APOYO EN LOS ESTUDIOS HIDRÁULICOS E HIDROLÓGICOS PARA EL DISEÑO DE PASOS SUBFLUVIALES ADJUDICADOS A LA EMPRESA SOLINCON LTDA

Informe final de trabajo de grado, en la modalidad de pasantía para optar el título de Ingeniera Sanitaria

NICHOLL VALERIA RODRÍGUEZ ORJUELA - Cód. 20202781007

Supervisor designado:

OSCAR JAVIER PARDO MORENO
Ingeniero Civil- Geotecnista

Docente director:

JUAN SEBASTIÁN DE PLAZA SOLÓRZANO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA SANITARIA
BOGOTÁ D.C
2023

CONTENIDO

1. OBJETIVOS 5
OBJETIVO GENERAL 5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
2. MARCO TEÓRICO 6
3. METODOLOGÍA 8
3.1. Fase preliminar 8
3.1.1. Recolección de información y descripción general del municipio y área de estudio. 8
3.1.2. Descripción hidrológica y morfométrica de la cuenca de estudio 9
3.2. Fase de planeación. 10
3.2.1. Métodos Hidrológicos 11
3.3. Fase de ejecución. 17
3.3.1. HEC-HMS 17
3.3.2. HEC-RAS 18
4. RESULTADOS ALCANZADOS 25
5. CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS EN EL DESARROLLO DE LA PASANTÍA 25
6. APORTES A LOS PROCESOS 25
7. CONCLUSIONES 27
BIBLIOGRAFÍA 28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano Topográfico con batimetría 8

Figura 2. Recopilación de datos del suelo en campo 9

Figura 3. Página Web del IDEAM con información de las estaciones hidrometeorológicas a nivel Nacional. 9

Figura 4. Delimitación de la cuenca de estudio en ArcGIS y obtención de datos morfométricos 10

Figura 5. Representación esquemática de las etapas de un río y tipos principales de cauce. 10

Figura 6. Distribución estaciones hidrológicas Polígono de Thiessen 11

Figura 7 Precipitación media total mensual multianual 12

Figura 8. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia 13

Figura 9. Datos de las estaciones EAAB 13

Figura 10. Curva IDF generada a partir de Los datos proporcionados por la EAAB. 13

Figura 11. Uso del suelo en al área de influencia 16

Figura 12. Ingreso de los resultados del hietograma de diseño en HEC HMS. 18

Figura 13. Gráfica generada en HEC HMS del hidrograma unitario SCS 18

Figura 14. Resumen resultados obtenidos para la modelación de un periodo de retorno de 100 años en el software Hec-HMS. 18

Figura 15. Secciones trasversales sobre HEC RAS. 19

Figura 16. Perfil secciones trasversales. 19

Figura 17. Ingreso de caudales obtenidos en HEC-HMS para cada periodo de retorno a HEC-RAS. 20

Figura 18. Perfil de socavación. 24

Figura 19. Perfil de socavación. 24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación media Total Mensual Multianual 12

Tabla 2. Curvas de masas para Tr 5, 10 y 15 años calculadas para el Hietograma 15

Tabla 3. Uso del suelo y número de curva calculado para la cuenca. 16

Tabla 4. Ordenadas del hidrograma unitario adimensional del SCS 17

Tabla 5. Datos de caudal y altura de la lámina de agua para cada periodo de retorno. 20

Tabla 6. Factor de corrección por contracción del cauce μ. 22

Tabla 7. Datos de entrada obtenidos de HEC – RAS para ingresar a la hoja de cálculo del perfil de socavación. 23

Tabla 8. Título y código consecutivo de los informes entregados a SOLINCON Ltda. 25

Tabla 9. Resumen 26

Tabla 10. Datos de las estaciones hidrometeorológicas en el área de influencia. 26

INTRODUCCIÓN

El actual documento presenta el trabajo de grado realizado en la modalidad pasantía en la empresa SOLINCON. LTDA, en donde se realizaron estudios hidráulicos e hidrológicos para el diseño de pasos subfluviales.

Los estudios se ejecutaron en cuatro fases, una primera de recolección de planos cartográficos e información hidrometeorológica, de la cuenca hidrológica. La segunda fase consistió en la identificación de expresiones matemáticas y modelos estadísticos utilizados por los entes territoriales, según la normatividad vigente para Colombia posteriormente, en la fase 3, se realizó la Integración de los datos, obtenidos en la fase anterior, en los software correspondientes, para generar los modelos hidrológicos e hidráulicos relacionados a los periodos de retorno y el estudio de socavación, la cuarta y última fase consistió en la entrega del informe hidrológico documento donde se describen los cálculos, parámetros, normas, materiales y herramientas utilizados en los estudios hidráulicos e hidrológicos

El trabajo se desarrolló en la empresa SOLINCON LTDA, Soluciones Integrales de Ingeniería y Consultoría, dedicada a la coordinación de diferentes proyectos a nivel nacional en las áreas de topografía, hidrología, suelos, ambiental, estructuras, presupuesto, la empresa integra en su equipo de trabajo un pasante de Ingeniería Sanitaria responsable de los estudios hidrológicos e hidráulicos de los proyectos de perforación horizontal dirigida con tecnología sin zanja o también llamado paso subfluvial.

1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Apoyar los estudios hidráulicos e hidrológicos para el diseño de pasos subfluviales, consolidando los conocimientos adquiridos en el desarrollo del pensum curricular, mediante la participación en los proyectos desarrollados en la empresa SOLINCON LTDA

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar la información hidrometeorológica e hidráulica obtenida en el correspondiente estudio para el dimensionamiento de pasos subfluviales.

2. Elaborar modelos hidrológicos e hidráulicos en HEC-HMS y HEC-RAS teniendo en cuenta los aspectos técnicos y normativos relacionados con el diseño y metodologías utilizadas en los estudios.

3. Generar un informe técnico que contenga todos los resultados de los estudios hidráulicos e hidrológicos con las especificaciones necesarias de los proyectos desarrollados en la empresa SOLINCON LTDA

2. MARCO TEÓRICO

La norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida de Empresas Públicas de Medellín define esta tecnología como la técnica a utilizar en la instalación de tuberías subterráneas con un mínimo de excavación y alteración superficial, la perforación horizontal dirigida es una técnica para realizar una nueva instalación de tubería donde no existe este método, es rápido, limpio y ecológico. El sistema permite el cruce de grandes ríos, carreteras, autopistas, montañas y cualquier obstáculo natural, puesto que, al utilizar lodos de perforación, se logra perforar bajo nivel freático de forma rápida y eficaz. Se debe tener especial cuidado para no interferir con las redes de otros servicios como energía, gas, acueducto y alcantarillado existentes (EPM, 2017).

La técnica de perforación horizontal dirigida (PDH) consiste en la instalación de tuberías, cables y otros servicios subterráneos sin la necesidad de realizar excavaciones a cielo abierto. SOLINCON LTDA, en el desarrollo de sus proyectos de consultoría para las obras de pasos subfluviales, realiza estudios hidrológicos e hidráulicos para utilizar la técnica PHD y pasar un cruce sin zanja o trenchless en inglés, el cual consiste en una perforación horizontal dirigida, con un punto de entrada y salida a nivel de terreno, esta perforación suele tener diámetro de 24" y encamisado en tubería de polietileno (SOLINCON, 2023).

De acuerdo con la American Society of Civil Engineering (ASCE – Manual 43)., la socavación es "la acción erosiva del agua de una corriente, que excava y transporta el suelo del lecho y de las márgenes. La socavación tiene lugar tanto en suelos sueltos como en roca sólida"

Es de gran importancia establecer la estabilidad y permanencia de la sección transversal del cauce cuando es sometida a los procesos erosivos generados por la corriente que transporta agua y sedimentos por debajo y alrededor de las pilas o de los estribos, cuando se trata de determinar las condiciones críticas para el diseño de la cimentación de una estructura de paso, como es este caso, la de un paso subfluvial. La evaluación de resistencia del material del lecho de fundación es fundamental para fijar la cota mínima a la que se debe implantar la cimentación, de la misma forma, la estructura debe estar en la capacidad de resistir las fuerzas de arrastre generadas durante los eventos extraordinarios que se puedan presentar (RAS, 2000).

Con el fin de efectuar el estudio de socavación es necesario realizar un modelo hidrológico de la cuenca que escurre sus aguas hasta el sitio del ponteadero y de esta manera tratar de estimar los caudales extraordinarios que podrían ocurrir en algún momento de su vida útil (IDEAM, s.f). Asimismo, se hace necesario realizar un estudio hidráulico de la sección del cauce para determinar las características hidráulicas del sitio del ponteadero bajo eventos normales y extraordinarios.

El manejo de la información disponible se apoya en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) la cual funciona como una base de datos para la información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital y de esta forma conocer sus atributos y su localización en la cartografía (SIG, 2006). La principal razón para el uso de las SIG, en los estudios, se debe a la gestión de información espacial, es decir, información georreferenciada a un mismo origen y la cual permite disgregar la información disponible de los entes del gobierno en diferentes capas temáticas, almacenarlas de manera independiente y facilitar la toma de decisiones a través de la relación de información existente por medio de la topología de sus objetos, así como la generación de modelos a partir de simulaciones (SOLINCON, 2023).

Según el sitio web de la plataforma ArcGIS, software producido y comercializado por la empresa ESRI (Enviromental Systems Research Institute), este sistema es líder mundial en creación y uso de SIG, en este se recopila, organiza, administra, analiza, y comparte información geográfica.

Con base en lo anterior, se recopila la información de cartografía base, para obtener la división política y/o hidrológica del municipio, para determinar la cuenca hidrográfica o área de influencia "limitada topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple, localizada en el punto más bajo de la misma"

(INVIAS, 2009). de igual manera se extraen la estaciones hidrometeorológicas las cuales están a cargo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM quienes "en el marco de sus funciones y concretamente conforme a lo establecido en el artículo 1.2.1.1 del decreto 1076 del 2015 tiene a su cargo la toma, recolección, proceso y análisis del dato ambiental, como también la generación de información científica y tecnológica a nivel nacional" (IDEAM, 2015).

