



ESTUDIO DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN MURO LA RIVERITA.

ESTUDIO TECNICO

ING. RAFAEL CLEMENT OLIVEROS

SANTIAGO DE CALI, JUNIO DEL 2024



asesorias en
gestión ambiental
Clement sas

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	9
2	LOCALIZACIÓN	9
3	LOCALIZACIÓN ESPECIFICA	10
4	ESTUDIO CLIMATOLÓGICO	11
4.1	PRECIPITACIÓN TOTAL.....	13
4.2	DÍAS DE LLUVIA	15
4.3	TEMPERATURA.....	16
5	ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	17
5.1	METODOLOGÍA	17
5.1.1	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS.....	18
5.1.2	ANÁLISIS DE FRECUENCIAS	19
5.1.3	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	23
5.1.4	HIETOGRAMAS DE DISEÑO	25
5.1.5	HIDROGRAMAS DE CRECIENTE	26
5.2	CÁLCULOS Y RESULTADOS HIDROLÓGICOS.....	27
5.2.1	PARÁMETROS FISIográficos Y ANÁLISIS MORFOLÓGICO	27
5.2.2	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	31
5.2.3	COBERTURA Y USO DEL SUELO	33
5.2.4	ANÁLISIS DE FRECUENCIAS	34
5.2.5	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PRECIPITACIONES.....	36
5.2.6	HIETOGRAMAS DE DISEÑO	38
5.2.7	HIDROGRAMAS DE CRECIENTES HEC-HMS	42
5.3	CONCLUSIONES	45

6	ESTUDIO HIDRÁULICO	47
6.1	INTRODUCCIÓN	47
6.2	OBJETIVOS	47
6.3	METODOLOGÍA	47
6.3.1	GEOMETRÍA DEL MODELO (CONDICIÓN EXISTENTE).....	48
6.3.2	FLUJO Y CONDICIONES DE FRONTERA O CONTORNO.....	48
6.3.3	RUGOSIDAD DE MANNING.....	49
6.3.4	ESCENARIOS DE MODELACIÓN	52
6.4	MODELACIÓN HEC-RAS CONDICIÓN EXISTENTE (1D)	52
6.4.1	GEOMETRÍA DEL MODELO.....	52
6.4.2	RESULTADOS MODELACIÓN CONDICIÓN EXISTENTE (Tr030).....	53
6.5	MODELACIÓN HEC-RAS CONDICIÓN PROYECTO (1D).....	60
6.5.1	GEOMETRÍA DEL MODELO (CONDICIÓN PROYECTO).....	60
6.5.2	RESULTADOS MODELACIÓN CONDICIÓN PROYECTO (Tr030).....	63
6.6	CONCLUSIONES.....	69
7	ESTUDIO DE SOCAVACIÓN	71
7.1	INTRODUCCIÓN	71
7.2	GRANULOMETRÍA.....	71
7.3	METODOLOGÍA	73
7.3.1	VELOCIDADES CRÍTICAS	73
7.3.1.1	Método de Froehlich	73
7.3.1.2	Método de Colby (1964)	74
7.3.2	SOCAVACIÓN GENERAL	74
7.3.2.1	Farias-Pilán.....	75
7.3.2.2	Lischtvan & Lebediev	75
7.3.3	SOCAVACIÓN POR CURVA	75
7.3.4	SOCAVACIÓN LOCAL EN ESTRIBOS	76
7.3.4.1	Laursen.....	77
7.3.4.2	Liu et al.....	78

7.3.5	RESULTADOS	78
7.3.5.1	Cálculo de socavación general	80
7.3.5.2	Cálculo de socavación por curva	81
7.3.5.3	Cálculo socavación local por estribos	82
7.3.5.4	Resultado total de socavación	83
8	<u>ANÁLISIS HIDRÁULICO CON OBRA DE PROTECCIÓN IMPLANTADA</u>	<u>84</u>
8.1	MODELO HIDRÁULICO CON OBRA IMPLANTADA	84
8.2	ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA OBRA DE PROTECCIÓN	85
8.3	DEFINICIÓN DE LA LONGITUD DE PROTECCIÓN	86
9	<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>87</u>
10	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>89</u>

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1.	Mapa de localización general del proyecto	10
Figura 3.1.	Mapa de localización general del proyecto	11
Figura 4.1.	Mapa de localización de estaciones en la zona de estudio	13
Figura 4.2.	Precipitación total mensual promedio.	14
Figura 4.3.	Días de lluvia promedio.	15
Figura 4.4.	Temperaturas registradas de la estación Universidad del Valle	16
Figura 5.1	Distribución temporal de lluvias promedia para el Valle del Cauca.....	26
Figura 5.2	Modelo de elevación digital de las cuencas.....	28
Figura 5.3	Modelo digital de pendientes.....	29
Figura 5.4	Tiempo de concentración para cuenca de quebrada	32
Figura 5.5	Tiempo de concentración para cuenca río Lili	32
Figura 5.6	Cobertura de las cuencas río Lili y quebrada	33

Figura 5.7. Diagrama de cajas y bigotes de precipitación máxima diaria de estaciones de interés	35
Figura 5.8. Mapa de polígonos de Thiessen	37
Figura 5.9. Hietograma de diseño cuenca de quebrada	39
Figura 5.10. Hietograma de diseño cuenca del río Lili	41
Figura 5.11. Esquema para modelación de crecientes máximas en HEC-HMS Cuencas Río Lili y quebrada	43
Figura 5.12. Hidrogramas de crecientes para diferentes periodos de retorno en la cuenca de quebrada.	44
Figura 5.13. Hidrogramas de crecientes para diferentes periodos de retorno en la cuenca de río Lili	45
Figura 6.1. Imágenes de referencia para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning.	49
Figura 6.2. Geometría del modelo hidráulico de río Lili y quebrada (condición existente)	53
Figura 6.3. Mapa de profundidades en el tramo de estudio Tr030 (condición existente)	54
Figura 6.4. Mapa de distribución de velocidades en el tramo de estudio Tr030 (condición existente)	55
Figura 6.5. Distribución de velocidades en la sección 68 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)	56
Figura 6.6. Distribución de velocidades en la sección 86 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)	57
Figura 6.7. Distribución de velocidades en la sección 94 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)	58
Figura 6.8. Distribución de velocidades en la sección 105 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)	59
Figura 6.9. Perfil longitudinal del tramo modelado río Lili – Tr030 (condición existente)	59
Figura 6.10. Geometría del modelo hidráulico de río Lili y quebrada (condición proyecto)	61
Figura 6.11. Gráfica de lámina y definición de corona de muro	62
Figura 6.12. Mapa de profundidades en el tramo de estudio Tr030 (condición proyecto)	63

Figura 6.13 Mapa de distribución de velocidades en el tramo de estudio Tr030 (condición proyecto).....	64
Figura 6.14. Distribución de velocidades en la sección 68 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto).....	65
Figura 6.15. Distribución de velocidades en la sección 86 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto).....	66
Figura 6.16. Distribución de velocidades en la sección 94 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto).....	67
Figura 6.17. Distribución de velocidades en la sección 105 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto).....	68
Figura 6.18. Perfil longitudinal del tramo modelado río Lili – Tr030 (condición proyecto)	69
Figura 7.1. Gráfico del comportamiento granulométrico río Lili, aguas arriba	72
Figura 7.2. Gráfico del comportamiento granulométrico río Lili, aguas abajo	72
Figura 7.3. Esquematización para el análisis de la socavación general	75
Figura 7.4 Esquematización para el análisis de la socavación por curva. Prof. Revelli, Memorias de clase, Politécnico de Turín.	76
Figura 7.5. Esquematización para el análisis de la socavación local en estribos	77
Figura 7.6. Radio de curvatura y radio de curvatura exterior	81
Figura 8.1. Velocidades de lo largo del tramo de modelación del río Lili (comparativo de escenarios proyecto)	85
Figura 8.2. Esquema de protección de fondo	86

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio	12
Tabla 5.1. Cuantiles superiores para Kolmogorov.....	21
Tabla 5.2. Valores percentiles para la distribución Chi – Cuadrado con v grados de libertad	22
Tabla 5.3 Resultados de cálculo de pendientes medias del cauce para las cuencas del río Lili y quebrada	30

Tabla 5.4 Parámetros de forma y relieve	30
Tabla 5.5 Valores de tiempo de concentración con diferentes autores (se utilizan los valores sombreados).....	31
Tabla 5.6 Número de curva para condición de humedad antecedente tipo II (promedio)	34
Tabla 5.7. Resumen análisis probabilístico para las estaciones estudiadas.....	36
Tabla 5.8. Polígonos de Thiessen, áreas de influencia y precipitaciones máximas	37
Tabla 5.9 Hietogramas de diseño (resultados tabulares) para quebrada.....	39
Tabla 5.10 Hietogramas de diseño (resultados tabulares) para río Lili.....	41
Tabla 5.11. Caudales máximos de crecientes cuenca de quebrada	44
Tabla 5.12. Caudales máximos de crecientes cuenca río Lili	45
Tabla 5.13. Caudales máximos de crecientes cuenca Río Lili.....	46
Tabla 5.14. Caudales máximos de crecientes cuenca de quebrada	46
Tabla 6.1 Consideraciones para cálculo de coeficiente de Manning según el método de Cowan.....	50
Tabla 6.2 Coeficientes de rugosidad de diseño para río Lili y quebrada	51
Tabla 6.3. Resultados tabulares de abscisas y cota de corona de muro para condición proyecto.....	62
Tabla 6.4 Resumen de cotas de coronación de muro	70
Tabla 7.1 Resultados de modelación HEC-RAS para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años – río Lili	79
Tabla 7.2 Velocidades de secciones de tramo de estudio.....	79
Tabla 7.3 Cálculo de socavación general para cada sección río Lili.....	80
Tabla 7.4 Cálculo de socavación por curva para cada sección río Lili.....	81
Tabla 7.5 Cálculo de socavación local para muro para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años	82
Tabla 7.6 Resultado de socavación total en las secciones de interés del río Lili	83
Tabla 8.1 Resultado de socavación total en las secciones de interés del río Lili	85
Tabla 9.1 Resumen de resultados de socavación para el Muro La Riverita sobre el río Lili	87
Tabla 9.2 Resumen de resultados de socavación para el Muro La Riverita sobre el río Lili con la obra de protección implementada.....	87



1 INTRODUCCIÓN

En este documento se realiza el análisis el comportamiento hidrológico de las cuencas del río Lili y la quebrada aledaña, a través de una caracterización realizada para 10, 30 y 100 años de período de retorno. Para ello, se implementó el modelo hidrológico desde el punto de vista de análisis espacial y de hidrología los software *QGIS v3.28* y el *HEC-HMS v4.11*, este último desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica perteneciente al Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

Con base a la información del estudio hidrológico y el levantamiento topográfico se realiza el modelo hidráulico, que permite analizar la dinámica fluvial de la condición existente para posteriormente determinar la cota de muro requerida para evitar desbordamientos.

2 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra a las afueras del perímetro urbano de Cali del departamento de Valle del Cauca, específicamente al sur-occidente del perímetro urbano. El proyecto objeto de estudio se encuentra en el río Lili específicamente a la altura de PTAR Acuabuitrera. En la **Figura 2.1** se presenta el mapa de localización general del proyecto de estudio.

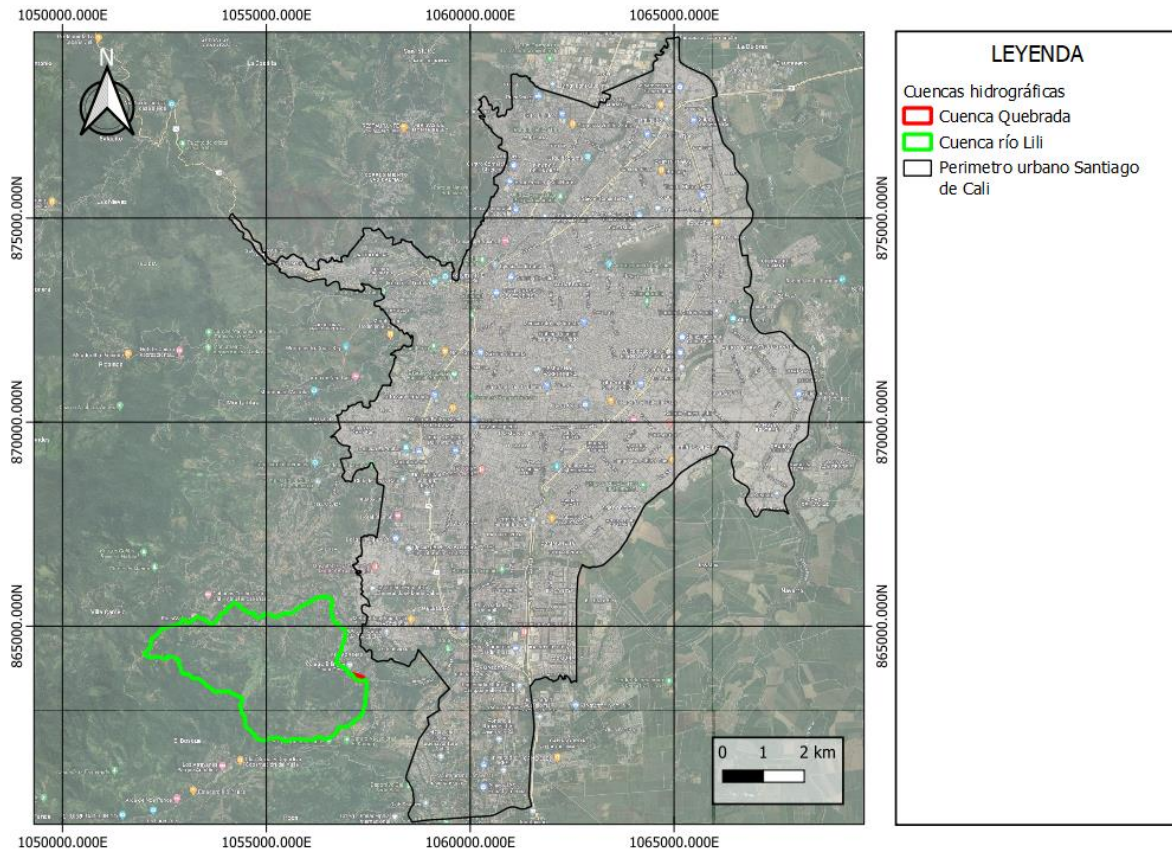


Figura 2.1. Mapa de localización general del proyecto
Fuente: Elaboración propia.

