los puntos de descarga y la ruta de la carretera. Según lo muestra el Cuadro 11 con un resumen de valores de escorrentía por área tributaria se demuestra lo comentado anteriormente respecto a que por lo general la infiltración fue superior a la escorrentía superficial generada. Como se explicó

esto se debe a la existencia de un porcentaje mayor de áreas permeables que impermeables, los coeficientes de escorrentía, estuvieron en promedio por debajo de 33%, salvo dos casos en donde la escorrentía sí fue mayor que la infiltración, muy probablemente obedeciendo esto a las áreas tributarias donde hubo mayor cantidad de espacios impermeables.

El valor máximo de escorrentía acumulada fue de 8.0m³/s, según lo muestra la Figura 50. relacionada al hidrograma generado por SWMM luego de correr la simulación. Este valor se considera alto, ya que según el SENARA un caudal es pequeño si está por debajo de 0.1m³/s; este valor es multiplicado 80 veces en el caudal estimado para este caso, por lo que clasifica como un caudal de obras mayores.

Durante la interacción con el programa, al igual que en la definición del diseño geométrico de la carretera, se generaron varias posibilidades, especialmente en el tema del manejo de pendientes, velocidades y estados de flujo. Se presentaron 4 escenarios con tramos formados por un canal trapezoidal y otros formados por tubería. Una a una fue descartada cada opción, exceptuando la número cuatro.

En el caso de la primera propuesta se tuvieron dos problemas principales: el primero tuvo que ver con las velocidades generadas, que sobrepasaban los 6 m/s, provocando un estado de flujo en el que la estructura propuesta sufriría problemas de erosión. El segundo problema tuvo

que ver con las velocidades, ya que en tramos con altas pendientes se lograba tener un estado supercrítico, pero al pasar a pendientes menores y verse reducida la velocidad de circulación, se generaban resaltos hidráulicos, que no podía permitirse, pues afectaría el correcto funcionamiento de la obra.

Se muestra a continuación la primera opción analizada, conformada por un canal trapezoidal y tramos de tubería circular, pendientes similares a las del terreno y elementos de unión (tubería o canal) solamente entre los nodos de descarga. No se incluyeron elementos de caída intermedios.

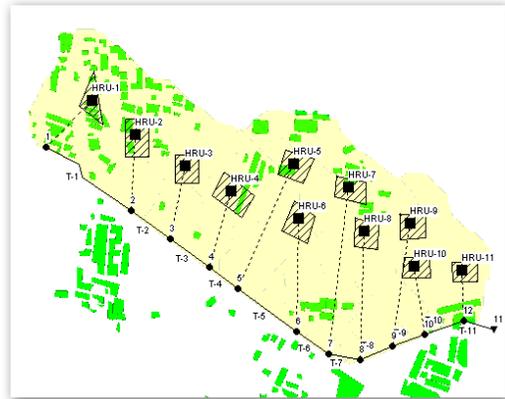


Figura 55: Modelo hidráulico correspondiente a la primera opción. Software: MapWindow Gis.