En ArcGIS se realizan los polígonos de Thiessen, estos se basan en la localización geográfica de cada estación meteorológica sobre el área de estudio, uniendo las estaciones más cercanas con líneas, de tres en tres, dando como resultado una red de triángulos irregulares, se generan las mediatrices perpendiculares en cada lado de los triángulos generados, formando los polígonos de Thiessen (ESRI, 2017).

De esta manera, en la zona de estudio se obtienen datos de precipitación definida como "la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo. La cantidad de precipitación es el volumen de agua lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado (IDEAM, 2018).

La precipitación es utilizada como dato base para el estudio hidrológico que tiene como objetivo definir la zona de inundación, la cual ocurre cuando las aguas de los ríos, quebradas y cauces salen del lecho de escurrimiento, fenómeno que se presenta cuando se supera la capacidad habitual que tiene un afluente de transportar las aguas de un sistema a otro, lo cual produce la ocupación del espacio considerado zona de inundación (Tucci, 2007).

Para ello se definen la precipitación media y total de la cuenca mediante métodos estadísticos que abordan cuantitativamente la aleatoriedad y reducen la incertidumbre de los registros de precipitaciones climatológicas históricas, proporcionando información sobre la precipitación del mañana. (Wiks, 2006)

El tiempo que toma el agua, desde el inicio de la precipitación, en trasladarse desde los límites más extremos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma se denomina tiempo de concentración, la cantidad de agua que cae desde el inicio hasta el final de un aguacero y sus valores acumulados son utilizados para generar un hietograma o diagrama de barras donde se relaciona la lluvia (mm) y el tiempo (horas) (INVIAS, 2009).

Diferentes lluvias en una misma cuenca provocarán diferentes escorrentías. Se considera aquella lluvia que genere mayor escorrentía, se utiliza el tiempo de concentración (tc) como punto de entrada en las curvas IDF (Ibáñez, Moreno, & Gisbert, s.f).

La caída de lluvia se mide con un pluviómetro y su intensidad es representada en una curva IDF, la cual, siguiendo la definición emitida por el IDEAM, representa la intensidad (I) o magnitud de una lluvia fuerte expresada en milímetros por hora, para una duración (D) y, que se estima, tiene una probabilidad de ocurrencia o frecuencia (F) expresada en años, lo que también se conoce como periodo de retorno.

Conocida la cantidad de lluvia precipitada, la escorrentía generada se obtiene mediante el método del Número de curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU- SCS por sus siglas en inglés, este toma en cuenta la cobertura del suelo en la zona de estudio del CORINE Land Cover, este define la metodología específica y contiene el inventario de la cobertura de la tierra (Suárez, Cély, & Forero, 2016)., y el valor de CN según la cobertura y el grupo hidrológico del suelo tomado de las tablas del SCS.

Hidrograma unitario es una representación gráfica de la lluvia neta o efectiva distribuida en espacio y tiempo, un hidrograma unitario sintético sigue una metodología establecida, sin necesidad del análisis de datos de precipitación-escorrentía, los cuales se calculan con base en características físicas de la cuenca en consideración (INVIAS, 2009).

3. METODOLOGÍA

3.1. Fase preliminar.

Obtención de información hidrometeorológica, hidráulica y planos cartográficos suministrados por el cliente, entidad territorial o por el dibujante de SOLINCON LTDA.

3.1.1. Recolección de información y descripción general del municipio y área de estudio.

Se realiza la descripción general del municipio objeto de estudio de la consultora, inicialmente una localización general en el país nombrando el departamento, longitud, latitud, altura sobre el nivel del mar – msnm, municipio y área de este.

Información adicional es entregada por el área de topografía, geología y gerencia de la empresa SOLINCON, dado que es un estudio interdisciplinar. De las áreas mencionadas anteriormente se obtienen datos:

- Del estudio Topográfico se extrae, la delimitación y localización topográfica del proyecto con coordenadas y elevación (curvas de nivel del área donde se realizará el paso subfluvial), asimismo se identifica el cuerpo de agua principal, para la delimitación de la cuenca de estudio como se observa en la ***Figura 1***.

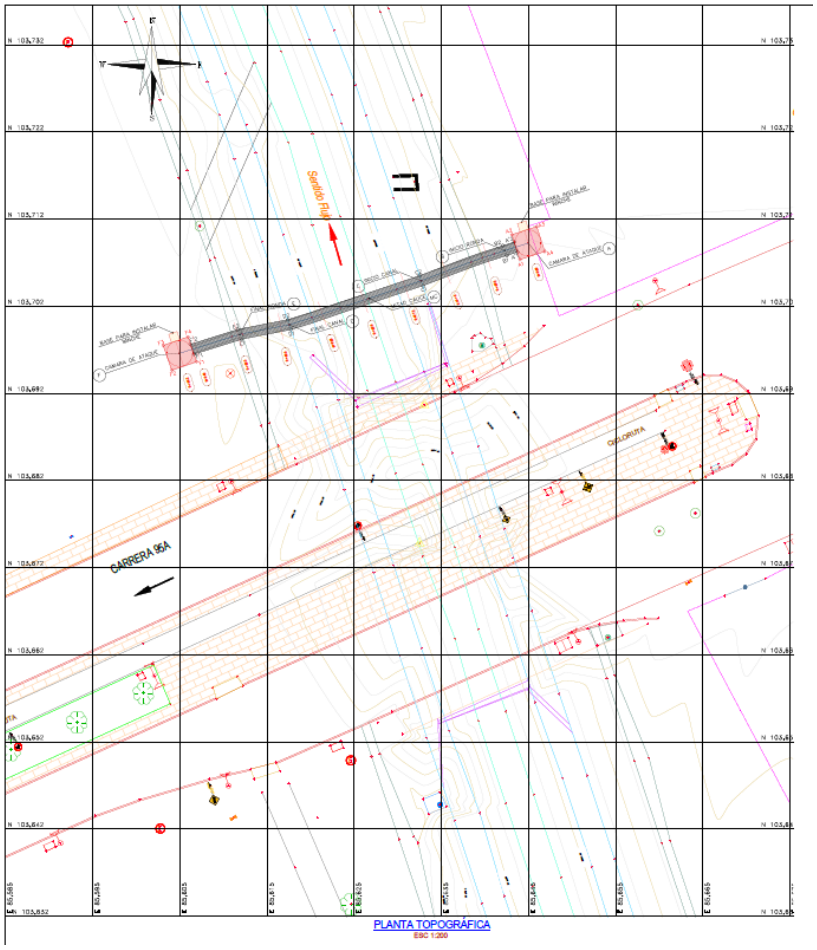


Figura 1. Plano Topográfico con batimetría
Fuente. Estudio Topografía Tintal IV SOLINCON LTDA

- Geología general, se extrae una idea principal del estudio de suelos y geotécnico para dar una visión global de la composición y estructura de la tierra adyacente al paso subfluvial asimismo se extrae el diámetro de la partícula para el análisis de socavación, este procedimiento lo realiza el área encargada en campo como se observa en la **Figura 2**.

Figura 2. Recopilación de datos del suelo en campo
Fuente. Estudio Geotécnico y de suelos Tintal IV SOLINCON LTDA

3.1.2. Descripción hidrológica y morfométrica de la cuenca de estudio

Partiendo de la información obtenida en el punto anterior, se obtiene del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, los datos de las estaciones hidrometeorológicas más cercanas al paso subfluvial y se realiza una breve descripción de la temperatura, humedad relativa, evaporación y precipitación de la cuenca, la Figura 3 muestra el inicio de la página web del IDEAM.

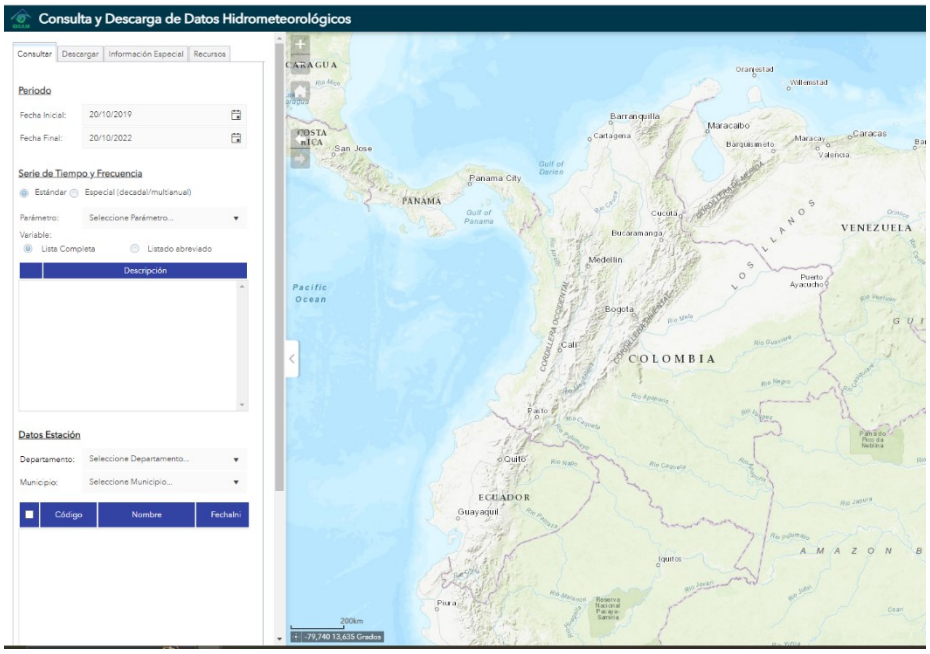


Figura 3. Página Web del IDEAM con información de las estaciones hidrometeorológicas a nivel Nacional.
Fuente. http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano /

Al conocer las características morfométricas de la cuenca se tiene una visión preliminar del comportamiento y variación de los componentes hidrológicos, para esto se delimita la cuenca, en el programa ArcGIS, con base al área de intervención del paso subfluvial y se obtienen los datos de área de drenaje, perímetro, ancho de la cuenca, longitud del cauce principal, nacimiento de cota y la

desembocadura como se observa en la ***Figura 4***, datos que posteriormente se ingresarán a Excel para realizar los correspondientes cálculos de factor de forma - Kf, índice de alargamiento – Ia e índice de compacidad – Kc, Densidad de drenaje – Dd, de igual mangera se realiza una clasificación del río o cauce principal, con lo observado en el programa y los resultados del Excel, en la ***Figura 5*** se presenta un esquema de los cauces, en formación (niñes), juventud, madurez o vejez, también si es semirrecto, meándrico, trenzado o si la cuenca es estrecha, alargada, amplia o ancha.