3 LOCALIZACIÓN ESPECIFICA

La cuenca de estudio es la cuenca del río Lili, que limita al norte y occidente con la cuenca del río Meléndez al sur con la cuenca del río Pance y al oriente con el municipio de Santiago de Cali. Cabe aclarar que la cuenca es al punto de cierre de la PTAR El Plan. Y la cuenca de la quebrada que desemboca al río Lili en este punto.

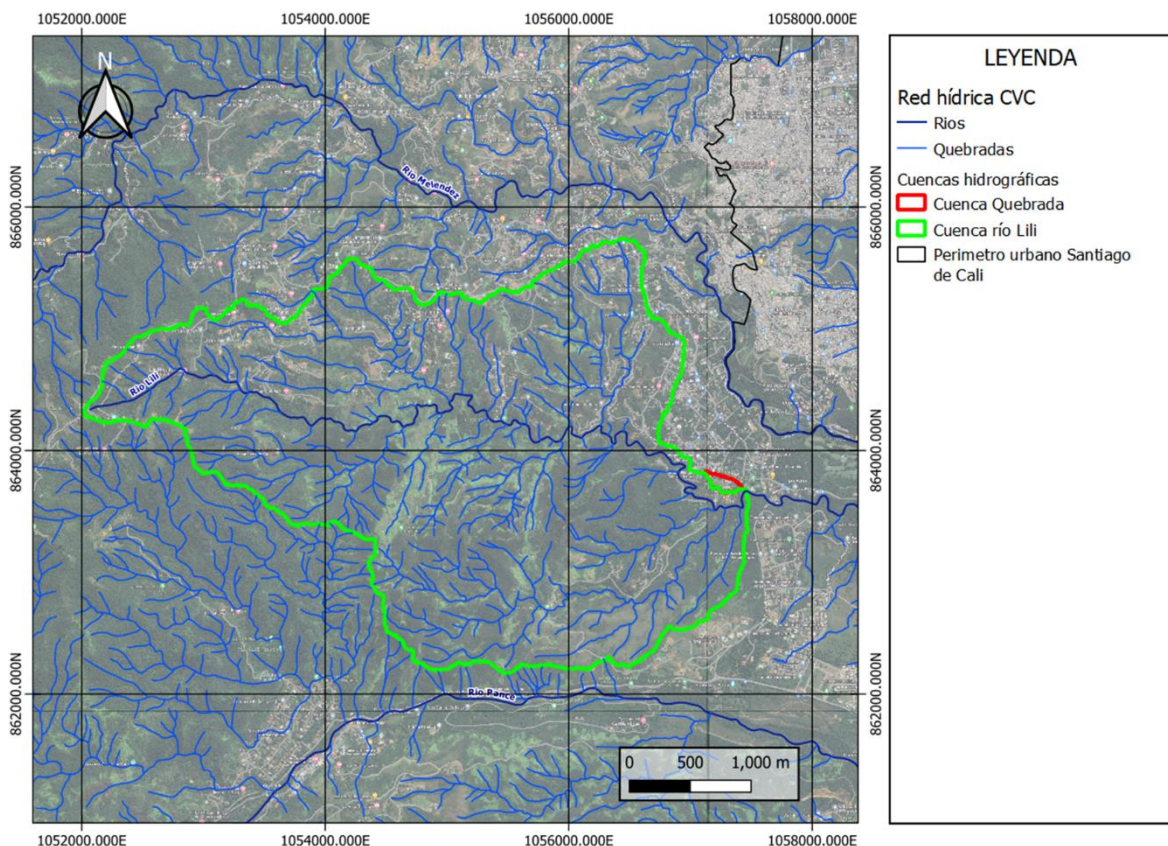


Figura 3.1. Mapa de localización general del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

4 ESTUDIO CLIMATOLÓGICO

El clima es uno de los factores ambientales más determinantes, ya que define las cantidades y distribuciones de los diversos organismos, animales y vegetales, e interviene en las diferentes relaciones. El clima involucra una serie de condiciones atmosféricas que caracterizan una región. Su análisis se realiza en función de sus elementos básicos: precipitación, temperatura, viento, humedad, y otros, considerándolos aisladamente o combinados, cuyos valores son utilizados como base para establecer los tipos climáticos y la zonificación climática.

Colombia está situada en la zona ecuatorial y el sistema montañoso conformado principalmente por la cordillera de Los Andes le confiere una variabilidad topográfica.

Por lo tanto, las variaciones climáticas no obedecen a estaciones, sino a las variaciones altitudinales y al cambio entre el día y la noche. Las diferencias entre estaciones son definidas en función de la lluvia, que es el parámetro que hace la diferencia entre los periodos de invierno y verano.

A través del portal de consultas de estaciones de la red climatológica de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) e IDEAM, se identifican las estaciones más cercanas al área de estudio con series históricas (más de 15 años). Se analizan los datos de las estaciones climatológicas de la **Tabla 4.1** y se muestran sus ubicaciones respecto a la zona de estudio en la **Figura 4.1**.

Tabla 4.1. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio

Nombre	Entidad	Codigo	Este	Norte	Categoría	Altura
Alto de las iglesias	CVC	2622320103	1050686.96	864790.63	Pluviométrica	1705
El Palacio	CVC	2622100102	1061497.65	855514.6	Pluviométrica	950
La Fonda	CVC	2622320101	1054080.38	866787.33	Pluviográfica	1298
Lili - San Sebastián	CVC	2622310201	1053576.31	864820	Pluviográfica	1554
Universidad del Valle	IDEAM	26055120	1060411.86	865308.66	Climática Principal	996

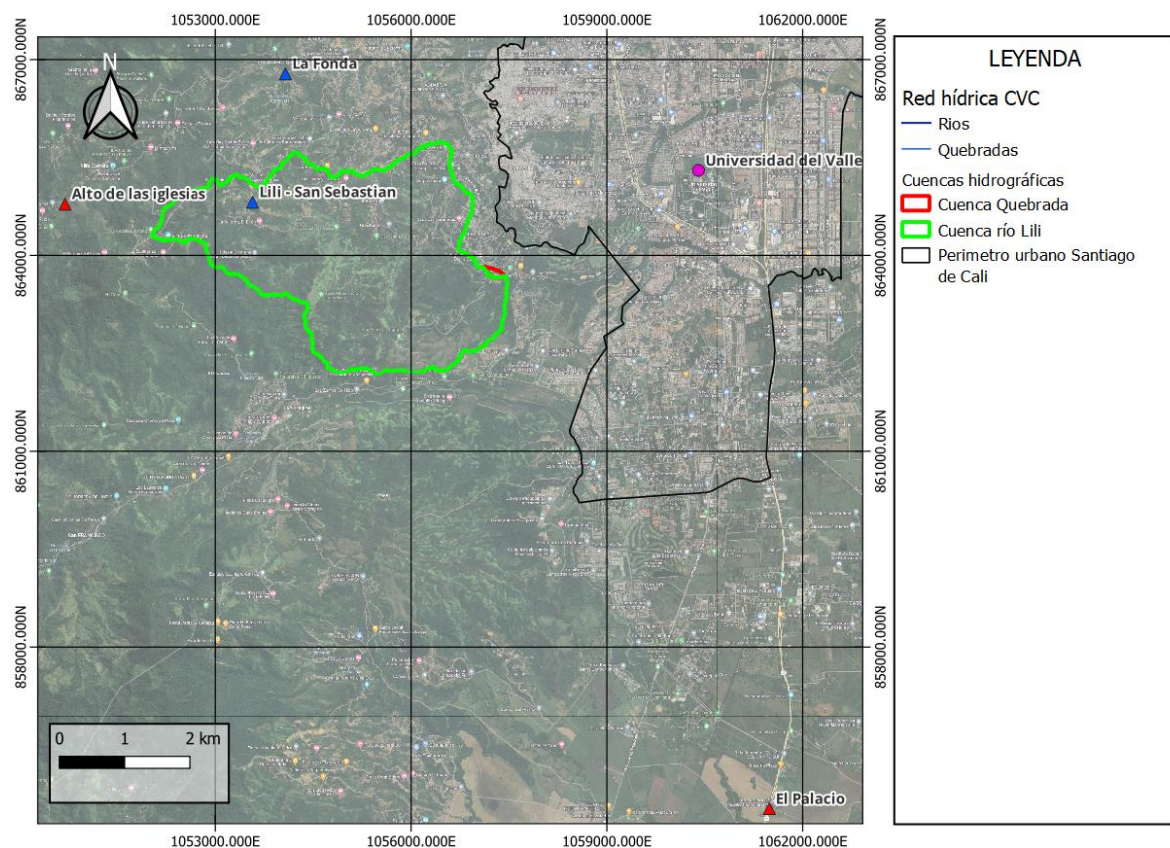


Figura 4.1. Mapa de localización de estaciones en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.1 Precipitación total

A continuación, se presenta el gráfico de barras del comportamiento mensual multianual de la precipitación, para cada uno de los doce (12) meses del año; visto desde su valor promedio.

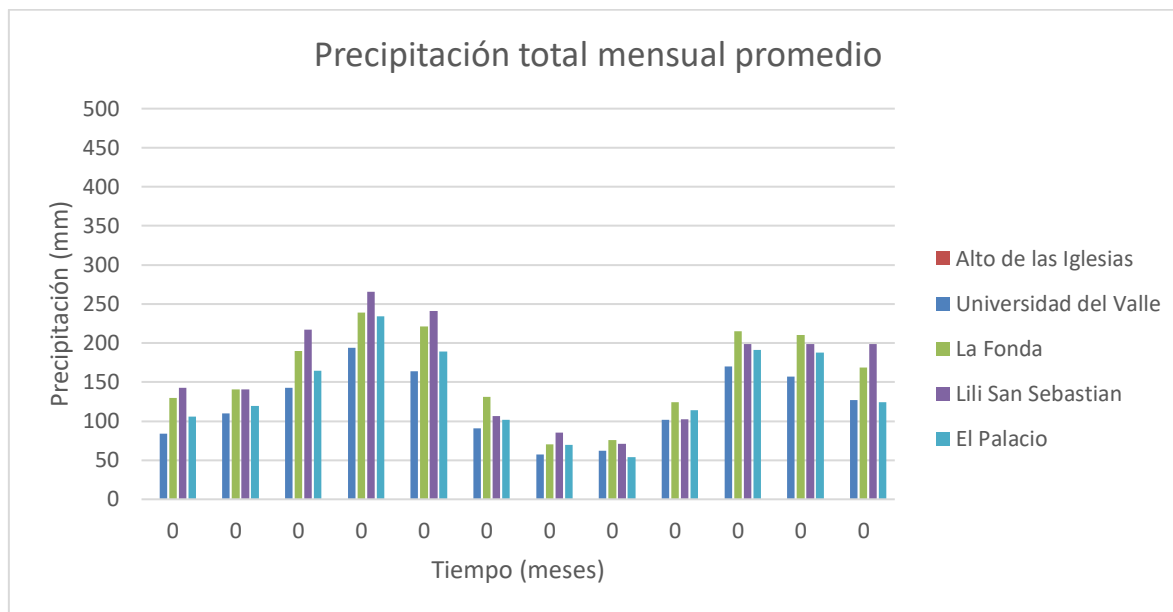


Figura 4.2. Precipitación total mensual promedio.
Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4.2** se presenta el comportamiento de las precipitaciones totales mensuales multianuales promedio de las estaciones utilizadas para la zona a de estudio. Se puede identificar un comportamiento con dos periodos de verano (valle) y dos periodos de invierno (pico), donde el valle se encuentra ubicado entre junio y agosto con valor promedio de precipitación de 70.50 mm y el segundo de enero a febrero con valor promedio de precipitación de 140.80 mm. Se identifican a su vez, dos periodos de invierno, como se menciona antes, en los cuales se tiene para el primer periodo una precipitación promedio de 230.30 mm, para el periodo de marzo a mayo, mientras que el segundo periodo de invierno, comprendido entre octubre y diciembre, alcance precipitaciones de 211.70 mm mensual.

El comportamiento de las precipitaciones de esta estación es similar al que se observa en la gráfica de precipitaciones de la región 10, correspondiente a la cuenca de alto cauca, del documento "*Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP)*" (IDEAM, 2014). En dicho documento, posteriormente se presenta un mapa donde se

identifica la zona de estudio del presente proyecto, como una zona caracterizada por un régimen de lluvias bimodal.