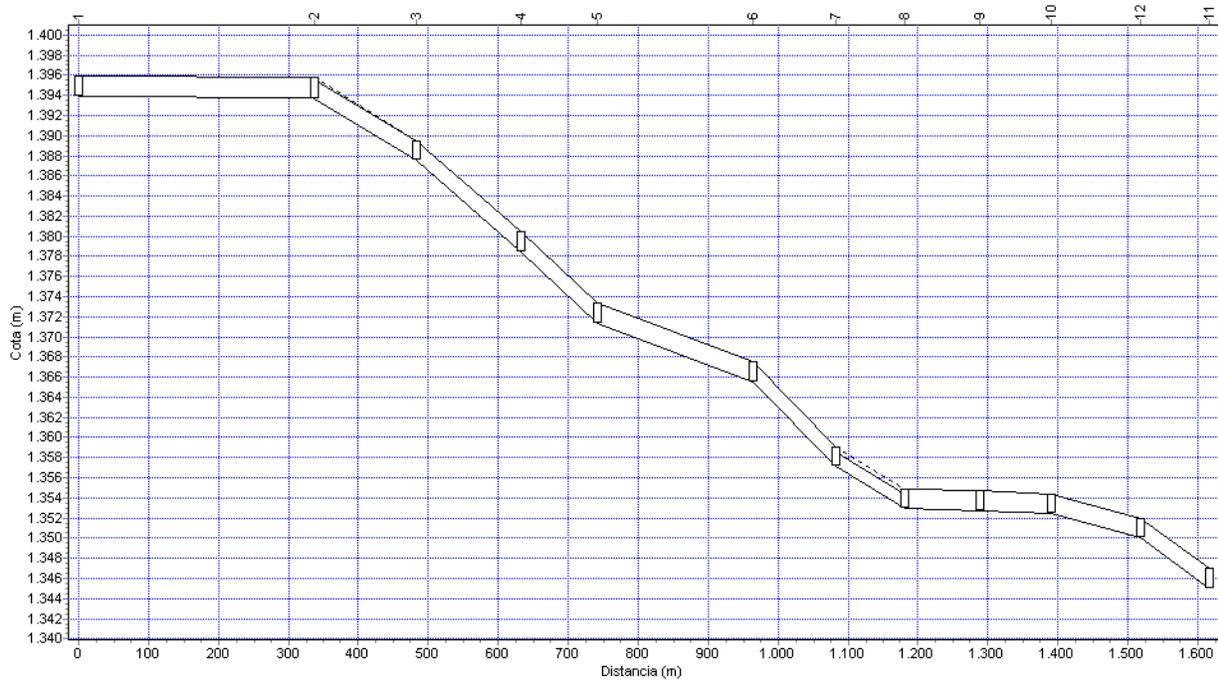
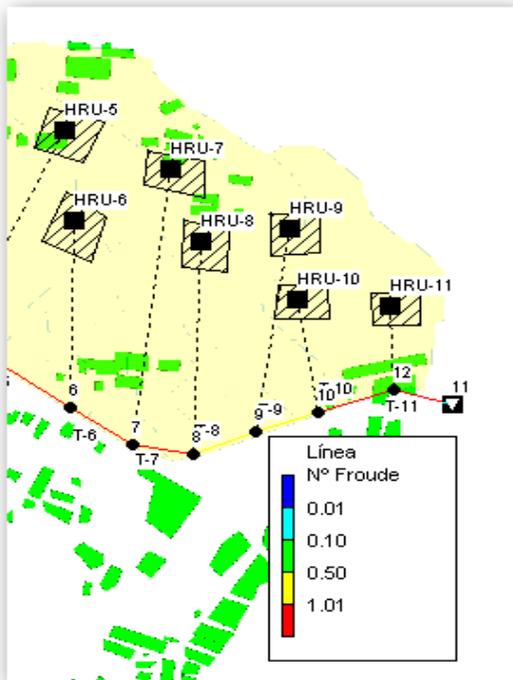


Figura 56: Perfil de estructura hidráulica para primer arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis.



La figura anterior muestra problemas de resalto hidráulico generado en tramos del canal, bajo las primeras condiciones de diseño. La siguiente figura por su parte presenta los valores de velocidades típicas dadas en esta primera opción de diseño.

Figura 57: Valores de número de Foude generados en la primera opción de análisis, durante la simulación. MapWindow GIS

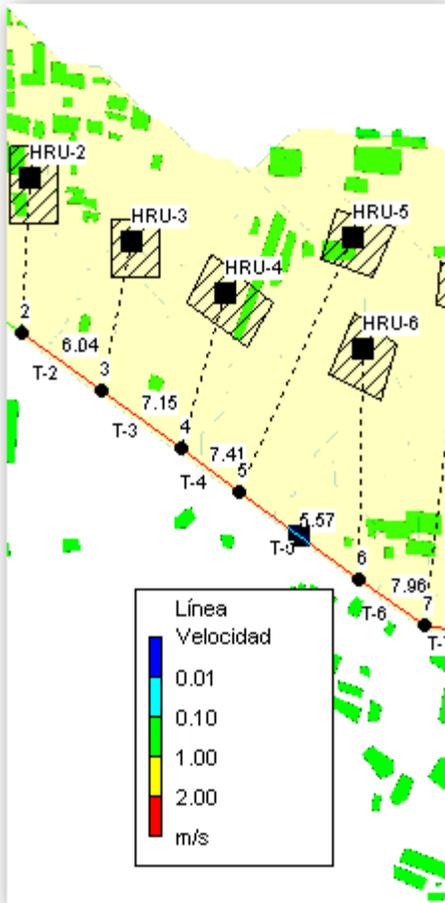


Figura 58: Valores de velocidades para primer arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis.

En la segunda opción presentada se buscó corregir estos problemas incluyendo obras de caída vertical en el recorrido, con esto se disminuían las pendientes en sectores donde era necesario y con esto la velocidad bajaría evitando la erosión y los resaltos hidráulicos. La deficiencia consistía en que todavía las pendientes no eran lo suficientemente bajas para ahorrar costos y facilitar la labor de movimiento de tierras y construcción de la obra.