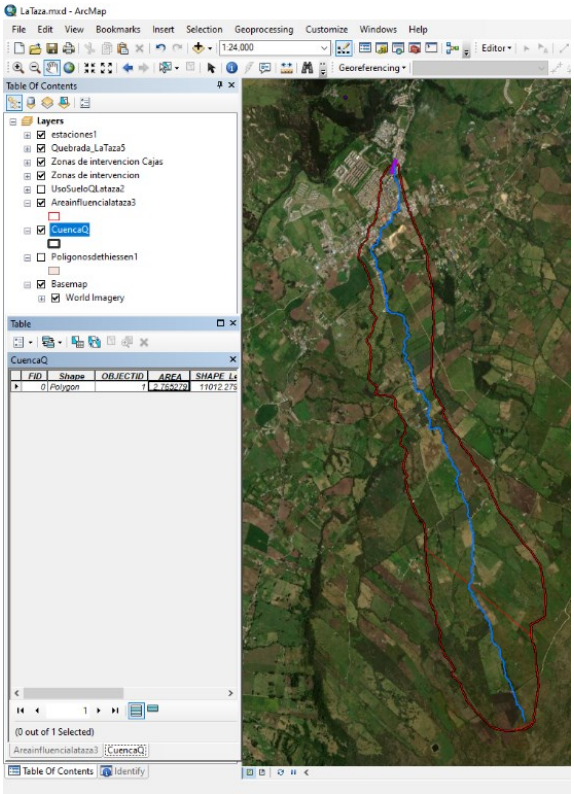


Figura 4. Delimitación de la cuenca de estudio en ArcGIS y obtención de datos morfométricos Fuente. Elaboración propia, estudio hidrológico Quebrada La Taza SOLINCON LTDA

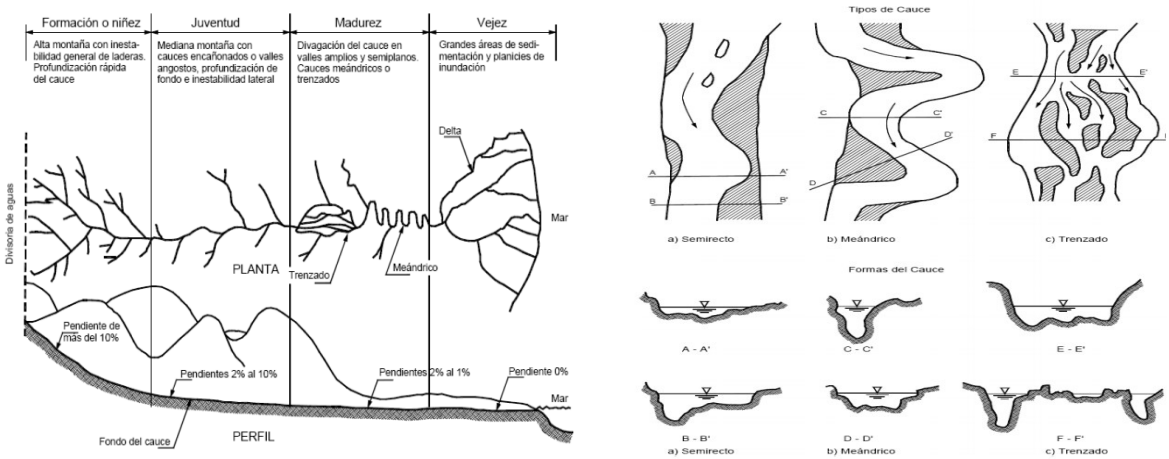


Figura 5. Representación esquemática de las etapas de un río y tipos principales de cauce. Fuente: Suárez, J (2001).

3.2. **Fase de planeación.**

Identificación de expresiones matemáticas y modelos estadísticos utilizados por los entes territoriales, según la normatividad vigente para Colombia

3.2.1. Métodos Hidrológicos

Para el estudio hidrológico se realizaron análisis de frecuencias hidrológicas con base en el "Manual de Drenaje para Carreteras" (INVIAS, 2009)., allí se referencia el uso de herramientas de probabilidad y estadística para estimar la frecuencia de ocurrencia o probabilidad de ocurrencia de eventos extremos pasados o futuros, para esto se requieren datos de precipitación obtenidos de las estaciones del IDEAM en el área de influencia de la cuenca, con este fin se inicia con la media de precipitación para lo cual se utiliza el método de los polígonos de Thiessen partiendo de ellos se continua con el cálculo para la obtención de:

- Precipitación media
- Precipitación Total
- Intensidad de lluvia (Curvas IDF)
- Tiempo de concentración
- Hietograma
- Número de curva.
- Hidrograma Unitario

3.2.1.1. Precipitación media

Se utiliza el método de los polígonos de Thiessen, para ellos se ubican las estaciones en el programa ArcGIS el cual realiza automáticamente la delimitación de los polígonos, trazando las mediatrices y determinando el porcentaje de área aferente a cada estación, e identificándolas con color como se muestra en la ***Figura 6***, obteniéndose así el área de influencia de las estaciones, posteriormente se descartan aquellas estaciones por fuera del área.

El área de influencia de cada estación es multiplicada por la precipitación registrada por la estación, como resultado se tiene la precipitación ponderada en mm*km^2 de cada estación, la suma de estas dividida en el área total de influencia da como resultado la precipitación media de la cuenca, definida como la Ecuación 1.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Pi * Ai}{\sum Ai} \qquad \textbf{\textit{Ec. 1}}$$

Figura 6. Distribución estaciones hidrológicas Polígono de Thiessen
Fuente. Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

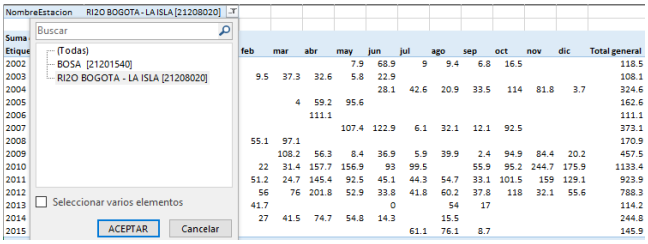
3.2.1.2. Precipitación media Total Mensual Multianual

A partir de los datos descargados del IDEAM se computan en una tabla dinámica como se muestra en **Tabla 1**, que hará automáticamente la suma de las precipitaciones diarias, por mes y año hidrológico,

el paso siguiente es calcular los valores medios para una serie de años teniendo como resultado la Precipitación mensual media y Precipitación media total mensual multianual de esto se obtiene una gráfica como se muestra en la ***Figura** 7*.

Tabla 1. Precipitación media Total Mensual Multianual

A.



Suma Etique	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total general
2002				7.9	68.9	9	9.4	6.8	16.5			118.5
2003	9.5	37.3	32.6	5.8	22.9							108.1
2004					28.1	42.6	20.9	33.5	114	81.8	3.7	324.6
2005		4	59.2	95.6								162.6
2006			111.1									111.1
2007				107.4	122.9	6.1	32.1	12.1	92.5			373.1
2008	55.1	97.1										170.9
2009		108.2	56.3	8.4	36.9	5.9	39.9	2.4	94.9	84.4	20.2	457.5
2010	22	31.4	157.7	156.9	93	99.5		55.9	95.2	244.7	175.9	1133.4
2011	51.2	24.7	145.4	92.5	45.1	44.3	54.7	33.1	101.5	159	129.1	923.9
2012	56	76	201.8	52.9	33.8	41.8	60.2	37.8	118	32.1	55.6	788.3
2013	41.7				0		54	17				114.2
2014	27	41.5	74.7	54.8	14.3		15.5					244.8
2015						61.1	76.1	8.7				145.9

B1.

PRECIPITACIÓN													
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	ΣR	X
13.5	37.5	32.5	104.9	64.7	46.6	38.8	40.3	23.0	50.4	128.4	76.9	709.4	59.1
												0.0	
												0.0	
						Precipitación Promedio mensual (mm/mes)							59.12

B2.

ESTACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA	PORCENTAJE	VALOR PRECIPITACIÓN	TOTAL P
RI2O BOGOTA - LA ISLA	5.46	100.0%	59.12	59.12
0	0.00	0.0%		
0	0.00	0.0%		
ÁREA TOTAL	**5.46**	**100.0%**	**PT**	**59.12**

Nota. A. *Tabla dinámica con los datos de las estaciones en el área de influencia.* ***B1.*** *Tabla Precipitación mensual media (Total de años hidrológicos).* ***B2****. Precipitación ajustada por área de influencia.*