4.2 Días de lluvia

A partir de los registros de las estaciones presentes en la zona de estudio se analiza el comportamiento de las frecuencias de la lluvia, que en ocasiones responde al comportamiento de la magnitud de precipitaciones totales mensuales. Con base a estos resultados se presentan los valores promedios de días de lluvia, para series mensuales multianuales de las estaciones de interés el siguiente gráfico de barras.

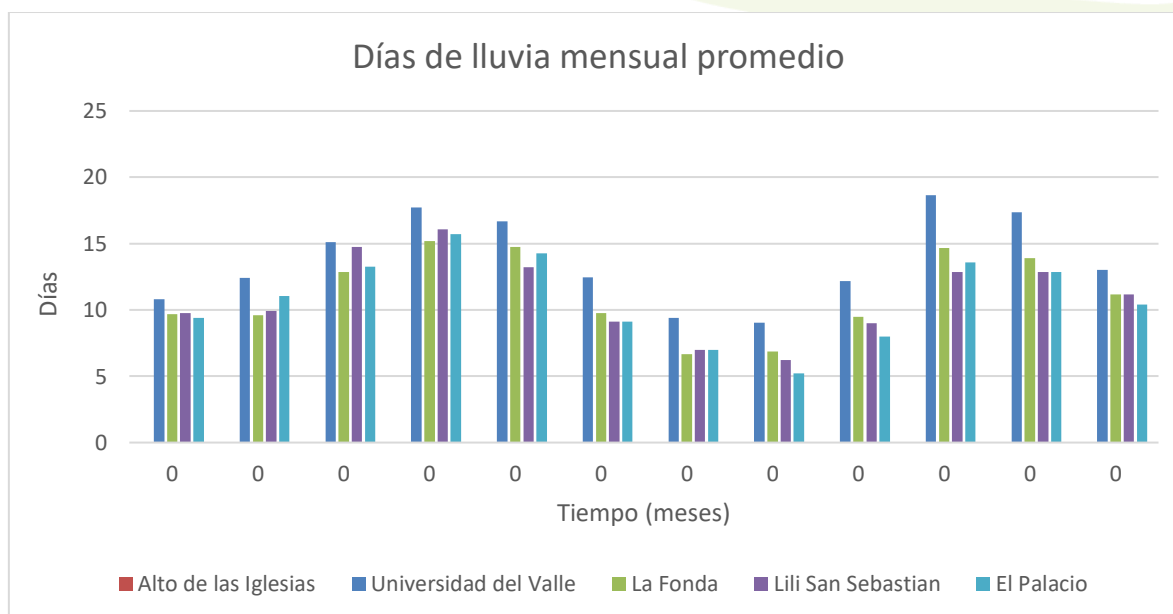


Figura 4.3. Días de lluvia promedio.
Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4.3** se puede observar que el comportamiento de los días de lluvia mes a mes y es concordante con el gráfico de precipitación total mensual. El mes de abril y octubre se pueden considerar los meses con más días de lluvia con un valor de 19 días, por el contrario, el mes con menos días de lluvia es julio con un valor de 10 días.

4.3 Temperatura

Con el fin de realizar una descripción desde la climatología se emplean los datos de la estación Universidad del Valle, la cual cuenta con información de temperatura entre los años 2000 y 2019. Estos datos permiten entender de manera aproximada el comportamiento de la temperatura en la zona.

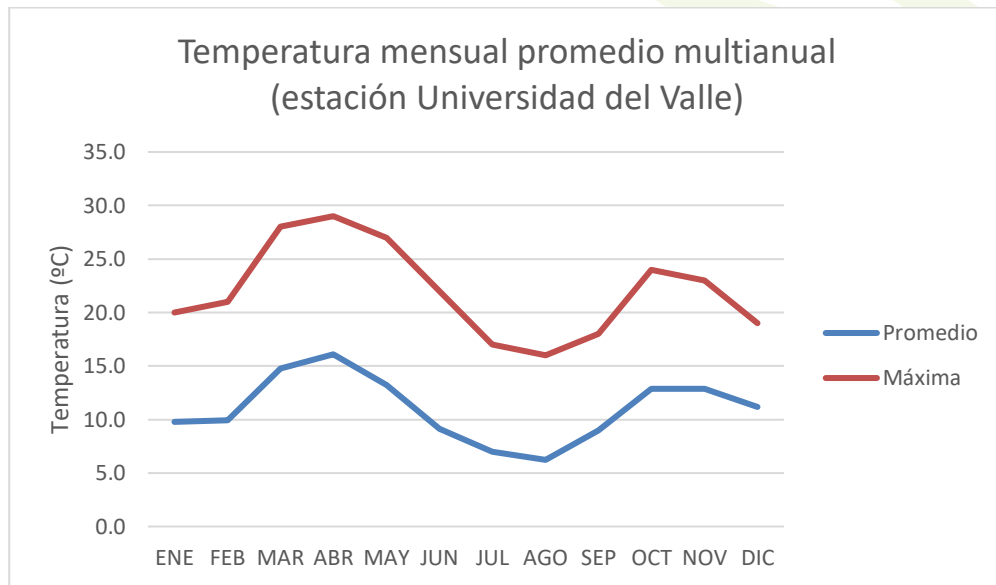


Figura 4.4. Temperaturas registradas de la estación Universidad del Valle
Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 4.4** la temperatura registrada varía en un rango entre 16°C y 22°C durante el año. Se presenta una temperatura media de 19.10°C y valores de máximos de 19.90°C en el mes de febrero. Debe considerarse que las variaciones de temperatura pueden darse especialmente por la variación del día y la noche, lo cual resulta en tener las menores temperaturas en horas de la noche.

5 ESTUDIO HIDROLÓGICO

En el estudio hidrológico se busca estimar la capacidad de transporte de agua y los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno con el propósito de proveer la información necesaria para las obras establecidas en el proyecto.

La identificación de sitios donde pueden ocurrir desbordamientos y las áreas afectadas por los mismos, es fundamental para la construcción de los planes y proyectos de defensa frente a los desastres como remoción en masa así mismo para el diseño de estudios en los cuales intervengan estructuras de obra civil tales como puentes, box culvert, alcantarillas, muros, tanques de regulación entre otros ya que estos juegan un papel muy importante a la hora de redireccionar el flujo libre del agua en los drenajes urbanos y por eso se vuelve de indispensable importancia el análisis de estos para poder diseñarlos de una manera que se mitigue el impacto que puedan ocasionar con el cambio del uso del suelo, el cual es el principal factor que influye en la cantidad de agua que drena sobre una superficie determinada.

Este tipo de estudios requieren de evaluaciones hidrológicas, las cuales han evolucionado en los últimos años gracias al uso de modelos hidrológicos como el HEC-HMS que es un programa de síntesis hidrológica tipo evento, lineal y semi-distribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de crecientes a partir de condiciones de lluvia extrema.

5.1 Metodología

La caracterización hidrológica en este estudio se realizó a partir de la implementación del modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System) que es un programa de síntesis hidrológica tipo evento, lineal y semi-distribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de crecientes a partir de condiciones de lluvia extrema.

5.1.1 Características morfológicas

Las formas de las cuencas afectan la dinámica del flujo de agua en la misma y tiene incidencia directa en el resultado del caudal máximo obtenido en el estudio. Es así como una cuenca de forma redonda tiende a permitir la concentración de la esorrentía en la cuenca, facilitando las crecidas, mientras que, por el contrario, en las cuencas alargadas las crecientes se atenúan.

Para determinar qué tipo de forma presenta una cuenca se utilizan los siguientes parámetros:

- **Factor de forma (Kf):**

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación 1

Donde:

L es la longitud máxima del cauce principal en km

A: el área de la cuenca en Km²

Cuando Kf tiende a 0 la cuenca tiene tendencia a una forma alargada, mientras para valores de Kf cercanos a 1 la cuenca tiende a ser redonda.

- **Coefficiente de compacidad (Kc):**

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Ecuación 2

Donde:

P es el perímetro de la cuenca en Km

A: el área en km².

Este coeficiente se interpreta de la siguiente manera:

- Kc = 1.00 a 1.25: forma redonda a oval redonda
- Kc = 1.26 a 1.50: forma oval redonda a oval oblonga
- Kc = 1.51 a 1.75: forma oval oblonga a rectangular oblonga

- **Índice de alargamiento (Ia):**

$$Ia = \frac{L}{B}$$

Ecuación 3

Donde:

L es la longitud máxima del cauce principal en km

B: el ancho máximo de la cuenca en km.

El resultado de la expresión es adimensional.

Si el valor de Ia es mayor a 1 se trata de una cuenca alargada, mientras que para valores cercanos a 1 se habla de una tendencia redonda.

- **Coefficiente de Masividad (Km):**

$$Km = \frac{Em}{A}$$

Ecuación 4

Donde:

Em es la elevación media de la cuenca es msnm

A es el área total de la cuenca en Km².

- Km = 0 a 35: Muy montañosa.
- Km = 35 a 70: Montañosa.
- Km = 70 a 105: Moderadamente montañosa.

5.1.2 Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencias mediante funciones de distribución de probabilidad permite aproximar el comportamiento de fenómenos naturales, tales como la lluvia o caudales, mediante un modelo probabilístico. Con estas funciones se puede aproximar un valor (lluvia o caudal, por ejemplo) asociado a la probabilidad ocurrencia, la cual depende directamente del período de retorno.

Entre un gran número de funciones de distribución de probabilidad (FDP), se emplean en especial, pues se ajustan de manera adecuada con el comportamiento de lluvias máximas en la zona continental del occidente colombiano. A continuación, se presentan las mencionadas funciones. Donde en cada función (x) representa la variable que en estudios hidrológicos puede tratarse de caudales o precipitación, por ejemplo; μ la media de la muestra y σ la desviación.

- **Log-Pearson III:**

Esta función de distribución de probabilidad es una de las más usadas en hidrología, junto con su forma no logarítmica (Pearson III), presenta un excelente ajuste con valores máximos.

$$f(x) = \frac{1}{x|\beta|\Gamma(\alpha)} \left(\frac{\ln(x)-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} * \exp \left(-\frac{\ln(x)-\gamma}{\beta} \right)$$

Ecuación 5

Donde α y β son parámetros de forma y escala respectivamente y γ el parámetro de localización, los cuales se definen de la siguiente manera.

$$\alpha = \left(\frac{2}{Cs} \right)^2; \quad \beta = \frac{Cs}{2} S_y; \quad Cs = \frac{\sigma}{\mu}$$

Ecuación 6

- **Log-Normal:**

Se ajusta a variables extremas en hidrología, tanto mínimas como máximas y permite una reducción de la mayor proporción de los datos mayores al hacer uso de logaritmos.

$$f(x) = \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma} \right)^2 \right)}{x\sigma\sqrt{2\pi}}$$

Ecuación 7

- **Gumbel:**

Se emplea en diferentes campos, donde se evalúan valores extremos (mínimos y máximos), cuando se analizan valores máximos la distribución de Gumbel se ajusta a través de la teoría de los valores extremos.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp(-1 - \exp(-z))$$

Ecuación 8

Dónde: $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$

Por otro lado, en la probabilidad se realizan pruebas para determinar la discrepancia entre los valores observados y los valores esperados en el modelo de estudio, denominadas pruebas de bondad. Estas ayudan a corroborar si los datos de la muestra se ajustan a la distribución de probabilidad utilizada. En este caso las pruebas de bondad usadas fueron:

- **Kolmogorov- Smirnov:**

La prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra es un procedimiento de "bondad de ajuste", que permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada, es decir, contrasta si las observaciones podrían razonablemente proceder de la distribución especificada. Pertenece a la familia de las pruebas no paramétricas.

A continuación, se muestran los valores cuantiles superiores de la distribución estadística de Kolmogorov según el Manual de Drenaje para Carreteras de INVIAS.

Tabla 5.1. Cuantiles superiores para Kolmogorov.



n	PROBABILIDAD DE LOS INTERVALOS DE CONFIANZA				
	0.80	0.85	0.90	0.95	0.99
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270

Fuente: INVIAS, 2009

- Chi-Cuadrado

La prueba de bondad Chi-Cuadrado o χ^2 relaciona la consistencia del ajuste a través del error cuadrático medio. Usualmente se compara el resultado de la prueba de bondad, con los valores asociados a una significancia $S = 0.05$, para m grados de libertad. El valor de Chi-Cuadrado (también denotado C , para la variable resultante de la prueba de bondad), debe ser menor que el valor asociado a sus grados de libertad y significancia, según la siguiente tabla.