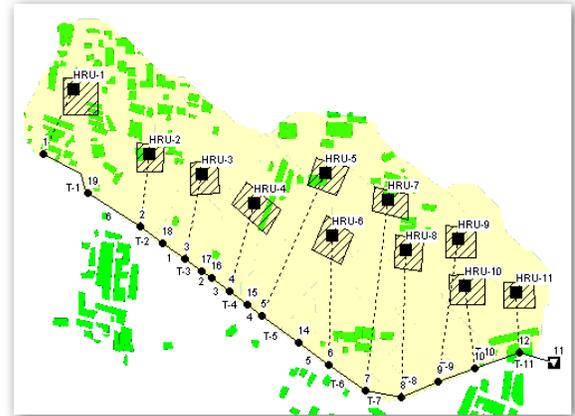


Figura 59: Modelo hidráulico correspondiente a la segunda opción. Software: MapWindow Gis.

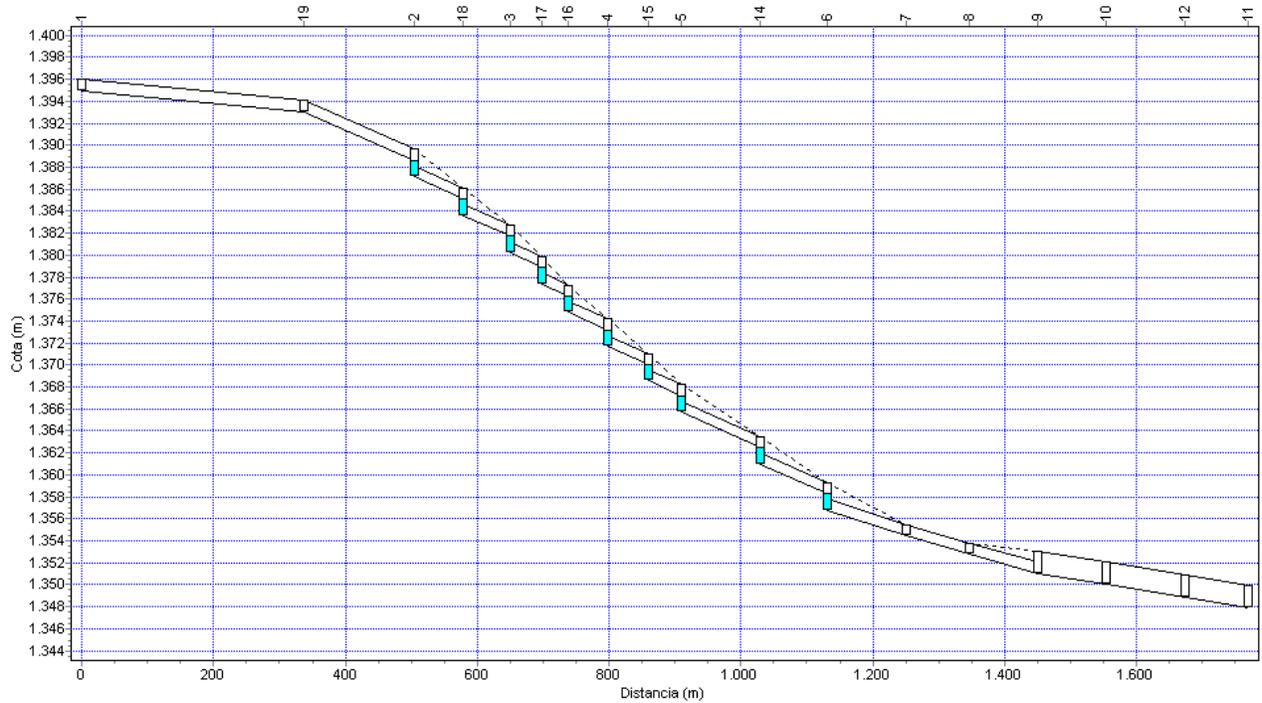


Figura 60: Perfil de estructura hidráulica para el segundo arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis.

Durante esta segunda opción se dio la corrección del problema generado por la presencia de resaltos hidráulicos, que se presentaron en la primera opción, como lo muestra la siguiente gráfica.