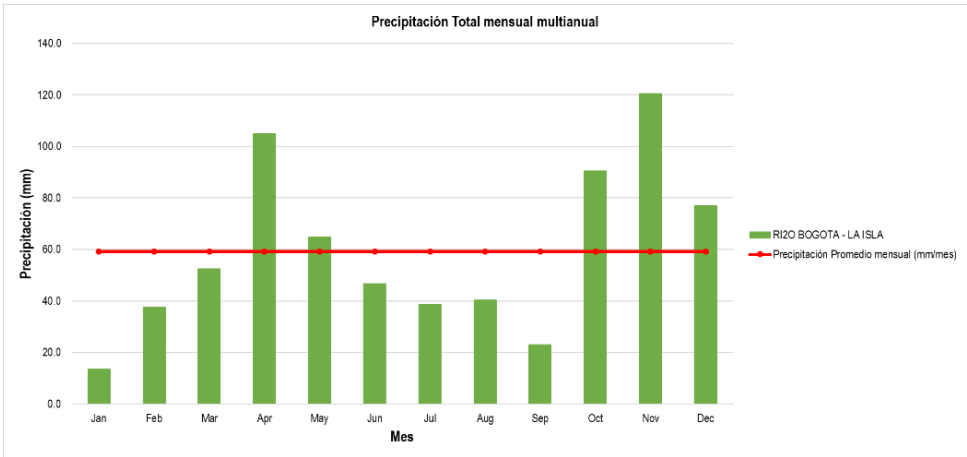


***Figura** 7* Precipitación media total mensual multianual
Fuente. Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

3.2.1.3. Intensidad de lluvia (Curvas IDF)

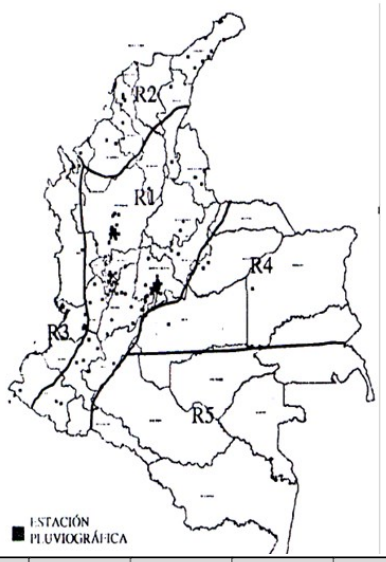
Se realiza la curva de intensidad, duración, frecuencia para diferentes periodos de retorno, con ellos se realiza el hietograma o tormenta de diseño aplicado solo para el área de influencia del paso subfluvial.

Cuando no se dispone de datos suficientes de las estaciones pluviométricas se utiliza el método simplificado o también conocido como método de Vargas y Diaz Granados, la expresión utilizada es la mostrada en la ecuación 2.

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \qquad \textbf{\textit{Ec. 2}}$$

Donde:
I: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).
T: Periodo de retorno, en años
M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual
T: Duración de la lluvia, en minutos (min).
A,b,c,d:Parámetros de ajuste de la regresión. (Regionalizados se muestra en la **Figura 8**)

Para el caso particular de Bogotá se solicitan las curvas IDF a la empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá - EAAB, se envían los ID y coordenadas de las estaciones de interés, en respuesta la EAAB entrega la información con los valores de C1, Xo y C2 para aplicar en la ecuación que se relaciona en la **Figura 9**.



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

Figura 8. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia
Fuente. Vargas & Granados (1998*)*

Fecha: 2023-08-17

acueducto
AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

Ecuación cálculo curvas IDF

$$INTENSIDAD = C_1 (DURACIÓN + X_0)^{C_2}$$

Tabla coeficientes ecuación IDF

Id	Punto (EN) EPSG:3116	Tiempo de retorno 3 años			Tiempo de retorno 5 años			Tiempo de retorno 10 años			Tiempo de retorno 25 años			Tiempo de retorno 50 años			Tiempo de retorno 100 años		
		C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2	C1	Xo	C2
0	1004500,999199	2587,24	26,0	-0,96116	2662,97	24,5	-0,94237	2774,33	22,9	-0,92421	2991,14	21,6	-0,90876	3160,86	20,9	-0,90131	3290,39	20,1	-0,89208
1	1003217,994704	2300,97	29,3	-0,95767	2512,88	28,0	-0,94735	2707,19	26,5	-0,93134	3010,89	28,2	-0,91900	3355,99	28,5	-0,91910	3602,74	27,9	-0,90908
2	1001365,1001481	2142,11	19,1	-0,95476	1968,43	15,0	-0,92015	1956,91	12,0	-0,86750	2025,48	9,6	-0,87948	2046,76	6,1	-0,86363	2148,15	7,2	-0,85696
3	995077,997529	1950,40	21,6	-0,96062	2016,12	19,1	-0,96222	2096,97	16,8	-0,96416	2203,92	14,4	-0,94469	2358,79	13,4	-0,93657	2545,37	12,8	-0,93723
4	1002521,999413	2188,53	20,0	-0,95134	2491,72	21,2	-0,94756	3054,40	23,2	-0,95526	3722,14	25,0	-0,95981	4137,52	25,8	-0,95857	4769,30	27,2	-0,96597
5	992528,1007074	1619,71	12,7	-0,96023	1755,58	11,8	-0,94862	1971,14	11,2	-0,94165	2254,02	10,5	-0,93570	2421,56	10,1	-0,92842	2642,58	9,9	-0,92704
6	1000600,997539	4052,16	30,8	-1,06865	4556,37	31,2	-1,06216	5216,86	31,8	-1,06163	5962,49	32,1	-1,05600	6634,47	32,4	-1,05648	7125,94	32,5	-1,05172
7	998480,1003579	4395,61	31,6	-1,08733	5154,17	31,7	-1,08008	6196,91	32,3	-1,10112	7134,00	31,6	-1,09862	7638,88	31,4	-1,09738	8448,62	31,6	-1,10345
8	1002149,995597	3430,59	33,1	-1,03731	3464,59	31,5	-1,03935	3065,65	27,8	-0,96467	2855,95	24,1	-0,92588	3363,56	25,1	-0,93513	3250,92	23,2	-0,91311
9	984002,1003782	2044,32	20,6	-1,03775	2309,01	19,2	-1,03361	2828,17	19,0	-1,04228	3797,62	19,7	-1,06642	4018,14	18,5	-1,05812	4761,01	19,1	-1,07122
10	998801,1002808	2757,78	23,3	-1,00625	3042,89	22,4	-1,00664	3389,04	21,7	-1,00228	3856,36	21,3	-0,99867	3077,60	20,4	-0,98732	4447,96	20,6	-0,99181

NOTAS:

1) Unidades en la aplicación de la ecuación IDF: Intensidad [mm/h], Duración [min]

2) Sistema de Referencia de Coordenadas: MAGNA-SIRGAS / Zona Bogotá Colombia, EPSG 3116.

Figura 9. Datos de las estaciones EAAB
Fuente.
https://www.acueducto.com.co/wasap02/pqrs-web/index.xhtml

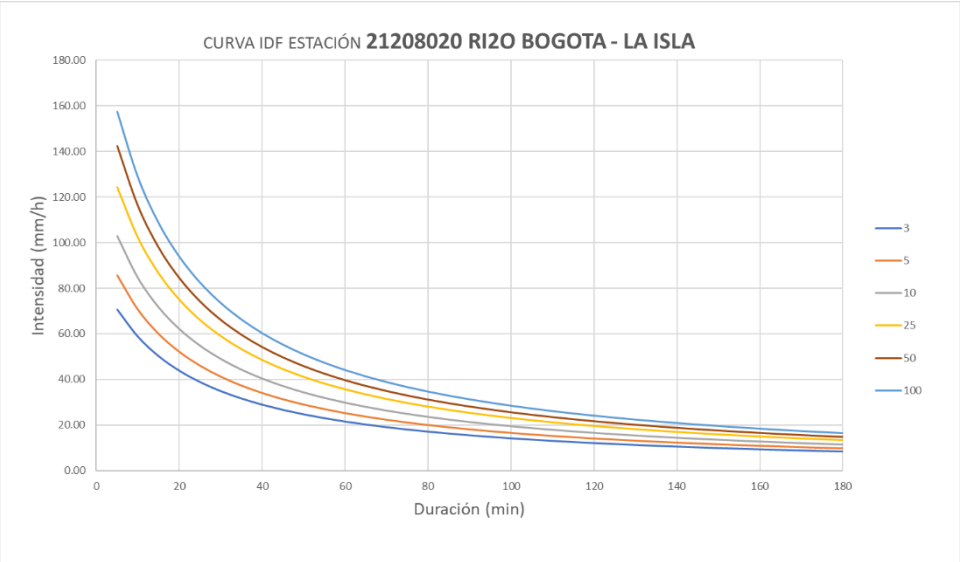


Figura 10. Curva IDF generada a partir de Los datos proporcionados por la EAAB.
Fuente. Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

3.2.1.4. Tiempo de Concentración

Para el tiempo de concentración el Manual de INVIAS menciona una serie de ecuaciones de las cuales de acuerdo con la NS-085 de la EAAB, el tiempo de concentración para Bogotá se calcula utilizando la ecuación de Kirpich (Ecuación 3.), y para las demás ciudades y/o departamentos se calcula con cada una de las expresiones presentadas (Ecuaciones 4,5,6,7) y se realiza un promedio aritmético.

- Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.06628 * \left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.7} \qquad \textbf{\textit{Ec. 3}}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).
L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).
S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m).

- Ecuación de Temez

$$T_c = 0.03 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76} \qquad \textbf{\textit{Ec. 4}}$$

Dónde:
Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).
L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).
S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m).

- Ecuación de Giandotti

$$T_c = \frac{4A^{0.5}+1.50\,L}{25.3(LS)^{0.5}} \qquad \textbf{\textit{Ec. 5}}$$

Donde:
Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).
A: área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km^2)
L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).
S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m).

- Ecuación de SCS-Ranser

$$T_c = 0.947 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \qquad \textbf{\textit{Ec. 6}}$$

Dónde:
Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).
L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).
H: Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente principal, en metros (m)

- Ecuación de Hathaway

$$T_c = \frac{36.36(Ln)^{0.0.46}}{S^{0.234}} \qquad \textbf{\textit{Ec. 7}}$$

Dónde:
Tc: Tiempo de concentración, en horas (min).
L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).
S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m).
n: factor de rugosidad, adimensional (0.1)

3.2.1.5. Hietograma

Para los proyectos se ajusta la precipitación máxima (24H), teniendo en cuenta la distribución de valores extremos tipo I, distribución Gumbel, la cual representa la relación del factor de frecuencia (Ecuación 9) para la distribución de máximos valores extremos tipo I para una muestra de tamaño infinito y se multiplica por el factor de reducción de área (Ecuaciones 10,11,12), posteriormente se realiza la curva de masas adimensionales, con resultados como los mostrados en ***Tabla 2*** la cual "relaciona la precipitación parcial acumulada del aguacero sobre la precipitación total del mismo en las ordenadas contra el tiempo parcial acumulado del aguacero sobre el tiempo total del mismo en las abscisas"(INVIAS, 2009).