Tabla 5.2. Valores percentiles para la distribución Chi – Cuadrado con v grados de libertad

v	X ² _{0.995}	X ² _{0.99}	X ² _{0.975}	X ² _{0.95}	X ² _{0.90}	X ² _{0.75}	X ² _{0.50}	X ² _{0.25}	X ² _{0.10}	X ² _{0.05}	X ² _{0.025}	X ² _{0.01}	X ² _{0.005}
1	7.88	6.63	5.02	3.84	2.71	1.32	0.455	0.102	0.0158	0.0039	0.0010	0.0002	0.0000
2	10.6	9.21	7.38	5.99	4.61	2.77	1.39	0.575	0.211	0.103	0.0506	0.0201	0.0100
3	12.8	11.3	9.35	7.81	6.25	4.11	2.37	1.21	0.584	0.352	0.216	0.115	0.072
4	14.9	13.3	11.1	9.49	7.78	5.39	3.36	1.92	1.06	0.711	0.484	0.297	0.207
5	16.7	15.1	12.8	11.1	9.24	6.63	4.35	2.67	1.61	1.15	0.831	0.554	0.412
6	18.5	16.8	14.4	12.6	10.6	7.84	5.35	3.45	2.20	1.64	1.24	0.872	0.676
7	20.3	18.5	16.0	14.1	12.0	9.04	6.35	4.25	2.83	2.17	1.69	1.24	0.989
8	22.0	20.1	17.5	15.5	13.4	10.2	7.34	5.07	3.49	2.73	2.18	1.65	1.34
9	23.6	21.7	19.0	16.9	14.7	11.4	8.34	5.90	4.17	3.33	2.70	2.09	1.73
10	25.2	23.2	20.5	18.3	16.0	12.5	9.34	6.74	4.87	3.94	3.25	2.56	2.16
11	26.8	24.7	21.9	19.7	17.3	13.7	10.3	7.58	5.58	4.57	3.82	3.05	2.60
12	28.3	26.2	23.3	21.0	18.5	14.8	11.3	8.44	6.30	5.23	4.40	3.57	3.07
13	29.8	27.7	24.7	22.4	19.8	16.0	12.3	9.30	7.04	5.89	5.01	4.11	3.57
14	31.3	29.1	26.1	23.7	21.1	17.1	13.3	10.2	7.79	6.57	5.63	4.66	4.07
15	32.8	30.6	27.5	25.0	22.3	18.2	14.3	11.0	8.55	7.26	6.26	5.23	4.60
16	34.3	32.0	28.8	26.3	23.5	19.4	15.3	11.9	9.31	7.96	6.91	5.81	5.14
17	35.7	33.4	30.2	27.6	24.8	20.5	16.3	12.8	10.1	8.67	7.56	6.41	5.70
18	37.2	34.8	31.5	28.9	26.0	21.6	17.3	13.7	10.9	9.39	8.23	7.01	6.26
19	38.6	36.2	32.9	30.1	27.2	22.7	18.3	14.6	11.7	10.1	8.91	7.63	6.84
20	40.0	37.6	34.2	31.4	28.4	23.8	19.3	15.5	12.4	10.9	9.59	8.26	7.43
21	41.4	38.9	35.5	32.7	29.6	24.9	20.3	16.3	13.2	11.6	10.3	8.90	8.03
22	42.8	40.3	36.8	33.9	30.8	26.0	21.3	17.2	14.0	12.3	11.0	9.54	8.64
23	44.2	41.6	38.1	35.2	32.0	27.1	22.3	18.1	14.8	13.1	11.7	10.2	9.26
24	45.6	43.0	39.4	36.4	33.2	28.2	23.3	19.0	15.7	13.8	12.4	10.9	9.89
25	46.9	44.3	40.6	37.7	34.4	29.3	24.3	19.9	16.5	14.6	13.1	11.5	10.5
26	48.3	45.6	41.9	38.9	35.6	30.4	25.3	20.8	17.3	15.4	13.8	12.2	11.2
27	49.6	47.0	43.2	40.1	36.7	31.5	26.3	21.7	18.1	16.2	14.6	12.9	11.8
28	51.0	48.3	44.5	41.3	37.9	32.6	27.3	22.7	18.9	16.9	15.3	13.6	12.5
29	52.3	49.6	45.7	42.6	39.1	33.7	28.3	23.6	19.8	17.7	16.0	14.3	13.1
30	53.7	50.9	47.0	43.8	40.3	34.8	29.3	24.5	20.6	18.5	16.8	15.0	13.8
40	66.8	63.7	59.3	55.8	51.8	45.6	39.3	33.7	29.1	26.5	24.4	22.2	20.7
50	79.5	76.2	71.4	67.5	63.2	56.3	49.3	42.9	37.7	34.8	32.4	29.7	28.0
60	92.0	88.4	83.3	79.1	74.4	67.0	59.3	52.3	46.5	43.2	40.5	37.5	35.5
70	104.2	100.4	95.0	90.5	85.5	77.6	69.3	61.7	55.3	51.7	48.8	45.4	43.3
80	116.3	112.3	106.6	101.9	96.6	88.1	79.3	71.1	64.3	60.4	57.2	53.5	51.2
90	128.3	124.1	118.1	113.1	107.6	98.6	89.3	80.6	73.3	69.1	65.6	61.8	59.2
100	140.2	135.8	129.6	124.3	118.5	109.1	99.3	90.1	82.4	77.9	74.2	70.1	67.3

Fuente: INVIAS, 2009

5.1.3 Tiempo de concentración

Para el cálculo del tiempo de concentración, es decir el tiempo que tarda una partícula de agua en transportarse desde el punto más alto hasta el punto de cierre de la cuenca, se emplearon diferentes ecuaciones, presentadas a continuación.

Ventura-Heras:

$$T_c = a * \frac{A^{0.5}}{S}$$

Ecuación 9



Dónde: $a=0.052$
 A = Área de la cuenca (Km²)
 S = Pendiente media del cauce (m/m)

Pezzoli:
$$Tc = 0,055 * \frac{L}{S^{0.5}}$$

Ecuación 10

Dónde: L = Longitud de la asta principal de la cuenca (Km)
 S = Pendiente media del cauce (m/m)

Ventura:
$$Tc = 0,127 * \frac{A^{0.5}}{S^{0.5}}$$

Ecuación 11

Dónde: A = Área de la cuenca (Km²)
 S = Pendiente media del cauce (m/m)

Giandotti:
$$Tc = \frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{H_m-h_o}}$$

Ecuación 12

Dónde: A = Área de la cuenca (Km²)
 L = Longitud de la asta principal de la cuenca (Km)
 H_m = Altura media de la cuenca (msnm)
 H_o = Altura del punto de cierre de la cuenca (msnm)

Passini:
$$Tc = a * \frac{(AL)^{1/3}}{S^{0.5}}$$

Ecuación 13

Dónde: $a=0.108$
 A = Área de la cuenca (Km²)
 L = Longitud de la asta principal de la cuenca (Km)
 S = Pendiente media del cauce (m/m)

Clark:
$$Tc = 0.335 \left[\frac{A}{S^{0.5}} \right]^{0.593}$$

Ecuación 14

Dónde: A = Área de la cuenca (Km²)
 S = Pendiente media del cauce (m/m)

Kirpich: $T_c = 0.06628L^{0.77}S^{-0.385}$

Ecuación 15

Dónde: L= Longitud de la asta principal de la cuenca (Km)
S= Pendiente media del cauce (m/m)

Valencia Zuluaga: $T_c = 1.7694A^{0.325}L^{-0.096}S^{-0.29}$

Ecuación 16

Dónde: A= Área de la cuenca (Km²)
L= Longitud de la asta principal de la cuenca (Km)
S= Pendiente media del cauce (m/m)

Donde, T_c es el tiempo de concentración (horas), L es la longitud del curso de agua más largo (km), S es la pendiente promedio del cauce principal (en m/m para la ecuación de Kirpich y en porcentaje (%) para las de Temez, Ventura-Heras y Giandotti), y H es la diferencia de altura entre la división y la salida.

5.1.4 Hietogramas de diseño

Una vez determinadas las precipitaciones máximas proyectadas para diferentes periodos de retorno y respectivamente calculado el valor asociado a la cuenca cuando se trata de múltiples estaciones (valor medio calculado por medio de los métodos de distribución espacial de las precipitaciones), se procede a distribuir temporalmente la lluvia.

En la determinación de los hietogramas para estudio de crecientes se adopta el análisis del estudio de la malla vial del Valle del Cauca realizado en el año 2004 por Hidroccidente, para cerca de 100 tormentas registradas en diferentes zonas del departamento del Valle del Cauca que establece una distribución temporal de lluvias máximas promedio, la cual se ilustra en la **Figura 5.1** A partir de esta distribución temporal, se determina los hietogramas porcentuales de lluvia y con base en éstos y en las lluvias máximas asociadas a 30, 50 y 100 años de período de retorno.



Figura 5.1 Distribución temporal de lluvias promedio para el Valle del Cauca
Fuente: Hidroccidente

Las precipitaciones proyectadas para diferentes periodos de retorno se distribuyen a lo largo de 360 min empleando las constantes de distribución temporal de la lluvia, para el Valle del Cauca.

5.1.5 Hidrogramas de creciente

En este estudio se decidió emplear el Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos; este método parte de la hipótesis de que la relación entre la infiltración total y el almacenamiento potencial de agua en el suelo es igual a la relación existente entre escorrentía y precipitación, una vez se ha iniciado la escorrentía.

Este método permite el cálculo de la escorrentía superficial o lluvia neta a partir de las siguientes expresiones:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Ecuación 17

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación 18

Dónde: Pe = Precipitación neta (mm)
 P = Precipitación total (mm)
 S = Capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)
 CN = Número de curva de escurrimiento

El número de curva de escurrimiento (CN) es un valor tabulado que está en función de la lluvia antecedente, el tipo y densidad de cobertura vegetal, el tipo de suelo y el tratamiento que se le da al mismo. Para las dos cuencas se estimaron valores de CN para la condición de humedad antecedente tipo II (promedio), a partir del análisis de cartografía base y temática a escala 1:25.000 de la cobertura del suelo anexada.

Finalmente, para transformar la lluvia en caudal y generar los hidrogramas de crecientes, se usó el método del Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, para lo cual se calcularon las áreas de las cuencas, longitudes, alturas medias y puntos de cierre de las cuencas, pendientes de las cuencas y pendientes del cauce principal a partir de cartografía base a escala 1:25.000. Con esta información y a través de varias fórmulas se calculó el tiempo de concentración.

5.2 Cálculos y resultados hidrológicos

5.2.1 Parámetros fisiográficos y análisis morfológico

Este numeral hace referencia a las características físicas del terreno asociadas a los procesos de transferencia y almacenamiento del ciclo hidrológico, parámetros que se resumen en la **Tabla 5.4**, Los parámetros mencionados fueron calculados mediante el modelo de elevación digital que se muestra en la **Figura 5.2**.

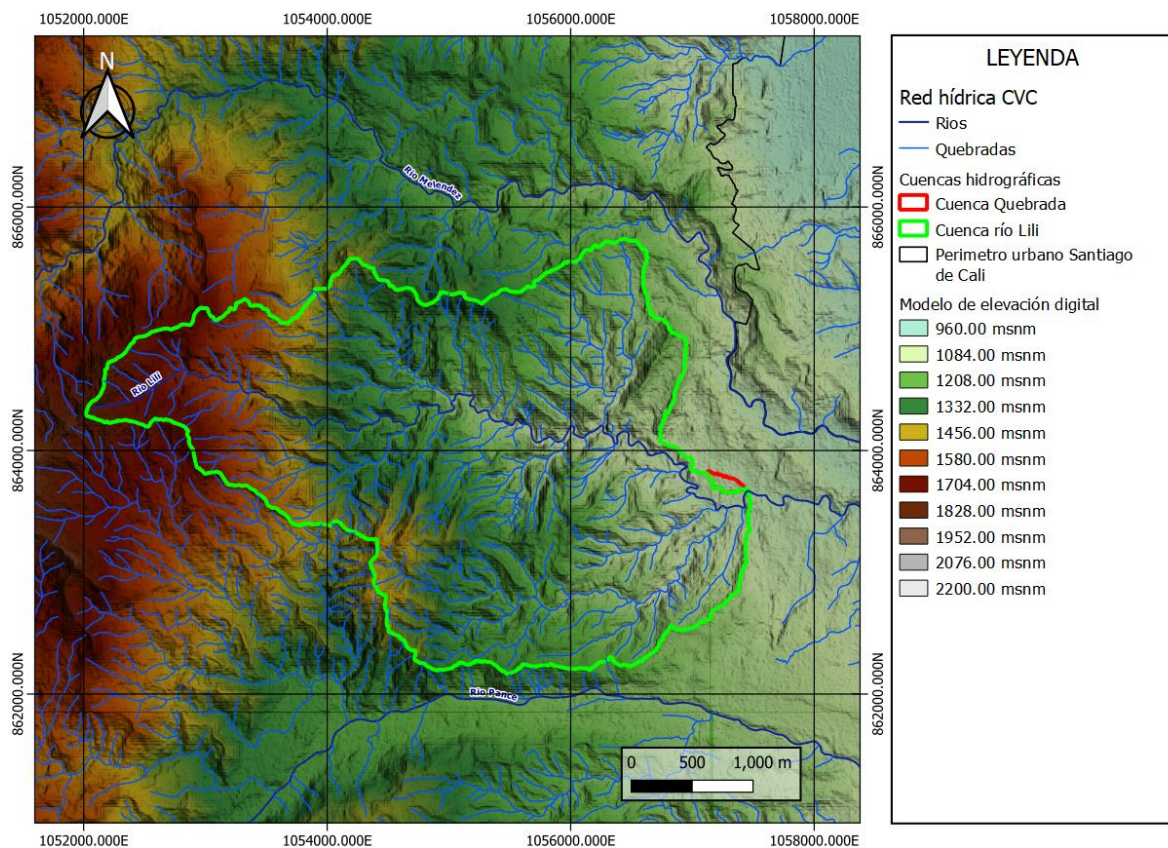


Figura 5.2 Modelo de elevación digital de las cuencas

Fuente: Elaboración propia

Con la información del modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés), se determina el mapa de pendientes locales, con el cual posteriormente se determinará el valor de la pendiente promedio en la cuenca. En este mapa, presentado en la **Figura 5.3** se observa que en términos generales para la cuenca del río Lili predominan pendientes de un terreno fuertemente quebrado, es decir del orden de 41.82%, por otro lado, para la cuenca de la quebrada se observan pendientes clasificadas como terreno inclinado del orden de 11.96%.