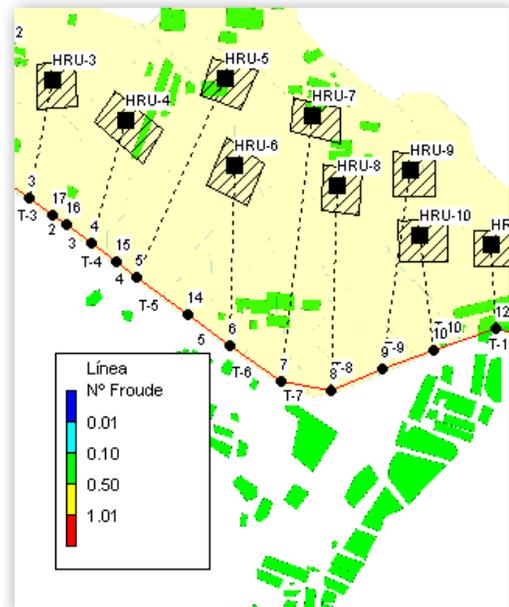


Figura 61: Valores de número de Fraude generado en la segunda opción de análisis, durante la simulación. MapWindow GIS

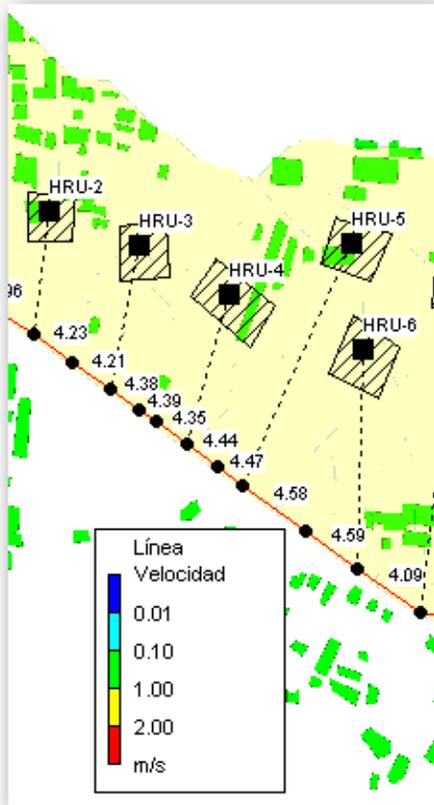


Figura 62: Valores de velocidad generados en la segunda opción de análisis, durante la simulación. MapWindow GIS

Los valores de velocidad que se obtuvieron, en este segundo análisis, fueron menores a 5.0 m/s.

Continuando con los resultados obtenidos, la segunda opción analizada tiene por su parte un 80% de su longitud en un canal trapezoidal y un 20% en tubería al igual que las otras opciones. En cuanto a pendientes estas disminuyen con la utilización de elementos de caída vertical, que le da forma de gradas al recorrido. Estas gradas quedan entre puntos de descarga del sistema.

Los problemas presentados en el escenario 3 se buscaron corregir al máximo con la inclusión de un número mayor de caídas logrando acercar lo más posible el trazo vertical del canal a los niveles del terreno. Como otra opción descartada la tercera opción presentaba el inconveniente de que la elaboración de los elementos de caída y en sí la construcción del sistema para el canal, se volvía muy difícil e impráctica, aunque ya las velocidades eran incluso menores a 4.5 m/s y los estados de flujo en su totalidad eran supercríticos.

Continuando con la meta de encontrar una buena opción de diseño, se definió una tercera opción que se muestra a continuación:

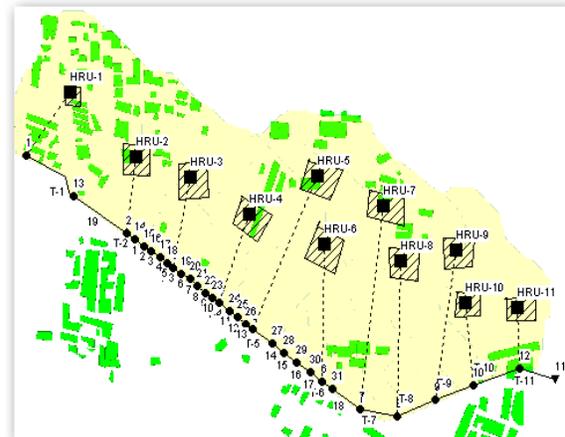


Figura 63: Modelo hidráulico correspondiente a la tercera opción. Software: MapWindow Gis.

Este arreglo, a diferencia del anterior, incluía un número mayor de elementos de caída y pendientes menores.