- El análisis de frecuencia se realiza con la ecuación 8.

$$X = \bar{X} + K_T S \qquad \textbf{\textit{Ec. 8}}$$

Donde:
X: Precipitación ajustada
X-: Media de la precipitación máxima (24 H)
Kt: Factor de frecuencia
S: Desviación estándar de la precipitación máxima (24 H)

- Factor de frecuencia – Kt

$$K_T = -0.7797\left[0.5772 + ln\left[\frac{lnT_x(X)}{T_x(X)-1}\right]\right] \qquad \textbf{\textit{Ec. 9}}$$

Donde:
Tx (x): es el periodo de retorno

Para el factor de reducción se utilizan 3 ecuaciones

- Ecuación de Fhrüling

$$f(a) = 1.0 - 0.0054\ x\ A^{0.25} \qquad \textbf{\textit{Ec. 10}}$$

A: Área de drenaje de la cuenca, en metros cuadrados (m2).

- Institute of engineers:

$$f(a) = 1 - 0.00268 * t_c^{-0.261} A^{0.387} \qquad \textbf{\textit{Ec. 11}}$$

Donde:
A: Área de drenaje de la hoya (km^2)

tc : Tiempo de concentración hoya (h)

- Ecuación de datos de Norteamérica

$$f(a) = 1 - 0.05 * t_c^{-0.361} * A^{0.264} \qquad \textbf{\textit{Ec. 12}}$$

Donde:
A: Área de drenaje de la hoya (km^2)
tc : Tiempo de concentración hoya (h)

Tabla 2. Curvas de masas para Tr 5, 10 y 15 años calculadas para el Hietograma
Fuente. Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

Tr= 5 años					Tr= 10 años					Tr= 15 años				
Orden	T	Precipitación acumulada (%)	P acumulada (mm)	P (mm)	Orden	T	Precipitación acumulada (%)	P acumulada (mm)	P (mm)	Orden	T	Precipitación acumulada (%)	P acumulada (mm)	P (mm)
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0.00	0
1	10	2.40	0.80	0.80	1	10	2.40	0.95	0.95	1	10	2.40	1.03	1.03
2	20	5.10	1.71	0.91	2	20	5.10	2.01	1.06	2	20	5.10	2.19	1.16
3	30	8.80	2.95	1.24	3	30	8.80	3.47	1.46	3	30	8.80	3.79	1.59
4	40	15.10	5.06	2.11	4	40	15.10	5.95	2.48	4	40	15.10	6.50	2.71
5	50	23.80	7.98	2.92	5	50	23.80	9.38	3.43	5	50	23.80	10.24	3.74
6	60	34.20	11.47	3.49	6	60	34.20	13.48	4.10	6	60	34.20	14.72	4.48
7	70	47.00	15.76	4.29	7	70	47.00	18.52	5.04	7	70	47.00	20.23	5.51
8	80	59.60	19.98	4.22	8	80	59.60	23.49	4.97	8	80	59.60	25.65	5.42
9	90	69.40	23.27	3.29	9	90	69.40	27.35	3.86	9	90	69.40	29.87	4.22
10	100	77.90	26.12	2.85	10	100	77.90	30.70	3.35	10	100	77.90	33.53	3.66
11	110	85.40	28.63	2.51	11	110	85.40	33.65	2.96	11	110	85.40	36.76	3.23
12	120	90.40	30.31	1.68	12	120	90.40	35.63	1.97	12	120	90.40	38.91	2.15
13	130	93.60	31.38	1.07	13	130	93.60	36.89	1.26	13	130	93.60	40.28	1.38
14	140	95.1	31.89	0.50	14	140	95.1	37.48	0.59	14	140	95.1	40.93	0.65
15	150	96.5	32.36	0.47	15	150	96.5	38.03	0.55	15	150	96.5	41.53	0.60
16	160	97.8	32.79	0.44	16	160	97.8	38.54	0.51	16	160	97.8	42.09	0.56
17	170	99.2	33.26	0.47	17	170	99.2	39.09	0.55	17	170	99.2	42.69	0.60
18	180	100.00	33.53	0.27	18	180	100.00	39.41	0.32	18	180	100.00	43.04	0.34

3.2.1.6. Número de curva.

Para el número de curva se utiliza la expresión desarrollada por Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU (Ecuación 13). para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad, para Colombia se obtiene el uso de suelo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, el uso del suelo se reduce al

área de influencia de los polígonos de Thiessen, como se aprecia en la **Figura 11** y en **Tabla 3**, para Bogotá los valores de CN fueron adoptados de las tablas que se encuentran la norma técnica NS-085 de la EAAB.

$$CN = \frac{(\sum CN*A)}{\sum A} \qquad \textbf{\textit{Ec. 13}}$$

Donde:
CN : Número de curva
A : Área tributaria de drenaje (ha)

Tabla 3. Uso del suelo y número de curva calculado para la cuenca.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA con base en la información consignada en
https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e:-79.65193536165513,1.9010551031861072,-66.6221502054086,8.614370417520995,4686&b:igac&u:76109&module:catastral#

Uso de suelo y Coberturas	Grupo hidrológico del suelo	Área (km2)	%	Valor de CN	Ponderado
Tejido Urbano pavimentado (Continuo/Discontinuo-0.05 ha o menor)	A	1.75	32.7%	89.00	29.09
Pavimentado con cunetas y alcantarillados	A	0.10	1.9%	98.00	1.85
Zonas comerciales, negocios y/o industriales	A	0.01	0.3%	92.00	0.23
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados (Calles y Carreteras-Pavimentadas con sardineles y drenajes de aguas lluvia)	A	0.17	3.1%	99.00	3.07
Espacios abiertos, prados, parques (Buenas condiciones de cobertura)	A	2.79	52.3%	59.00	30.86
Vegas de ríos	A	0.08	1.5%	30.00	0.44
Zonas cubeirtas de arena o polvo	A	0.44	8.3%	86.00	7.13
Tejido Urbano pavimentado (Continuo/Discontinuo-0.05 ha o menor)	A	1.75	32.7%	89.00	29.09
Área Total		**5.34**	**1.00**	**Valor CN**	**72.68**

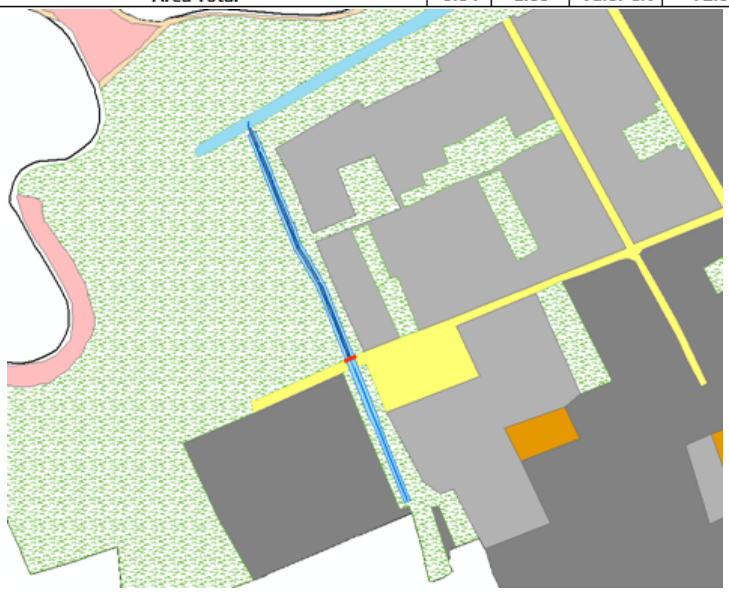


Figura 11. Uso del suelo en al área de influencia
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

3.2.1.7. Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario sintético del SCS es el hidrograma unitario adimensional desarrollado por Víctor Mockus en 1950 este método usa el dato del número de curva para ser aplicado en la ecuación 14 que expresa el tiempo de desfase que está relacionado con el tiempo al pico caudal pico ecuaciones 15 y 16.

$$T_l = \frac{L^{0.8} * (2540 - 22.86 * \mathrm{CN})^{0.70}}{14104 * \mathrm{CN}^{0.7} * \mathrm{S}^{0.5}} \qquad \textit{Ec. 14}$$

Donde:
Ti: tiempo de desfase
CN: Número de curva del SCS. (Rango 50<CN<95)
L: Longitud del cauce principal, en metros (m).
S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

- Tiempo al pico (Tp)

$$\frac{t_p}{t_l} = \frac{10}{9} \qquad \textit{Ec. 15}$$

- Caudal pico.

$$Q_p = \frac{0.208 * A}{t_p} \qquad \textit{Ec. 16}$$

Qp: Caudal pico del hidrograma unitario correspondiente a 1 mm de precipitación efectiva, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).
A: Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en kilómetros cuadrados (km^2).
Tp: Tiempo al pico, en horas (h).

Posteriormente a partir de los valores obtenidos para tp y Qp se multiplican por las ordenadas del hidrograma unitario adimensional, que se muestran en la **Tabla *4***, presentado en la bibliografía.

Tabla 4. Ordenadas del hidrograma unitario adimensional del SCS

t/tp	Q/Q_p
0.0	0.00
0.2	0.10
0.4	0.31
0.6	0.66
0.8	0.93
1.0	1.00
1.2	0.93
1.4	0.78
1.6	0.56
1.8	0.39
2.0	0.28
2.2	0.207
2.4	0.147
2.6	0.107
2.8	0.077
3.0	0.055
3.2	0.040
3.4	0.029
3.6	0.021
3.8	0.015
4.0	0.011
4.2	0.010
4.4	0.007
4.6	0.003
4.8	0.0015
5.0	0.0000

3.3. **Fase de ejecución**.

Integración de los datos, obtenidos, a los software correspondientes, para generar los modelos hidrológicos e hidráulicos relacionados a los periodos de retorno y el estudio de socavación.

3.3.1. HEC-HMS

Para realizar la modelación de los caudales y análisis hidrológico se utilizó el Software HEC-HMS, en el cual se introducen los datos obtenidos de la precipitación efectiva para obtener los caudales según los periodos de retorno.