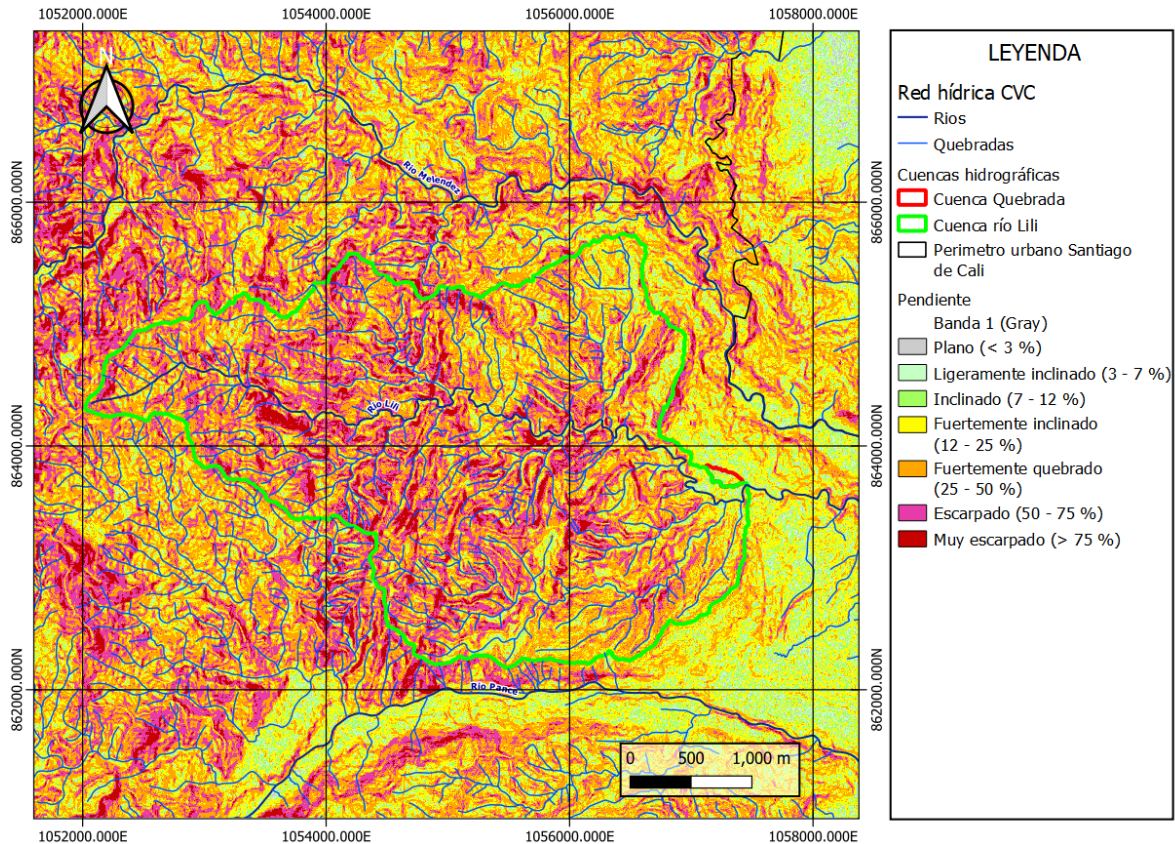


Figura 5.3 Modelo digital de pendientes
Fuente: Elaboración propia

Se realizó el cálculo de la pendiente media para el cauce del río Lili y la quebrada, a partir del procedimiento propuesto por Taylor-Schwarz el cual tiene la posibilidad de considerar tramos de cauce divididos en tramos de diferentes longitudes. Se requiere la longitud y la pendiente de cada tramo para proceder al cálculo de la pendiente media del cauce a través del método propuesto por estos autores. La pendiente media del cauce está dada por la siguiente ecuación.

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{S_i^2}} \right]^2$$

Donde:

S es la pendiente media cauce (m/m)

S_i es la pendiente del tramo i (m/m)

L_i es la longitud del tramo i (m)

En anexos se presentan los resultados de cálculo de pendiente media del cauce de las cuencas de estudio.

A partir del modelo de elevación digital y los cálculos anteriores se presenta el resumen de los resultados de los parámetros morfométricos, donde a su vez se presenta el valor de tiempo de concentración (calculado en el apartado **5.1.3**).

Tabla 5.3 Resultados de cálculo de pendientes medias del cauce para las cuencas del río Lili y quebrada

Cuenca	Código	Forma			Pendientes		L_{cauce}	Elevación			T_c	Lag
		A	P	B	So_{cauce}	So_{cuenca}		mínima	media	máxima		
		km ²	km	km	%	%		msnm	msnm	msnm		
Cuenca Quebrada	CQ	0.028	1.170	0.111	7.07	11.96	0.34	1042.32	1055.92	1066.57	0.09	3.40
Cuenca río Lili	CRL	11.361	23.924	3.788	4.66	41.82	7.67	1041.70	1286.43	1855.42	2.06	74.22

En aras de realizar una caracterización completa de las cuencas, se calcularon algunos parámetros que permiten estimar la forma y el comportamiento del relieve de las cuencas en estudio. Los resultados se muestran en la **Tabla 5.4**.

Tabla 5.4 Parámetros de forma y relieve

Cuenca	Código	Morfometría			
		Kf	Kc	Ia	Km
Cuenca Quebrada	CQ	0.24	1.96	3.09	37711
Cuenca río Lili	CRL	0.19	1.99	2.02	113

El factor de forma, al presentar un valor muy cercano a 0 en las dos cuencas, indica una forma alargada, lo cual es soportado por el índice de alargamiento, pues el valor en las cuencas es superior a 1, y se comprueba con los mapas antes presentados, donde se observa que las cuencas tienden a ser alargadas. Por otro lado, los resultados obtenidos

para el coeficiente de masividad y compacidad de las cuencas del río Lili y quebrada son valores fuera del rango establecido por lo que no se puede realizar una clasificación de las cuencas para estos coeficientes.

5.2.2 Tiempo de concentración

A partir de los autores presentados antes para el cálculo de tiempo de concentración, se calculan los valores asociados a las cuencas de estudio; se presentan en la **Tabla 5.5** los valores obtenidos. Los valores tomados son los que están dentro del error estándar.

Tabla 5.5 Valores de tiempo de concentración con diferentes autores (se utilizan los valores sombreados)

Cuenca	Código	Morfometría										
		Kf	Kc	Ia	Km	Ventura	Giandotti	Ventura-Heras	Clark	Valencia Zuluaga	Passini	Promedio
						hr	hr	hr	hr	hr	hr	hr
Cuenca Quebrada	CQ	0.24	1.96	3.09	37711	0.08	0.40	0.12	0.09	0.35	0.09	0.09
Cuenca río Lili	CRL	0.19	1.99	2.02	113	1.98	2.00	3.76	3.51	2.05	2.22	2.06

A partir de los valores obtenidos se realiza un análisis estadístico en el cual se descartan los valores que se encuentran por fuera de los límites dados por $\mu \pm \sigma$, donde μ es la media aritmética de la muestra y σ la respectiva desviación estándar de la muestra; para el caso se considera una 100% de la desviación para la determinación de los límites. Así mismo, se presenta las siguientes figuras, donde se observa el rango de error estándar los resultados.

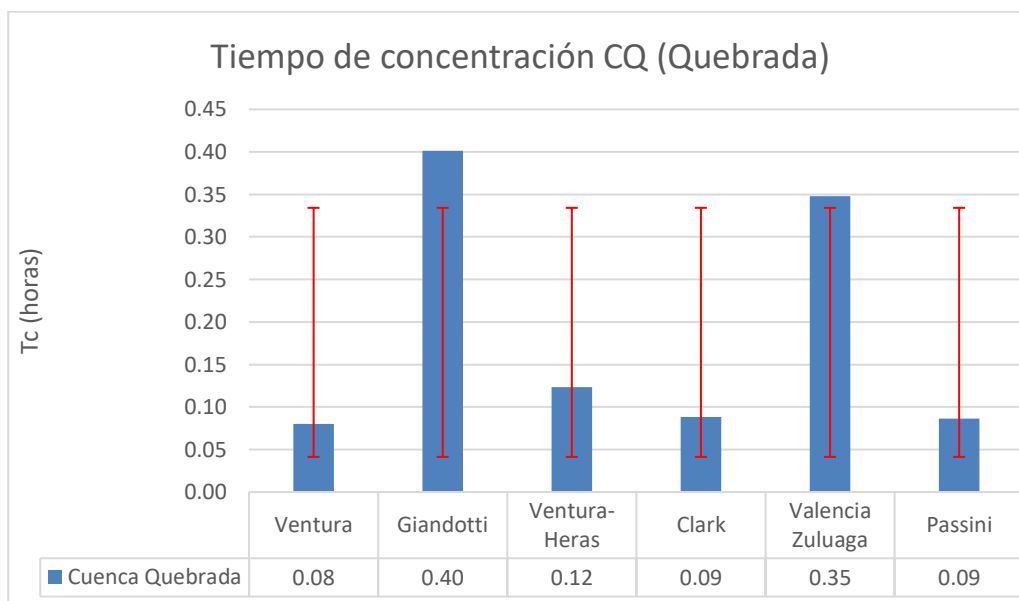


Figura 5.4 Tiempo de concentración para cuenca de quebrada
Fuente: Elaboración propia

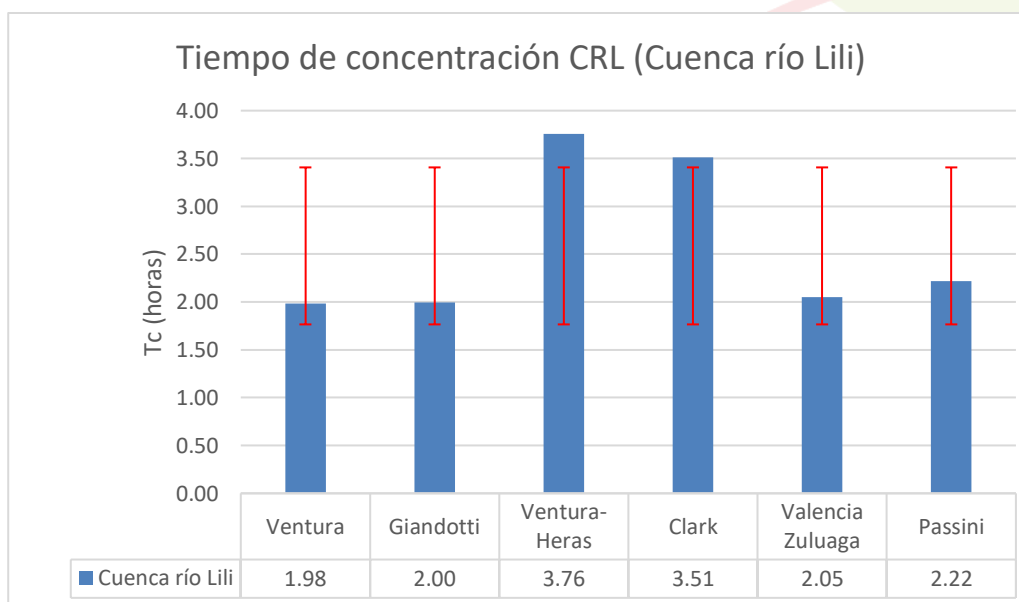


Figura 5.5 Tiempo de concentración para cuenca río Lili
Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Cobertura y uso del suelo

A partir de la capa de cobertura y uso del suelo de la CVC se realiza el recorte en la zona de estudio y se obtiene el resultado que se presenta en la **Figura 5.6**, donde se presenta una predominancia de cultivos herbáceos plantados y misceláneos de superficies plantadas.