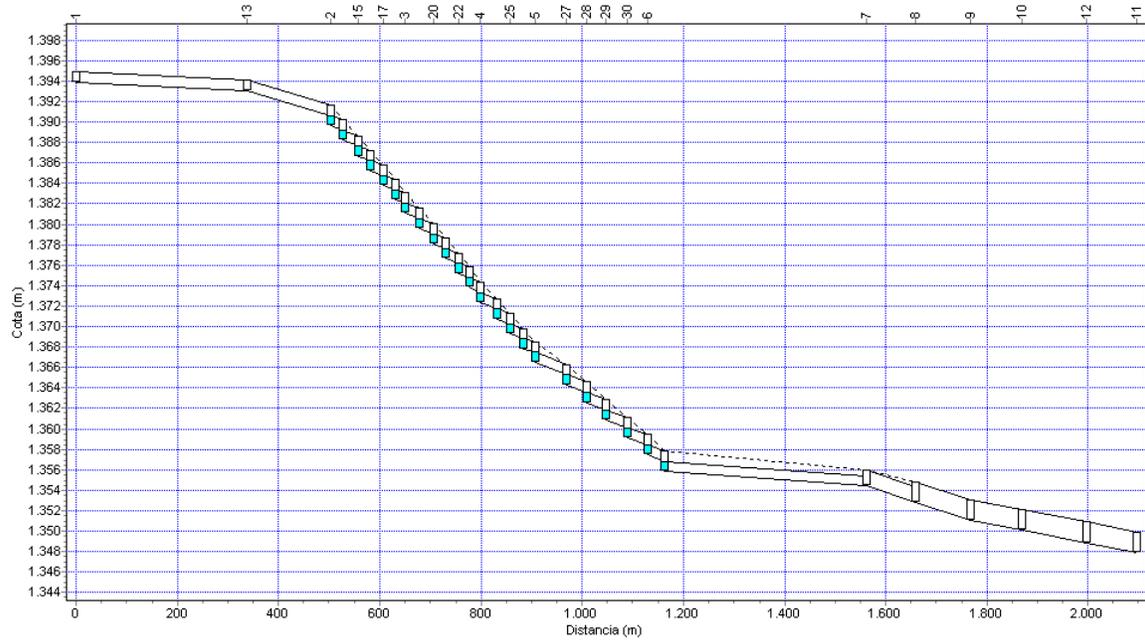


Figura 64: Perfil de estructura hidráulica para el tercer arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis.

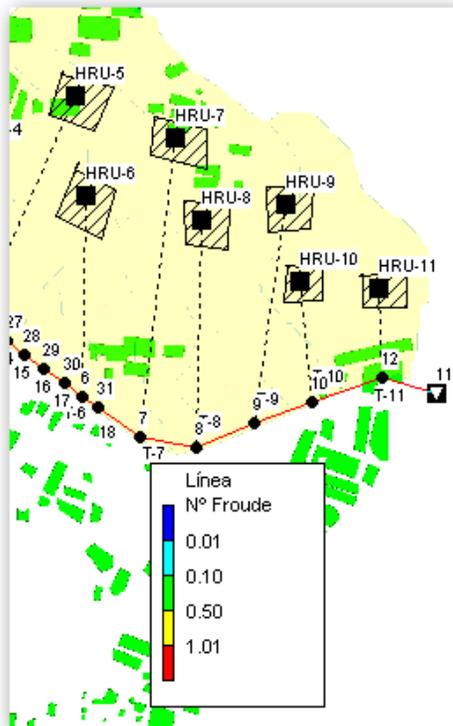


Figura 65: valores de número de Froude para el tercer arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis

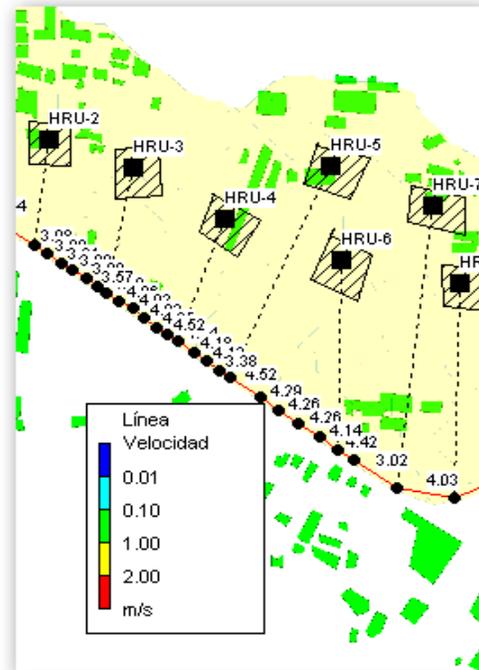


Figura 66: Valores de velocidad para el tercer arreglo de canal y tubería. Software: MapWindow Gis

Por último se valoró de nuevo el trazado inicial y se logró corregir el tema de las velocidades y por ende los estados de flujo, utilizando “n” de

Manning de materiales que generaran una mayor fricción en el movimiento con el agua, por ejemplo un enchape en roca, con un "n" de manning aproximado a 0.017. No se generarían entones resaltos hidráulicos y se mantendría controlada la velocidad. Como toda opción tiene defectos que hay que sacrificar para generar una opción realista y funcional, en este caso el movimiento de tierras es afectado por la disposición del canal y se generan volúmenes de corte considerables que serán necesarios reubicar.