Para generar el modelamiento se debe crear el modelo de la cuenca donde se ingresa el valor del área, en la **Figura 12** se muestra la pantalla de ingreso de los datos, y se selecciona el método para calcular las pérdidas, en este caso es el método de número de curva y el método del hidrograma unitario de SCS,

en la pestaña *los* se ingresa el número de curva, y en la pestaña *transform* se ingresa el tiempo de concentración multiplicado por 0.6

Se debe realizar el ingreso del hietograma de diseño en la pestaña “table” y se ingresa el tiempo de duración de la tormenta y el intervalo con el que se construyó el hietograma de diseño, se debe crear el modelo meteorológico, en este se selecciona el hietograma a utilizar, según corresponda el periodo de retorno a simular, posterior al ingreso de la información se crea el control para continuar con la corrida en HEC HMS, y se corre el modelo obteniendo el hidrograma unitario como se observa en la **Figura 13**.

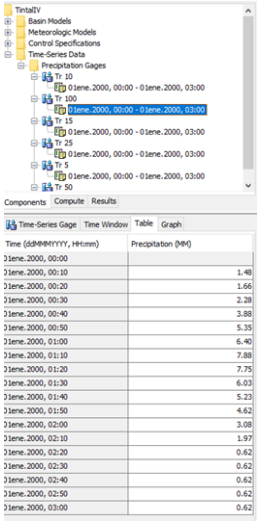


Figura 12. Ingreso de los resultados del hietograma de diseño en HEC HMS.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

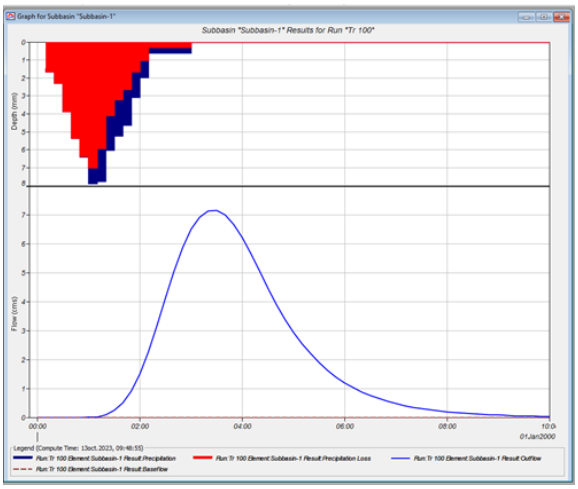


Figura 13. Gráfica generada en HEC HMS del hidrograma unitario SCS.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

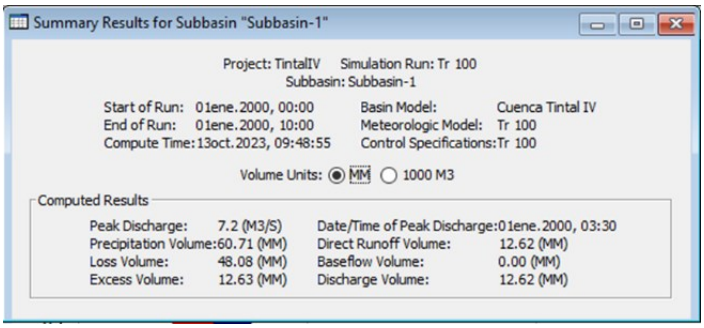


Figura 14. Resumen resultados obtenidos para la modelación de un periodo de retorno de 100 años en el software Hec-HMS.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

3.3.2. HEC-RAS

El programa HEC-RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América, es un sistema integrado de software para análisis hidráulico de redes de canales naturales y artificiales.

Para realizar el modelamiento de la zona por donde se realizará el paso subfluvial, en HEC RAS se utilizó la información recolectada en el levantamiento topográfico para completar un total de 1 km y tomar secciones 500m aguas arriba y 500m aguas abajo, con esta información se generaron perfiles transversales, como los observados en la **Figura 16**, cada 5 metros debido a que en la zona se presentan cambios en la pendiente del cauce y de dirección y se obtiene la **Figura 15**

Se dibuja la línea del río y se da el nombre al tramo. Al seleccionar el icono “Cross Section” aparecerá una ventana con un espacio en blanco para introducir la primera sección transversal, seleccionar Options/Add a new Cross Section.

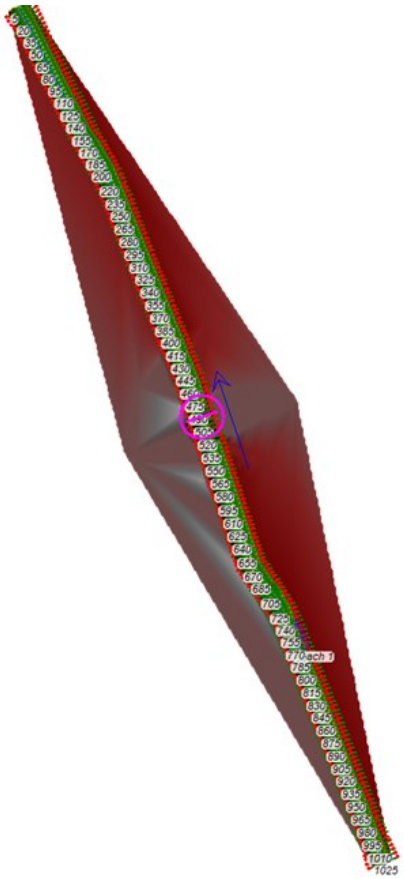


Figura 15. Secciones trasversales sobre HEC RAS.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

Se van ingresando las secciones del río, para poder evidenciarlas, solo basta con dar clic en “Apply Data” y el reflejo de las mismas se observará en la ventana de “Geometric data”.

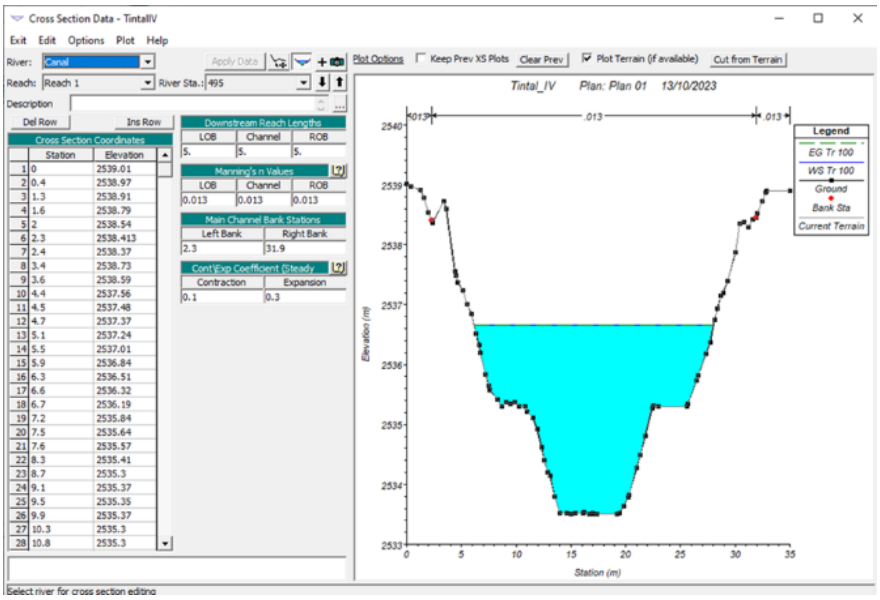


Figura 16. Perfil secciones trasversales.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

3.3.2.1. Ingreso de los datos hidráulicos.

Para efectuar el análisis, el programa permite el ingreso de varios perfiles, que establecen las condiciones de caudal en diferentes periodos de retorno obtenidos en HEC HMS, a las que estará expuesta la zona objetivo. Para ello, se hace el ingreso de las mismas en: "Steady Flow Data" como se muestra en la **Figura 17**; para el proyecto, se han definido 6 perfiles y se han realizado los cálculos correspondientes para los siguientes periodos de retorno:

- 5 años - 10 Años - 15 Años - 25 Años - 50 Años - 100 Años

Por otra parte, es importante definir el coeficiente de rugosidad de Manning que caracteriza el canal.

Una vez definidas, la geometría del canal y el flujo es posible ejecutar el programa para ver los resultados obtenidos, para ello se selecciona "Flow Simulation" y seguido "Compute".

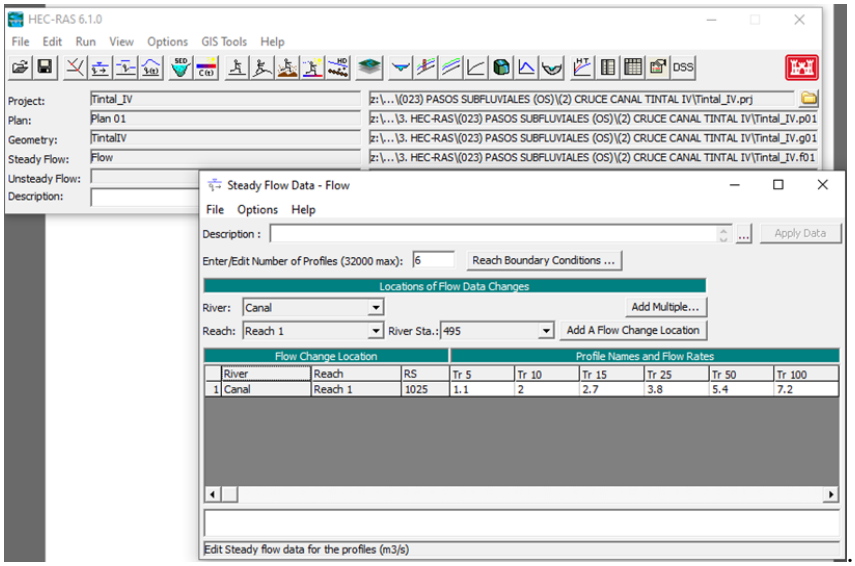


Figura 17. Ingreso de caudales obtenidos en HEC-HMS para cada periodo de retorno a HEC-RAS. Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

Para la sección de control del sitio donde se localizará el paso subfluvial, previamente se define la estación como sección (River Station) en el programa HEC-RAS y que se identifica con base a la batimetría.