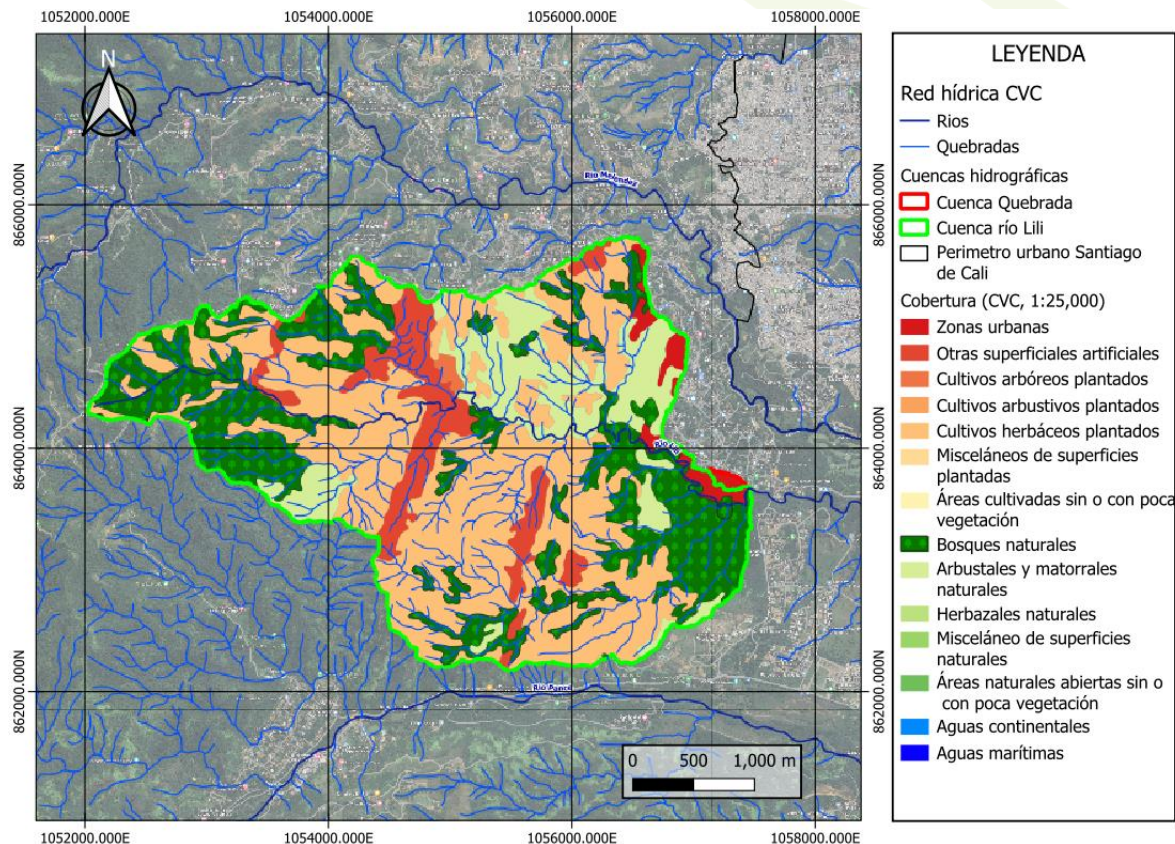


Figura 5.6 Cobertura de las cuencas río Lili y quebrada

Fuente: Elaboración propia

Considerando el suelo de la cuenca como un suelo tipo B, según los criterios de V.T. Chow en Hidrología Aplicada, el cual considera un potencial de escorrentía moderadamente bajo, se realiza el cálculo del número de curva CN a partir de los valores de la **Tabla 5.6**

Tabla 5.6 Número de curva para condición de humedad antecedente tipo II (promedio)

Cobertura AMC II - Suelo tipo B		
Suelo Tipo B: Moderadamente bajo potencial de escorrentía		
Antecedente de humedad II: Precipitación Acum. = 36.1 - 52.5 mm		
Descripción	Código	CN
Zonas urbanizadas	11	90
Zonas industriales o comerciales	12	90
Zonas de extracción minera y escombreras	13	86
Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	14	84
Cultivos anuales o transitorios	21	71
Cultivos permanentes	22	70
Pastos	23	66
Áreas agrícolas heterogéneas	24	57
Áreas cultivadas sin o con poca vegetación	25	64
Bosques naturales	31	66
Arbustales y matorrales naturales	32	55
Herbazales naturales	33	52
Misceláneo de superficies naturales	34	55
Áreas naturales abiertas sin o con poca vegetación	35	58
Áreas húmedas continentales	41	45
Áreas húmedas costeras	42	45
Aguas continentales	51	40
Aguas marítimas	52	40

Realizando la el geoproceto de intersección de la capa de la cuenca y tomando como capa de entrada la cobertura y uso del suelo de la CVC, se obtiene una capa resultante de cobertura de la cuenca, para la cual se desarrolla el análisis de campos determinando así el área correspondiente a cada categoría de nivel 2. A través del cálculo del promedio ponderado de valores de CN, con respecto a su respectiva área, se obtiene un resultado de CN igual a 67.30 para el río Lili y un CN igual a 90 para la quebrada ya que se encuentra en su totalidad en una zona urbanizada.

5.2.4 Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencias mediante funciones de distribución de probabilidad permite aproximar el comportamiento de fenómenos naturales, tales como la lluvia o caudales,

mediante un modelo probabilístico. Con estas funciones se puede aproximar un valor (lluvia o caudal, por ejemplo) asociado a la probabilidad ocurrencia, la cual depende directamente del periodo de retorno.

En el análisis de frecuencias se procede a estudiar las precipitaciones registradas por las estaciones con registros de precipitaciones identificadas de la red climatológica de la CVC que influyen en ambas cuencas. A partir de esta serie se construye el diagrama de cajas y bigotes de las estaciones estudiadas.

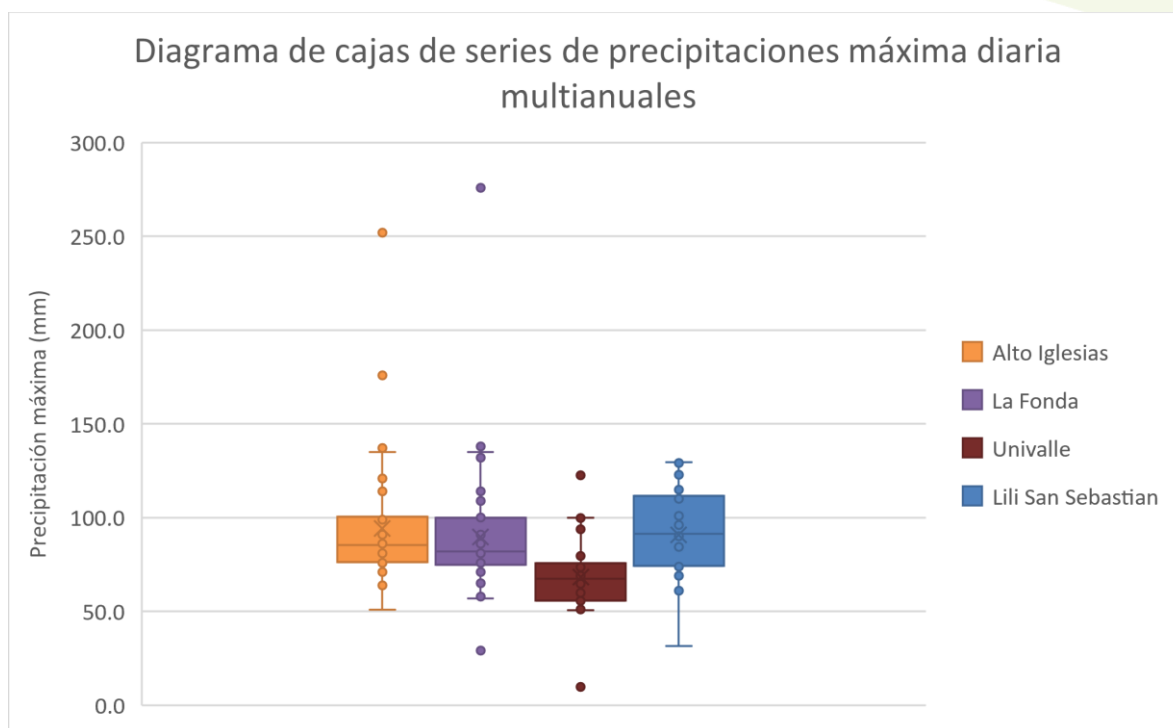


Figura 5.7. Diagrama de cajas y bigotes de precipitación máxima diaria de estaciones de interés

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 5.7**, se puede observar que las estaciones se encuentran en el mismo rango de precipitación máxima de lluvia intercuantil, con rangos de valores de 50.0 a 137.0 mm de lluvia. Aunque se presentan varios datos atípicos inferiores y superiores, se decide conservar la totalidad de los datos atípicos superiores y descartar los atípicos inferiores, que corresponden a los datos de la estación La Fonda del año 1964 (29.0

mm), estación Lili San Sebastián año 2024 (31.6 mm) y estación Universidad del Valle año 2016 (9.8 mm), dado que esto permite obtener resultados más conservadores, evitando el subdimensionamiento de las precipitaciones asociadas a los diferentes periodos de retorno.

Se ingresan las series al software *Easyfit*, con el análisis probabilístico ejecutado en el software, se presenta las gráficas de la función de distribución acumulativa para las diferentes series y funciones empleadas. Acompañando cada una de las gráficas, se presentan las proyecciones del ajuste para los diferentes periodos de retorno y sus respectivas pruebas de bondad. En los anexos se entrega el archivo ejecutable de Easyfit para cada serie y en PDF se encuentran los resultados antes presentados más la gráfica de ajuste Q-Q Plot.

En la **Tabla 5.7**, se presenta el resumen del análisis probabilístico ejecutado en el software *Easyfit*, para las estaciones estudiadas. En este resumen de resultados, se presentan las respectivas precipitaciones máximas asociadas a cada periodo de retorno y su función correspondiente para la cual se obtiene el mejor ajuste.

Tabla 5.7. Resumen análisis probabilístico para las estaciones estudiadas

Estación	Precipitación máxima diaria (mm)								FDP
	Tr003	Tr005	Tr010	Tr020	Tr025	Tr030	Tr050	Tr0100	
Alto Iglesias	95.96	110.61	132.89	158.23	167.15	179.27	197.60	232.75	Log-Normal
La Fonda	94.00	106.19	123.32	141.26	147.25	155.15	166.65	187.33	Log-Normal
Lili - San Sebastian	100.04	109.42	120.83	131.24	134.46	138.53	144.14	153.50	Log-Normal
Univalle	74.75	82.28	91.94	101.21	104.15	107.92	113.20	122.19	Gumbel

5.2.5 Distribución espacial de las precipitaciones

Teniendo en cuenta que generalmente las medidas de precipitación en los pluviómetros y pluviógrafos de las diferentes estaciones sufren variaciones, es preciso buscar una manera de calcular la lluvia media en una zona, con el fin de obtener un valor representativo de precipitación para la cuenca en función de las diferentes estaciones que influyen en la misma. De este modo, se trabajó con el método de los Polígonos de

Thiessen, también conocido como Polígonos de Voronoi, el cual consiste en delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos (localización de estaciones).

En la figura a continuación, se ilustra el área de influencia de cada estación en la cuenca del río Lili y quebrada, por otro lado, en la **Tabla 5.8** se observan los porcentajes de influencia de las estaciones en la cuenca del río Lili junto con la precipitación máxima para los diferentes periodos de retorno evaluados, cabe aclarar que las precipitaciones máximas de la estación Universidad del Valle influyen en el 100% de la cuenca de la quebrada.

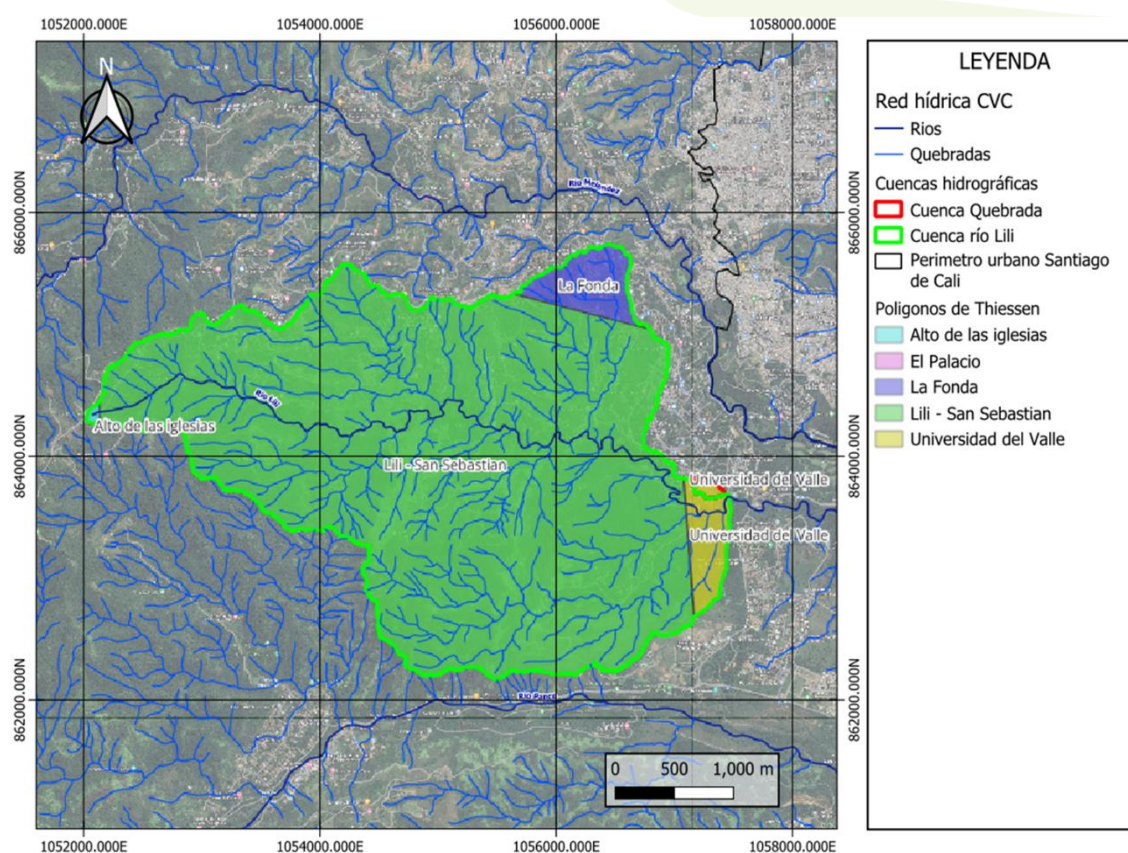


Figura 5.8. Mapa de polígonos de Thiessen

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.8. Polígonos de Thiessen, áreas de influencia y precipitaciones máximas

Cuenca río Lili					
Estación	Alto de las Iglesias	Lili - San Sebastian	La Fonda	Universidad del Valle	TOTAL
Area (km ²)	0.02	10.67	0.38	0.30	11.36
Ai/A	0%	94%	3%	3%	100%
Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima en 24 horas (mm)				P _{max} (mm)
10	132.9	120.8	123.3	91.9	120.2
30	179.3	138.5	155.2	107.9	138.3
100	232.8	153.5	187.3	122.2	153.9

5.2.6 Hietogramas de diseño

Aplicando la metodología de los bloques alternos, se opta por distribuir la lluvia a lo largo de 6 horas o 360 minutos; pues se trata de una duración de lluvia representativa en el suroccidente colombiano según la experiencia del consultor, adicionalmente es el tiempo que emplea el INVIAS en el manual de drenaje para carreteras. Se realiza este análisis para los diferentes periodos de retorno estudiados en las dos cuencas de estudio.