Luego de terminar esta propuesta quedó definida la sección trapezoidal y circular del canal y la tubería respectivamente. Especificaciones y medidas del canal y la tubería se muestran en el juego de láminas adjunto en la sección de resultados.

Regresando al área de diseño de carreteras, el último paso, para completar el diseño de la vía era proponer una estructura de pavimento. Por afectos económicos y respetando lo definido en el 97 por el INVU para esta vía, se seleccionó un pavimento flexible de asfalto, cuya estructura fue diseñada utilizando el Método del Instituto del Asfalto de los estado Unidos. Para determinar los espesores, fue necesario como primer paso evaluar la futura subrasante, por lo que se fue al campo y se obtuvieron dos muestras de suelo presente en el lugar.

El primer suelo designado como SL1-SL2 (*ver Figura 56*), es una mezcla con características de elementos arcillosos color café claro, sin olor y con presencia de algunos materiales contaminantes como raíces. Mediante manipulación en laboratorio se determinó que esta muestra tenía mejores características estructurales que la siguiente, sin embargo al realizar la prueba CBR se observó que era susceptible al hinchamiento, esto por que al estar en saturación para la prueba CBR, su hinchamiento se duplicó. El dato de CBR, primordial para obtener el valor del módulo de resiliencia (M_r) dio 7,0, según lo muestra la Figura 55, que en una escala de 1 a 100 es bastante bajo, pero se encuentra dentro de lo normal para una subrasante (cerca de 5000 Mpa en su M_r). Por su parte la muestra SL3-SL4 (*ver Figura 58*), tuvo una mejor calificación en cuanto

al dato de CBR, con un valor de 11, según lo muestra la Figura 57; sin embargo es descartada ya que posee gran cantidad de material orgánico, que se demuestra en su color negro, raíces que formaban grumos y un fuerte olor a materia en descomposición luego del período de saturación, antes del ensayo de CBR.

Posteriormente fue importante consultar el TPDa de la vía Paraíso-Cartago, esto en el MOPT, en su departamento de planificación. La importancia de este dato radica en su utilidad para hacer una estimación de tránsito que podría circular por la vía en diseño, especialmente en algún momento en el que la vía de Cartago-Paraíso sea cerrada. Se estimó el TPDa para la carretera de diseño, como un 80% del tránsito que circuló durante el 2008 por la vía mencionada, además se consideró un crecimiento cercano al 13% de vehículos que podría utilizar esta vía en un plazo máximo de 15 años según la proyección que pide el Manual de Diseño de Pavimentos, en su Cuadro 7-1, para carreteras troncales o colectoras. Los datos que se comentan en esta sección se presentan en el Cuadro 12 del espacio de resultado.

Ya con estos datos se dio el diseño de la estructura de pavimentos, utilizando como subrasante el material de la muestra SL1-SL2, se obtuvieron espesores de subbase, base y carpeta mayores a los mínimos solicitados por el Manual de Pavimentos y que a su vez cumplen con la demanda del tránsito, según lo presenta el Cuadro 16.