Del programa también se obtienen los valores de altura de lámina para la sección del cauce en estudio y se digitan como en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Datos de caudal y altura de la lámina de agua para cada periodo de retorno. Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

Periodo de retorno	Caudal m^3/s	Lámina de agua
5	1,1	2536,01
10	2,0	2536,17
15	2,7	2536,27
25	3,8	2536,39
50	5,4	2536,53
100	7,2	2536,65

3.4. Socavación

Alcance de los estudios

Tal como se ha descrito en los numerales anteriores, el procedimiento clave de los estudios hidrológicos es la determinación de caudales de diseño para la selección de estructuras con base en la capacidad de la corriente existente para diferentes períodos de recurrencia, Tr. Para esto, se recopila y analiza la información sobre lluvias, suelos y topografía.

Definir con base a los caudales calculados y a las características geométricas de la sección transversal del cauce el potencial o la altura de socavación, también llamado perfil de socavación como se observa en las **Figura 18 y 19**, ya sea general o local en condiciones naturales y la producida por los estribos o las pilas (si existen) del puente usando las metodologías propuestas del Manual de Drenaje del INVIAS (Método de Lischtvan – Lebediev, método de Straub y método de Artamanov) y obteniendo unos dimensionamientos previos de la cimentación de la estructura.

3.4.2. Tipos de Socavación

- Socavación general

La socavación general se define como el descenso del fondo de un río cuando se presenta una creciente debido al aumento de la capacidad de arrastre de material sólido de la corriente, a consecuencia del aumento de la velocidad.

Método de Lischtvan – Lebediev

Es el método de mayor aplicación para determinar la socavación general en el lecho de una corriente y también emplear para estimar la socavación por contracción en el caso que se vaya a proyectar un puente, por lo cual el efecto de la contracción no debe adicionarse a los valores de socavación obtenidos. El criterio propuesto por Lischtvan – Lebediev se basa en la obtención de la condición de equilibrio entre la velocidad media real del flujo y la velocidad media máxima necesaria para no erosionar el material del fondo; la profundidad de socavación en cualquier punto de la sección transversal se obtiene al igualar las ecuaciones de la velocidad real y la velocidad erosiva. Dependiendo del material que conforma el lecho del río, que podría corresponder a suelos de tipo granular o cohesivos, para cada caso se propone una ecuación que permite hallar la profundidad de socavación.

- Suelos granulares:

$$Y_S = \left(\frac{\alpha * {Y_0}^{5/3}}{0.68 * \beta * \mu * \emptyset * {d_m}^{0.28}}\right)^{\frac{1}{1+Z}} \qquad \textit{Ec. 17}$$

Donde:

Ys: Profundidad del flujo después de ocurrida la socavación. Se mide desde el nivel del agua cuando pasa la creciente, hasta el nivel del fondo del cauce erosionado, en metros (m).

Yo: Profundidad inicial existente en una línea vertical predeterminada de la sección medida desde el nivel del agua cuando pasa la creciente, hasta el nivel del cauce antes del proceso de socavación, en metros (m).

- Coeficiente de sección (α)

$$\alpha = \frac{Q_d}{Y_m^{5/3} B_e} \qquad \textit{Ec. 18}$$

Donde:

Qd: Caudal de diseño asociado al periodo de retorno, en metros cúbicos por segundo (m3/s).

- Profundidad media (Ym) en metros (m)

$$Y_m = \frac{A}{B_e} \qquad \text{Ec. 19}$$

Donde:
A: Área hidráulica, en metros cuadrados (m2).
Be: Ancho efectivo de la superficie del agua en la sección transversal, en metros (m).

- Coeficiente de frecuencia. (β) Este coeficiente toma en cuenta el periodo de retorno T comprendido entre 15 y 1500 años. Para obtener su valor se propone la ecuación 20.

$$\beta = 0.7929 + 0.0973\, Ln(T) \qquad \textbf{\textit{Ec. 20}}$$

μ: Coeficiente de contracción. Este valor se toma de la ***Tabla 6***, como una función de la velocidad media del flujo y de la distancia libre entre pilas cuando hay un puente.

Tabla 6. Factor de corrección por contracción del cauce μ.
Fuente Manual de drenaje (INVIAS, Bogotá,2009)

$$Z = 0.394557 - 0.0413 \log(d_m) - 0.00891 \log^2 d_m$$

V (m/s)	LONGITUD LIBRE ENTRE DOS PILAS O ESTRIBOS (m)												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
<1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
2.0	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
2.5	0.90	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00
3.0	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.5	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
≥ 4.0	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

- Coeficiente de corrección (φ) por el efecto de la densidad del agua durante la creciente. Para agua clara (clear water) este valor es igual a 1.0. Si la creciente transporta sedimentos en suspensión (lived– bed), este coeficiente se calcula como se muestra en la ecuación 21.

$$\emptyset = -0.54 + 1.5143\, \gamma_{as} \qquad \textbf{\textit{Ec. 21}}$$

Donde:
γas: Peso específico del agua más sedimento, en toneladas por metro cúbico (T/m3).
dm: Diámetro medio de las partículas del material granular, en milímetros (mm).
Z: Exponente variable que depende del diámetro medio de las partículas del material granular.
V: velocidad media en la sección transversal
μ: 1.0 si no hay obstáculos

- **Socavación Transversal**

La socavación o erosión transversal, o erosión en un estrechamiento es el descenso del fondo del cauce de un río en aquellas secciones donde se reduce el ancho, debido a la mayor velocidad de la corriente en esa zona cuando se construyen obras dentro del cauce de un río como por ejemplo accesos a puentes.

- Método de Straub

En este método, se supone que para la sección de estudio (sección reducida) y una sección de aguas arriba (inalterada) se cumple el principio de la conservación de la masa. Igualmente se supone que la

rugosidad a lo largo del tramo es la misma y que el arrastre del fondo es igual cuando la sección reducida se estabiliza, se expresa como se muestra en la ecuación 22.

$$Ht = Ho * \left(\frac{Bo}{Bt}\right)^{0.642} \qquad \textbf{\textit{Ec. 22}}$$

Dónde:
Ht: Profundidad de la lámina de agua en la sección reducida (m).
Ho: Profundidad de la lámina de agua en la sección aguas arriba inalterada (m).
Bt y Bo: Ancho de la superficie libre en las mismas secciones (m).

Se ingresan los datos iniciales a un libro de Excel, visto como la **Tabla 7,** que ya está diseñada para realizar los cálculos antes mencionados.

Tabla 7. Datos de entrada obtenidos de HEC – RAS para ingresar a la hoja de cálculo del perfil de socavación.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

1.DATOS DE ENTRADA HIDRAULICOS		
Tr (años)	100	Tr- Periodo de Retorno
Caudal (m^3/s)	7,2	Qd - Caudal de Diseño al Tr
Bt (m)	21,87	Ancho de superficie libre en la Sección del Cruce
Bo (m)	21,86	Ancho de la Sección aguas arriba del Cruce
A (m^2)	41,99	Areá del Flujo
Hm (m)	1,92	Profundidad media del Flujo
2.DATOS DE ENTRADA DE GEOTECNIA		
γ mezcla (Ton/m^3)	1,5	Peso Especifico de la Mezcla agua-materiales en suspensión.
dm (mm)	0,75	Diámetro medio de las particulas del material granular del lecho (Columna M)

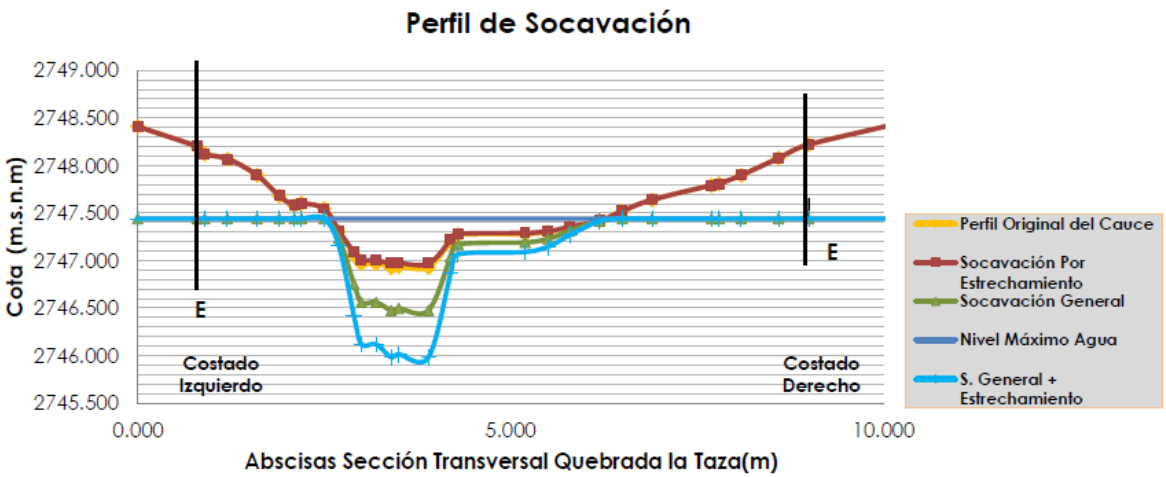


Figura 18. Perfil de socavación.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Quebrada la taza SOLINCON LTDA