A continuación, se presentan los hietogramas de diseño utilizados para la cuenca del río Lili y quebrada aledaña.

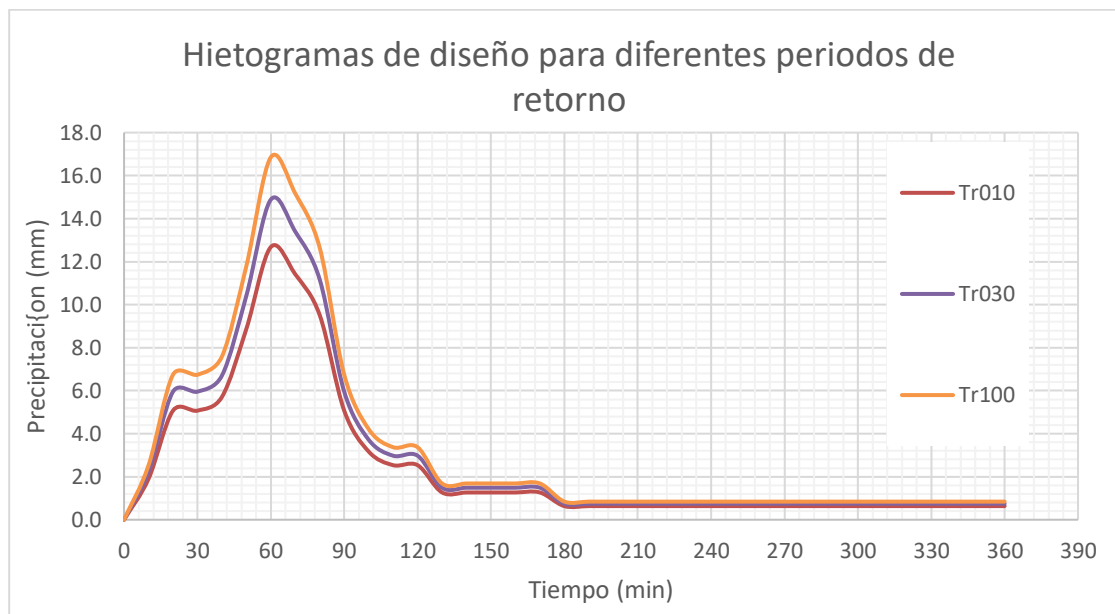


Figura 5.9 Hietograma de diseño cuenca de quebrada

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los valores tabulares en la tabla a continuación.

Tabla 5.9 Hietogramas de diseño (resultados tabulares) para quebrada

Hietograma de Diseño para diferentes periodos de retorno estación UNIVALLE			
Tiempo (min)	10	30	100
0	0.0	0.0	0.0
10	1.9	2.2	2.5
20	5.1	6.0	6.7
30	5.1	6.0	6.7
40	5.7	6.7	7.6
50	8.9	10.4	11.8
60	12.7	14.9	16.9
70	11.4	13.4	15.2
80	9.5	11.2	12.6
90	5.1	6.0	6.7
100	3.2	3.7	4.2
110	2.5	3.0	3.4
120	2.5	3.0	3.4



Hietograma de Diseño para diferentes periodos de retorno estación UNIVALLE			
130	1.3	1.5	1.7
140	1.3	1.5	1.7
150	1.3	1.5	1.7
160	1.3	1.5	1.7
170	1.3	1.5	1.7
180	0.6	0.7	0.8
190	0.6	0.7	0.8
200	0.6	0.7	0.8
210	0.6	0.7	0.8
220	0.6	0.7	0.8
230	0.6	0.7	0.8
240	0.6	0.7	0.8
250	0.6	0.7	0.8
260	0.6	0.7	0.8
270	0.6	0.7	0.8
280	0.6	0.7	0.8
290	0.6	0.7	0.8
300	0.6	0.7	0.8
310	0.6	0.7	0.8
320	0.6	0.7	0.8
330	0.6	0.7	0.8
340	0.6	0.7	0.8
350	0.6	0.7	0.8
360	0.6	0.7	0.8

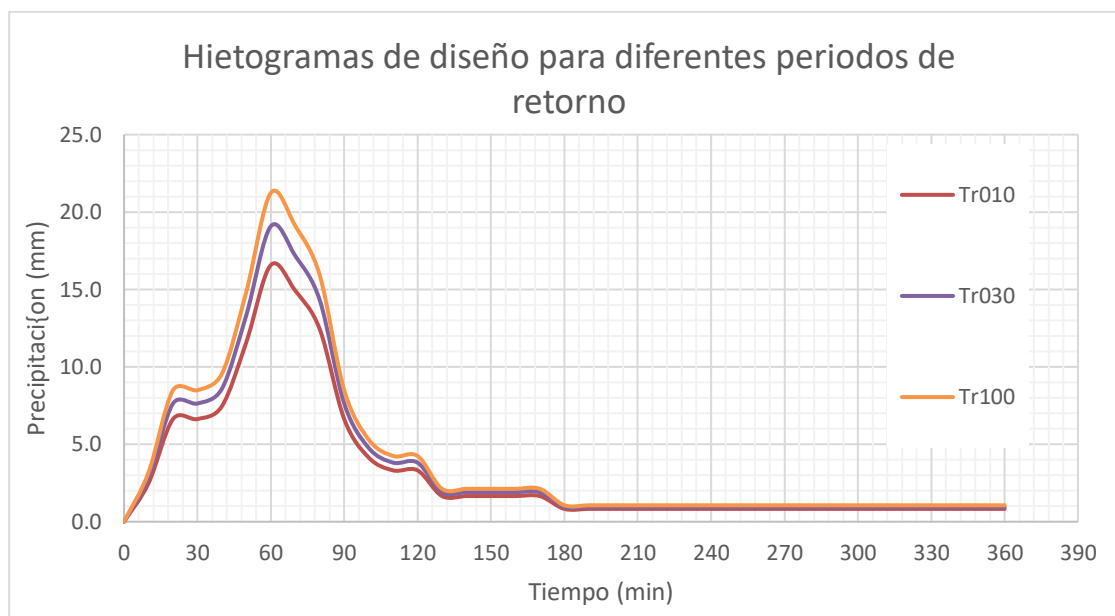


Figura 5.10 Hietograma de diseño cuenca del río Lili

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los valores tabulares en la tabla a continuación.

Tabla 5.10 Hietogramas de diseño (resultados tabulares) para río Lili

Hietograma de Diseño para diferentes periodos de retorno cuenca río Lili			
Tiempo (min)			
	10	30	100
0	0.0	0.0	0.0
10	2.5	2.9	3.2
20	6.6	7.6	8.5
30	6.6	7.6	8.5
40	7.5	8.6	9.6
50	11.6	13.4	14.9
60	16.6	19.1	21.2
70	14.9	17.2	19.1
80	12.4	14.3	15.9
90	6.6	7.6	8.5
100	4.1	4.8	5.3
110	3.3	3.8	4.2

Hietograma de Diseño para diferentes periodos de retorno cuenca río Lili			
Tiempo (min)			
	10	30	100
120	3.3	3.8	4.2
130	1.7	1.9	2.1
140	1.7	1.9	2.1
150	1.7	1.9	2.1
160	1.7	1.9	2.1
170	1.7	1.9	2.1
180	0.8	1.0	1.1
190	0.8	1.0	1.1
200	0.8	1.0	1.1
210	0.8	1.0	1.1
220	0.8	1.0	1.1
230	0.8	1.0	1.1
240	0.8	1.0	1.1
250	0.8	1.0	1.1
260	0.8	1.0	1.1
270	0.8	1.0	1.1
280	0.8	1.0	1.1
290	0.8	1.0	1.1
300	0.8	1.0	1.1
310	0.8	1.0	1.1
320	0.8	1.0	1.1
330	0.8	1.0	1.1
340	0.8	1.0	1.1
350	0.8	1.0	1.1
360	0.8	1.0	1.1

5.2.7 Hidrogramas de crecientes HEC-HMS

Se realiza la modelación hidrológica de las cuencas del río Lili y quebrada empleando el software HEC-HMS v4.9, a través del método del hidrograma unitario del SCS-CN. En la figura siguiente se presenta el esquema del modelo ingresado al software HEC-HMS para la modelación hidrológica.

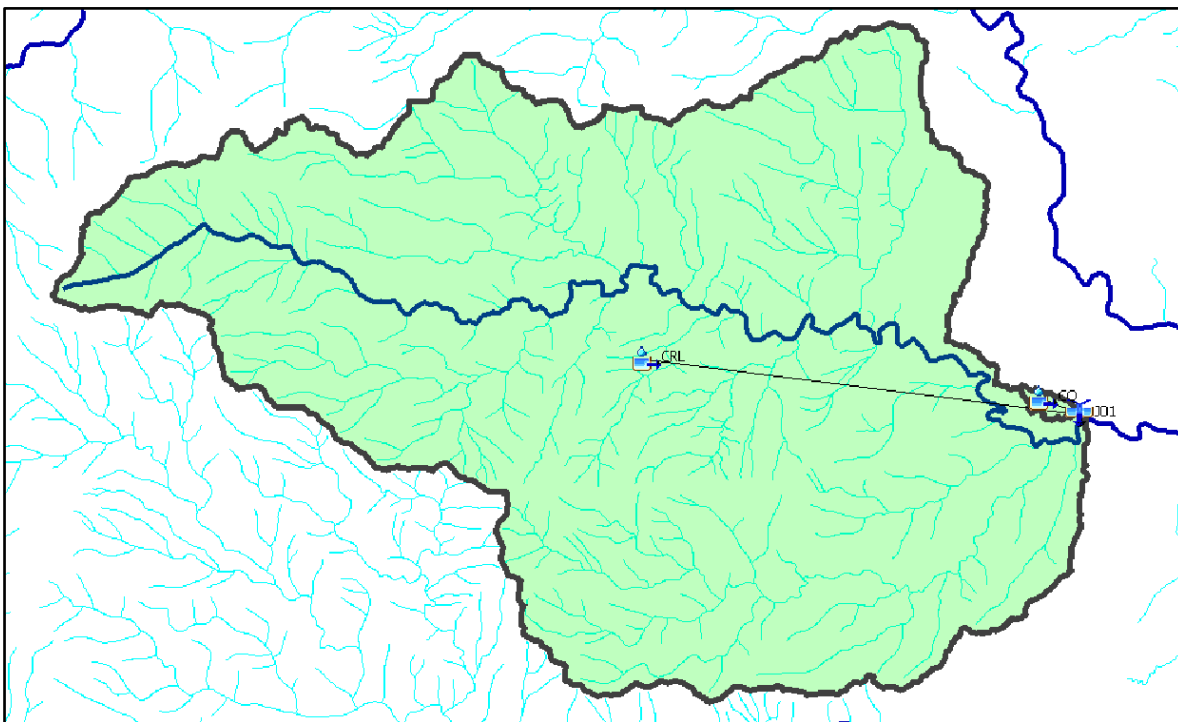


**Figura 5.11 Esquema para modelación de crecientes máximas en HEC-HMS Cuencas
Río Lili y quebrada**

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 5.11**, se presenta el esquema topológico para la modelación de crecientes máximas en el software HEC-HMS, ingreso en el modelo. Se ingresan los hietogramas de diseño asociados a cada periodo de retorno y cada cuenca.

Una vez se corre el modelo, se obtienen los hidrogramas de crecientes para diferentes periodos de retorno. Se presentan los hidrogramas y caudales máximos para las cuencas de estudio. A continuación, se presenta el hidrograma obtenido para el río Lili y quebrada con punto de cierre a la zona del proyecto.

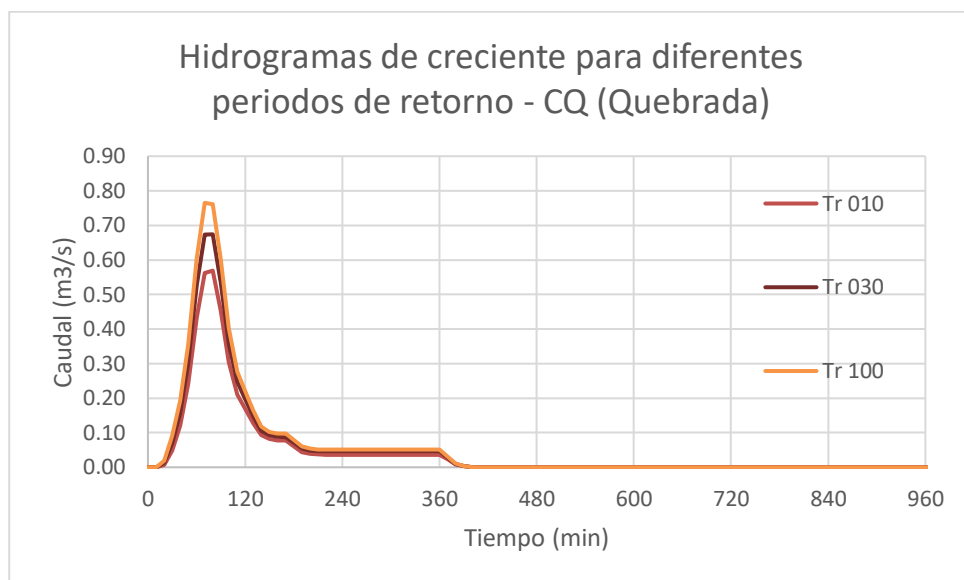


Figura 5.12. Hidrogramas de crecientes para diferentes periodos de retorno en la cuenca de quebrada.