Conclusiones

- Respecto a la información disponible para la realización de este proyecto, se concluye que más de cinco entidades gubernamentales han intervenido en el problema sin éxito y han malgastado de alguna manera aproximadamente cuatro años, en un sistema que no le brinda al ciudadano una respuesta concreta y una solución real a sus problemas. Con un análisis más profundo y menos político al inicio de esta gestión, se hubiese presentado alguna propuesta técnica, más allá de informes técnicos que sugieren ideas que al día de hoy no se pueden realizar. Esto optimizaría los gastos que se incurren ante situaciones similares y generaría mayores dividendos para todos.
- Por otro lado, la gestión de organismos y programas, como por ejemplo el PRUGAM y el convenio de información entre el ITCR y la Municipalidad de Cartago, demuestran que ante una buena gestión se puede generar información de primer orden, y se pueden dar, en conjunto, soluciones a problemas sociales que requieren una pronta respuesta. El desarrollo técnico de los costarricenses, se debe aprovechar desde el inicio de su florecimiento, incorporando a los estudiantes a programas de bienestar social y ayuda a la comunidad, por medio de su conocimiento adquirido.
- El diseño geométrico propuesto en 1997 es parte de la información encontrada. Al respecto se indica: en general y a la luz del Manual Centroamericano de Diseño de Carreteras, el diseño propuesto en ese año cumple con los parámetros básicos propuestos teóricamente en ese documento. Solamente se considera que la velocidad de diseño propuesta (50 km/h), no obedece a lo dictado por este manual para el volumen de tránsito proyectado.
- Continuando con el diseño geométrico de 1997, se concluye que en la actualidad este diseño, no se debe realizar, pues existen obras de infraestructura vial y edificaciones que afectan el recorrido propuesto. Además los volúmenes de escorrentía han crecido, como efecto del aumento en las áreas impermeables por lo que el diseño anterior se vería afectado por inundaciones en las cercanías del río Toyogres.
- El replanteo del diseño horizontal y vertical genera volúmenes de corte y relleno adecuados y debidamente balanceados. Se debe analizar a fondo el sistema de transporte para la escorrentía, ya que este genera volúmenes de corte que no se pueden balancear y esto provocaría, costos altos de transporte y deposición de material.
- La teoría expuesta en este proyecto acerca de sistemas de información geográfica, podría generar en el lector la sensación de que son sistemas muy complicados y poco prácticos. Luego de la experiencia de haberlos utilizado, se comprende que los beneficios generados son invaluable, se facilita y ahorra tiempo y dinero en análisis más precisos e integrales, ya que la visión del ingeniero se vuelve más global y se logra abarcar, mayor número de variables. Por último al ser en su mayoría software libre se tiene

el soporte de una comunidad técnica mundial, que le ayuda al usuario a través de sus experiencias.

- Los SIG son elementos imprescindibles, en la caracterización de cuencas siendo estas, elementos fundamentales del análisis hidrológico. Su uso y aprovechamiento dependen en gran parte de la información disponible para el país en donde se desarrolla el proyecto.
- Los estudios meteorológicos se plantean teóricamente como el análisis de miles de datos recopilados por las estaciones meteorológicas. Países como Costa Rica, con muchas limitaciones es este tema, deben recurrir a la utilización de métodos alternativos. Durante la realización de este proyecto se aplicó esta teoría al emplear curvas de IDF para generar hietogramas y poder desarrollar el análisis hidrológico.
- Dentro de los métodos para la estimación de caudales de escorrentía propuestos en el apartado de marco teórico, y ante la aplicación del Método de Número de Curva del SCS, se determina que su eficiencia se encuentra en poder considerar más etapas del ciclo hidrológico del agua, a través del manejo de variables como escorrentía superficial, filtración, evaporación, entre otras.
- Se considera que los elementos hidráulicos propuestos en este proyecto, son una posible solución técnica, sin embargo se debe analizar a fondo la opción de utilizar solo sistemas de tubería, esto porque se podría optimizar los volúmenes de material sobrante, al cortar y rellenar nuevamente con parte de ese material. Se debe estimar además la relación beneficio costo de algunas otras opciones y considerar este proyecto una base para determinar la mejor solución al problema.
- La disponibilidad de equipo de laboratorio y personal técnico para el desarrollo de proyectos de investigación y diseño es un pilar que se debe fortalecer. En este caso las muestras de suelo ensayadas de CBR cumplieron con las expectativas teóricas para una subrasante, y la muestra seleccionada fue utilizada para

la estimación de espesores en la estructura de pavimento propuesta.

- El presupuesto presentado permite el costo de este tipo de obras y, además, es un arma útil para efectuar comparaciones con otras posibles opciones.

Recomendaciones

- Se recomienda a la Municipalidad de Cartago y en general a todos los ayuntamientos del país, velar por el cumplimiento de los planes reguladores, ya que, de no considerarlos a futuro, los proyectos de desarrollo en infraestructura se pueden ver perjudicados, por malas gestiones. Esto puede hacer al Gobierno incurrir en gastos innecesarios y fuera de todo presupuesto.
- Explotar más la tecnología actual e incorporar, dentro de los planes de carrera y los cursos, sistemas de información y toda aquella tecnología que favorezca el desarrollo integral de la comunidad estudiantil y profesional de este país.
- Implementar la utilización de software de uso libre, que ayude a desarrollar las herramientas tecnológicas que se encuentran al alcance de todos, especialmente de los educandos.
- Los estudios geotécnicos de un proyecto similar o igual al presentado en este documento requieren un estudio completo en el campo de la geotecnia. Los ensayos de suelos aplicados, fueron ejecutados con la intención de darle un mayor sustento a los datos obtenidos, sin embargo no se consideran de ninguna manera como suficientes, por lo que la investigación en este campo se debe profundizar.
- Se debe analizar a fondo el sistema de transporte para la escorrentía, ya que este genera volúmenes de corte que no se pueden balancear y esto provocaría, costos altos de transporte y deposición de material.
- Se debe analizar a fondo la opción de utilizar solo sistemas de tubería, esto porque se podría optimizar los volúmenes de material sobrante, al cortar y rellenar nuevamente con parte de ese material. Se debe estimar además la relación beneficio costo de algunas otras opciones y considerar este proyecto una base para determinar la mejor solución al problema.