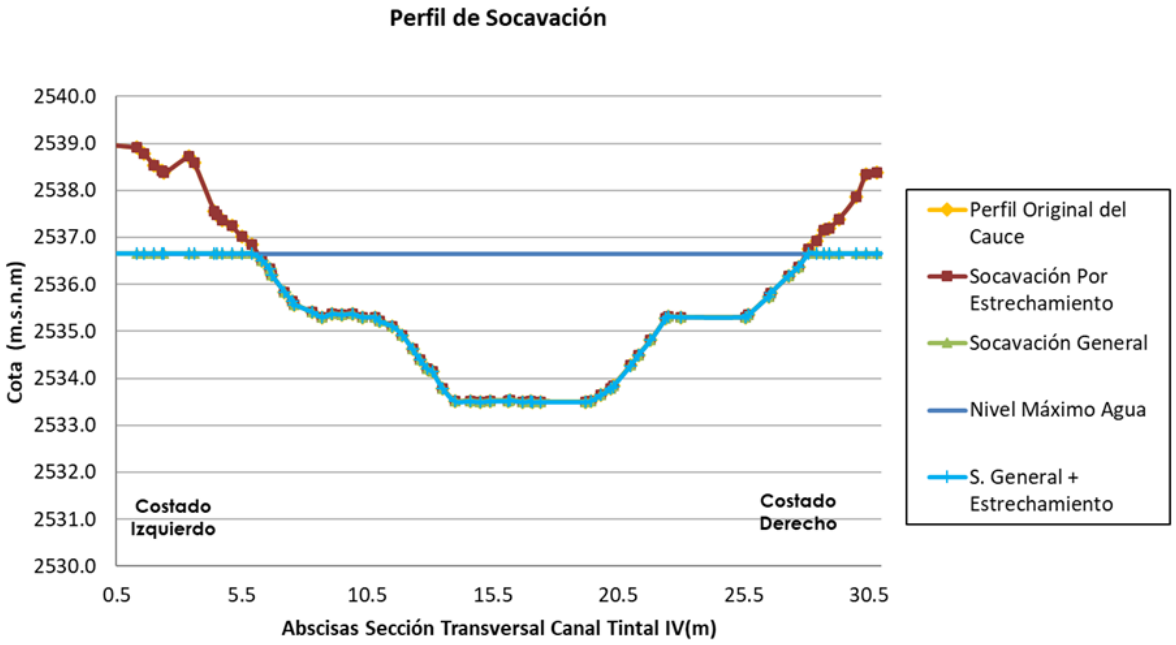


Figura 19. Perfil de socavación.
Fuente Elaboración propia, estudio hidrológico Tintal IV SOLINCON LTDA

4. RESULTADOS ALCANZADOS

Como resultados o productos de la pasantía se entregaron a la empresa SOLINCON Ltda., los informes hidrológicos y perfiles de socavación de los proyectos, mencionados en la **Tabla 8** y adjudicados a la empresa.

Tabla 8. Título y código consecutivo de los informes entregados a SOLINCON Ltda.

Proyecto	**ID**
Trenchless Quebrada La Taza	P-017-HID-2023
Canal San Francisco	P-019-HID-2023
Canal Santa Isabel	P-023-HID-2023
Tintal III	P-023-HID-2023
Tintal IV	P-023-HID-2023
Canal Cundinamarca	P-023-HID-2023

5. CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS EN EL DESARROLLO DE LA PASANTÍA

Durante la pasantía en SOLINCON Ltda. el rol consistió en recopilar, analizar y procesar datos hidrometeorológicos e hidráulicos esenciales para el dimensionamiento de pasos subfluviales. Este proceso implicó la utilización de herramientas avanzadas como HEC-HMS y HEC-RAS, permitiendo modelar con precisión el comportamiento de los flujos de agua y evaluar los riesgos de socavación en canales y ríos, permitiendo poner en práctica los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y reforzar otros como lo son los sistemas de información geográfica – SIG y los software de modelación. Así mismo la entrega de un informe técnico donde se recopilan todos los resultados de los estudios, permite afianzar el análisis de los estudios y presentar hallazgos críticos y recomendaciones clave.

En síntesis, se tiene la oportunidad de adquirir experiencia en el campo de los estudios hidráulicos e hidrológicos, trabajando en proyectos específicos de pasos subfluviales mediante la perforación horizontal dirigida, estudios que, a lo largo de este periodo, permitieron la exploración en el campo de la ingeniería sanitaria enfocada en la hidrología e hidráulica y desarrollar una comprensión profunda de las complejidades involucradas en estos estudios.

6. APORTES A LOS PROCESOS

Se entrega un libro Excel de fácil manejo, donde solo se deben ingresar datos de iniciales y este calcula automáticamente los parámetros hidrológicos requeridos, el libro con tiene en sus hojas el cálculo para:

- Tiempo de concentración
- Precipitación total multianual (PP_TOTAL)
- Precipitación media multianual (PP_MEDIA)
- Precipitación máxima en (24 Horas PP_MAX 24H)
- Días de lluvia (N°DÍAS_LLUVIA)
- Número de curva (CN)
- Distribución de Gumbel (Precipitación Máx. Gumbel)
- Curva de Intensidad duración frecuencia para Bogotá (IDF-EAAB)
- Hietograma para Bogotá (FRA_Hietograma_EAAB)
- Curva de Intensidad duración frecuencia para Colombia (IDF-C)
- Hietograma para Colombia (FRA_Hietograma_C)
- Hidrograma Unitario SCS
- Coeficiente de rugosidad de Manning (n_Manning)

Cuenta con dos hojas de información una de entrada o preliminar, donde se encuentra la **Tabla 9**, y se ingresan valores en los parámetros de color azul, en la ***Tabla 10*** los datos de las estaciones, los demás datos son formulados.

Tabla 9. Resumen

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA			
DESCRIPCIÓN	**Símbolo**	**Und**	**Valor**
Área	**A**	**km^2**	
Número de curva	**CN**	**ad**	
Tiempo de concentración	**Tc**	**h**	
Tiempo Lag	**Tlag**	**min**	
Cota alta	**-**	**msnm**	
Cota Baja	**-**	**msnm**	
Pendiente	**S**	**m/m**	
Longitud del cauce	**L**	**km**	
Tiempo al pico	**Tp**	**h**	
Caudal al Pico	**Q**	**m^3/s**	
Perímetro	**P**	**km**	
Ancho	**B**	**km**	
Factor de forma	**Kf**	**ad**	
Índice de alargamiento	**Ia**	**ad**	
Índice de compacidad	**Kc**	**ad**	

Tabla 10. Datos de las estaciones hidrometeorológicas en el área de influencia.

ID	CODIGO	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	ÁREA DE INFLUENCIA (km^2)	PERIMETRO DE INFLUENCIA (km)
0							
1							
2							

7. CONCLUSIONES

- Con base en el análisis de la información hidrometeorológica e hidráulica recopilada, se logró determinar los niveles de riesgos, zonas críticas de inundación y socavación en los canales de estudio, logrando obtener un dimensionamiento preciso de los pasos subfluviales y según la Resolución 799 de 2021 en el Artículo 42. Sección 8 entregar el dato de la cota de profundidad mínima para este.

- La elaboración de modelos hidráulicos e hidrológicos en HEC-HMS y HEC-RAS ha resultado en un enfoque técnico sólido, estos modelos proporcionan una representación precisa de los flujos de agua y los procesos hidrológicos en la zona de estudio, lo que es esencial para la toma de decisiones en el diseño de infraestructuras como los pasos subfluviales. El cumplimiento de las metodologías y normativas garantiza la calidad y la eficiencia de los estudios realizados.

- La elaboración del informe técnico que contiene todos los resultados de los estudios hidráulicos e hidrológicos, con las especificaciones y presentación de datos de manera clara y concisa permite a las partes interesadas comprender la complejidad de los proyectos desarrollados en la empresa SOLINCON LTDA, también representa una herramienta en la planificación y documentación de las actividades. Este informe proporciona una visión integral de los estudios realizados, los resultados obtenidos y las recomendaciones clave para la toma de decisiones.

BIBLIOGRAFÍA

American Society of Civil Engineers-ASCE . (2005). *Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities.* Obtenido en: . https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784407622 .

Empresas Públicas de Medellín-EPM. (2007). *Norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida.* Obtenido en: https://cu.epm.com.co/Portals/proveedores_y_contratistas/proveedores-y-contratistas/normas-tecnicas/documentos/NC_AS_IL01_36_Instalacion_de_tuberia_de_acueducto_sin_zanja_por_el_metodo_de_perforacion_horizontal_dirigida.pdf.

Environmental Systems Research Institute-ESRI. (2017). Obtenido en: https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/analysis/create-thiessen-polygons.htm.

ESRI . (s.f). *ArcGis, resources* . ¿Qué es ArcGIS? Obtenido en : https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm .

Ibáñez, A., Moreno, R., & Gisbert, B. (s.f). *Valores del nº de curva.* Obtenido en: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10783/Valores%20del%20n%C2%BA%20de%20curva.pdf.

IDEAM. (2018). *Metodología de la operación estadística variables meteorológicas.* Obtenido en: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744#:~:text:Precipitaci%C3%B3n%3A%20La%20precipitaci%C3%B3n%20es%20la,determinado%20(IDEAM%2C%202005).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (s.f). *Modelación hidrológica.* Obtenido en: http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica .

Instituto nacional de vias- INVIAS . (2009). *Manual de drenaje para carreteras.* Ministerio de transporte. Obtenido en: https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file.

MinEducación . (s.f). *Sistema de información geográfica del sector educativo-SI-GEO* . ¿Qué es un SIG?. Obtenido en: https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html .

Ministro de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). *Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible 1076.* Obtenido en: . https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i:78153.

RAS. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento basico - ras 2000 seccion II título G.* Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Obtenido en: https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras.

SOLINCON LTDA (2023). Estudio geotécnico, Paso subfluvial canal tintal IV localizado en el cruce con carrera 95a, sector san Bernardino, de la ciudad de Bogotá d. C., departamento de Cundinamarca.

SOLINCON LTDA (2023). Estudio de hidrología, hidráulica y socavación, Paso subfluvial canal tintal IV localizado en el cruce con carrera 95a, sector san Bernardino, de la ciudad de Bogotá d. C., departamento de Cundinamarca.

SIG. (2006). *Los Sistemas de Información Geográfica.* Geoenseñanza, 11(1),107-116. ISSN: 1316-6077. Obtenido en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id:36012424010.

Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander

Suárez, P., Cély, R., & Forero U. (2016). *Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia.* Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: 17(1).

Tucci, C. (2007). *Gestión de Inundaciones Urbanas.* Obtenido en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pd.

Wilks, D. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences.* . Nueva York: Elsevier.