Apéndices

Anexos

CARTA DE ENTENDIMIENTO

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Marlon Navarro Pacheco carné 200320792, autorizo a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título Diseño y evaluación hidrológica del tramo del eje vial Guadalupe-Caballo Blanco del Plan Vial de la Ciudad de Cartago a la altura de Dulce Nombre para ser ubicado en la Biblioteca Digital y ser accesado a través de la red Internet.

Firma de estudiante
Cédula: 3400629

HOJA DE INFORMACIÓN

Información del estudiante:

Nombre: Marlon Navarro Pacheco

Cédula o No. Pasaporte: 3400629

Carné ITCR: 200320792

Dirección de su residencia en época lectiva: Cartago Taras 25 m sur del Taller EMO

Dirección de su residencia en época no lectiva: Cartago Taras 25 m sur del Taller EMO

Teléfono en época lectiva: 8878-5394

Teléfono época no lectiva: 8878-5394

Email: panama1985@gmail.com

Fax: 25373400

Información del Proyecto:

Nombre del Proyecto: Diseño y evaluación hidrológica del tramo del eje vial Guadalupe-Caballo Blanco del Plan Vial de la Ciudad de Cartago a la altura de Dulce Nombre.

Profesor Asesor: Ing. Maikel Méndez

Horario de trabajo del estudiante: Miércoles todo el día

Referencias

- Anónimo. 2009. **MAPWINDOW GIS USER`S MANUAL AND QUICKLY GUIDE.** Estados Unidos. United States Environmental Protection Agency.
- Aparicio, F.1992. **FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE.** México. Editorial mexicana, 152.p.
- Barquero. E. 2006. **CURSO CARRETERAS I.** Instituto Tecnológico de Costa Rica
- Barquero. E. 2007. **CURSO PAVIMENTOS.** Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Chow, V et. al.1994. **HIDROLOGÍA APLICADA. Colombia.** Editorial McGraw Hill Interamericana S.A.
- Convenio de Información ITCR-Municipalidad de Cartago. 2009. **PLANOS INVU 1997.** Costa Rica.
- Coronado, J. 2002. **MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS.** Guatemala. Secretaría de Integración Económica Centroamericana SIECA.
- AASHTO, D 1557-99 **STANDAR TEST METHOD FOR LABORATORY COMPATION CHARACTERISTICS OF SOIL USIGN MODIFIED EFFORT.** Estados Unidos. Annual Book of ASTM Vol 04.08
- AASHTO D 1883-99. **STANDAR TEST METHOD FOR CBR OF LABORATORY-COMPACTED SOILS.** Estados Unidos. Annual Book of ASTM Vol 04.08
- Leclair, R. 2001. **NORMAS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LAS CARRTERAS REGIONALES.** Guatemala. Consejo Sectorial de Ministros de Transporte de Centroamérica COMITRAN.
- Lewis A. et al. 2005. **STORM WATER MANAGMENT MODEL USER`S MANUAL.** Estados Unidos. United States Environmental Protection Agency.
- Mays, L. 2001. **STROM WATER COLLECTION SYSTEMS DESIGN HANDBOOK.** Estados Unidos. Editorial MacGraw Hill.
- Méndez, M. 2009. **ANÁLISIS ESPACIAL EN HIDROLOGÍA CON SAGA Y MAPWINDOW PPT.** Costa Rica. ITCR.
- Méndez, M. 2009. **CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE HIDROLOGÍA EN GIS PPT.** Costa Rica. ITCR.
- Méndez, M. 2009. **WATERSHAPE DELINEATION CON MAPWINDOW GIS PPT.** Costa Rica. ITCR.
- Mott, R. 1996. **MECANICA DE FLUIDOS APLICADA.** México. Editorial Preatice Hall.
- Novak, P et. al.2001. **ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS.** Colombia. Editorial McGraw Hill Interamericana S.A.
- PRUGRAM. 2009. **Capas Temáticas, Carreteras y Ciudades.** Cartago.
- PRUGRAM. 2009. **Fotografía Aérea Cartago.** Costa Rica.
- Villón, M. 1983. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS.** Costa Rica. Editorial Tecnológica.