Fuente: Elaboración propia

Los caudales máximos de cada uno de los hidrogramas asociados a cada periodo de retorno evaluado en el presente estudio se reportan en la tabla a continuación. En anexo se entrega el modelo HEC-HMS.

Tabla 5.11. Caudales máximos de crecientes cuenca de quebrada

Caudales máximos de crecientes cuenca CQ (Quebrada) modelación HEC-HMS			
Tr [años]	10	30	100
Q Max [m³/s]	0.57	0.67	0.77

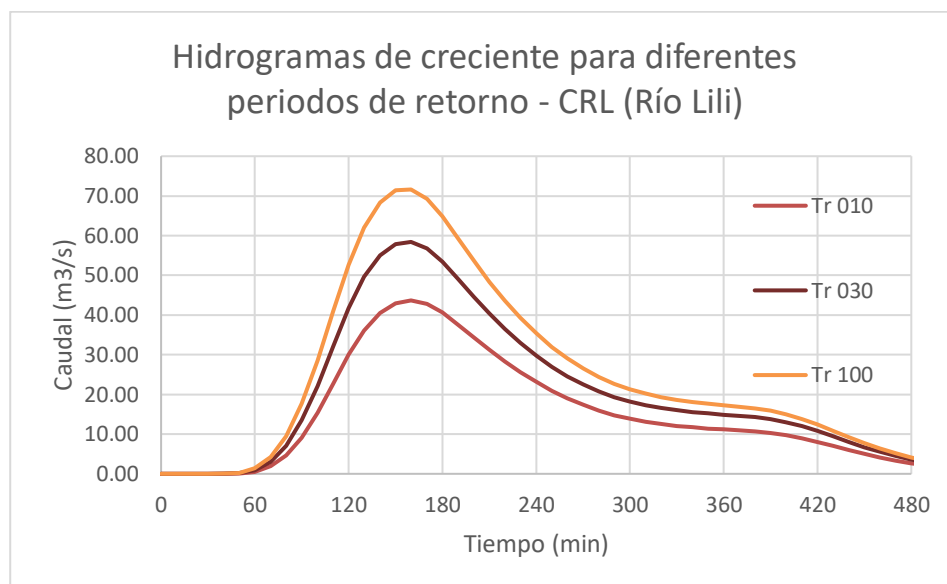


Figura 5.13. Hidrogramas de crecientes para diferentes periodos de retorno en la cuenca de río Lili

Fuente: Elaboración propia

Los caudales máximos de cada uno de los hidrogramas asociados a cada periodo de retorno evaluado en el presente estudio se reportan en la tabla a continuación para el Río Lili. En anexo se entrega el modelo HEC-HMS.

Tabla 5.12. Caudales máximos de crecientes cuenca río Lili

Caudales máximos de crecientes cuenca CRL (Río Lili) modelación HEC-HMS			
Tr [años]	10	30	100
Q Max [m³/s]	43.68	58.42	71.62

5.3 Conclusiones

- En el estudio hidrológico se determina el trazado de las cuencas del río Lili y la quebrada aledaña, a partir de la de la red hídrica del Geovisor del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (CVC), y el modelo de elevación digital con una precisión de 12.50 m (Satélite ALOS PALSAR).

- Se realiza el estudio hidrológico empleando el modelo de lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos con el número de curva (SCS-CN).
- Se obtiene caudales de diseño por los métodos del número de curva (SCS-CN), a través de la modelación hidrológica en HEC-HMS, para las cuencas del Río Lili y quebrada con punto de cierre en la obra de interés (muro). El resumen de los resultados se presenta en la **Tabla 5.13 y Tabla 5.14**.

Tabla 5.13. Caudales máximos de crecientes cuenca Río Lili

Caudales máximos de crecientes cuenca CRL (Río Lili) modelación HEC-HMS			
Tr [años]	10	30	100
Q Max [m ³ /s]	43.68	58.42	71.62

Tabla 5.14. Caudales máximos de crecientes cuenca de quebrada

Caudales máximos de crecientes cuenca CQ (Quebrada) modelación HEC-HMS			
Tr [años]	10	30	100
Q Max [m ³ /s]	0.57	0.67	0.77

6 ESTUDIO HIDRÁULICO

6.1 Introducción

El presente reporte tiene como objetivo principal efectuar el análisis hidráulico de las crecientes del río Lili y quebrada.

El análisis se realizó a través de la implementación del modelo hidrodinámico unidimensional *HEC-RAS* versión 6.4.1, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica perteneciente al Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

6.2 Objetivos

- Identificar, recopilar y procesar la información cartográfica base existente para la zona de estudio Río Lili y quebrada aledaña.
- Realizar la modelación unidimensional en *HEC-RAS* de los tramos de estudio para la condición existente y proyecto, según sea requerido.
- Evaluar la condición hidráulica de la zona de estudio.
- Proponer cota de coronación de muro sobre la margen izquierda río Lili.

6.3 Metodología

La identificación de sitios donde puede ocurrir movilidad lateral, desbordamientos y las áreas afectadas por los mismos, es fundamental para la construcción de los planes y proyectos de defensa marginal a las inundaciones, así como se vuelve de entera importancia el poder determinar las cotas para la seguridad del tránsito sobre puentes y/o Boxculverts que atraviesen cauces.

Se busca identificar y realizar este ejercicio a través de la implementación del modelo hidrodinámico *HEC-RAS* bajo la condición de flujo permanente, debido a que es más conservadora que la condición de flujo no permanente; para lo cual se recopiló, levantó en campo, procesó y analizó la siguiente información:

Ing. Civil Msc Rafael Clement Oliveros

- Topografía y batimetría de detalle.
- Resultado de los caudales según hidrología.
- Condiciones de frontera para la modelación en flujo normal.
- Modelo de elevación digital detallado de la zona de estudio.

6.3.1 Geometría del modelo (condición existente)

Para aplicar el modelo fue necesario construir el esquema básico o la caracterización geométrica del cauce, la cual se definió a través de modelo de elevación digital (DEM) como dato de entrada.

En el modelo se define las condiciones de rugosidad y otras condiciones hidráulicas que afectan directamente el comportamiento del flujo.

Cada una de las secciones se caracterizó con información de la rugosidad y los coeficientes de contracción y expansión, que son los principales parámetros hidráulicos que influyen directamente en el comportamiento del flujo.

6.3.2 Flujo y condiciones de frontera o contorno

El comportamiento hidráulico del muro se determinó para la condición de flujo permanente, simulando un régimen de flujo mixto dado que se presentan variaciones de pendiente a lo largo del tramo a modelar, utilizando la profundidad crítica como frontera o condición de contorno aguas abajo y aguas arriba.

Para la condición de frontera superior, se introdujeron los caudales teniendo en cuenta el estudio realizado con información digital del terreno y con los caudales cálculos anteriormente.

El procedimiento iterativo empleado por el modelo para calcular el perfil hidráulico o de la superficie libre del agua se basa en la solución de la ecuación de la energía en una

dimensión a través del Método del Paso Estándar. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción (Manning) y contracción /expansión. La ecuación de Momentum se emplea en situaciones donde el perfil de la superficie de agua varía súbitamente. Estas situaciones incluyen cálculos en régimen combinado (por ejemplo, el salto hidráulico), hidráulica de puentes y confluencia de ríos.

6.3.3 Rugosidad de Manning

Según Ven Te Chow (1983) muestra que, para lechos con vegetación, se recomienda usar coeficientes de Manning entre 0.020 y 0.035 como se muestra en las siguientes dos imágenes:

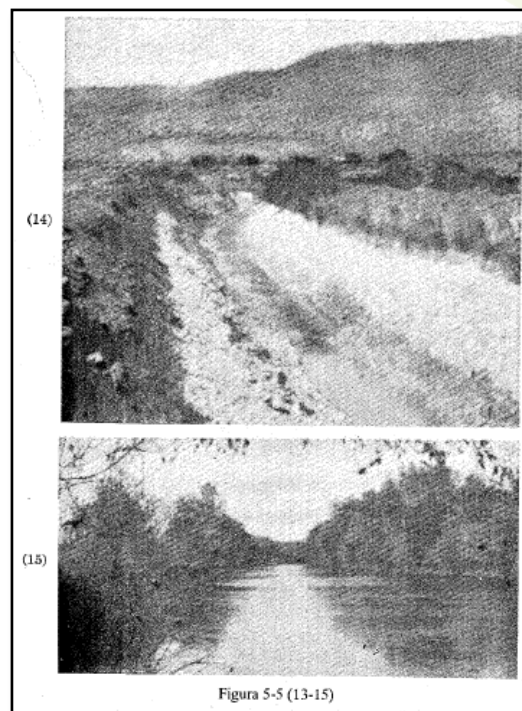


Figura 6.1 Imágenes de referencia para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning.

Fuente: CHOW V.T., *Hidráulica de canales*, p. 118

Para la determinación del coeficiente de Manning del cauce del río Lili y quebrada, se adoptó el método de Cowan en el cual el coeficiente de Manning se calcula bajo la sumatoria de diferentes factores que inciden en la rugosidad, los cuales se muestran en la **Tabla 6.1**:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_5)m_5$$

Tabla 6.1 Consideraciones para cálculo de coeficiente de Manning según el método de Cowan.

Condiciones del canal		Valores		Valores para río Lili y quebrada
Material involucrado	Tierra	n ₀	0.020	0.020
	Corte en roca		0.025	
	Grava fina		0.024	
	Grava gruesa		0.028	
Grado de irregularidad	Suave	n ₁	0.000	0.002
	Menor		0.005	
	Moderado		0.010	
	Severo		0.020	
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n ₂	0.000	0.003
	Ocasionalmente alternante		0.005	
	Frecuentemente alternante		0.010 - 0.015	
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n ₃	0.000	0.003
	Menor		0.010 - 0.015	
	Apreciable		0.020 - 0.030	
	Severo		0.040-0.060	
Vegetación	Baja	n ₄	0.005 - 0.010	0.007
	Media		0.010 - 0.025	

Condiciones del canal		Valores		Valores para río Lili y quebrada
	Alta		0.025 - 0.050	
	Muy alta		0.050 - 0.100	
Grado de los efectos por meandros	Menor	m ₅	1.000	1.000
	Apreciable		1.150	
	Severo		1.300	
			n=	0.035

El resultado de la rugosidad de Manning a emplear es de 0.035 para el fondo del cauce, lo cual consideran diferentes posibles factores que afecten la capacidad de flujo del cauce. En las márgenes se considera un incremento de rugosidad, con un valor de 0.045. De acuerdo con las características del río de estudio, se adoptaron los coeficientes de rugosidad de Manning que se resumen en la **Tabla 6.2**.

Tabla 6.2 Coeficientes de rugosidad de diseño para río Lili y quebrada

CONSIDERACIONES	MANNING FONDO	MANNING MÁRGENES
Canal en tierra con presencia moderada de vegetación en el cauce e incremento de vegetación en las márgenes	0.035	0.045

Se consideran los coeficientes de contracción y expansión para la modelación hidráulica, y se deben determinar en función de los cambios de sección que se dan en el tramo o subtramos de estudio. A través de estos coeficientes se define la brusquedad en la transición entre dos secciones consecutivas según su morfología. Para flujo subcrítico la Referencia Manual de usuario del *software HEC-RAS v.6.2* recomienda los siguientes valores: cero para un canal de sección constante tanto para el coeficiente de expansión como para el de contracción, pasando a ser 0.5 para el primero y 0.3 para el segundo al pasar por un puente y de 0.3 y 0.1 cuando hay un cambio gradual de sección. Para flujo supercrítico el manual recomienda reducir los coeficientes de expansión y contracción,

siendo por ejemplo un valor de 0.05 para el coeficiente de contracción y 0.2 para el coeficiente de expansión, cuando se presenta un cambio gradual de sección. En este caso se utilizará los valores de 0.3 y 0.1 con un cambio gradual de sección.

6.3.4 Escenarios de modelación

Se simuló un escenario para la condición existente para el río Lili y quebrada analizando los periodos de retorno de 1 vez en 30 años. Con base en los resultados se modeló una condición proyecto proponiendo una cota de coronación del muro ubicado del lado izquierdo del sentido de flujo del río Lili dejando un borde libre de 0.50 m.

Dado que no se dispone de información registrada de caudales, niveles y velocidades a lo largo del tramo modelado, no fue posible realizar una calibración del modelo, por lo cual la modelación se realizó adoptando valores de los parámetros a partir de las recomendaciones efectuadas en la literatura técnica y de las características de la zona de estudio.

6.4 Modelación HEC-RAS condición existente (1D)

Esta primera parte del estudio tiene como objetivo principal efectuar los análisis hidráulicos del río Lili y quebrada para los periodos de retorno de 1 vez en 30 años.

6.4.1 Geometría del modelo

En la **Figura 6.2** se muestra el tramo del río Lili y quebrada. Se analiza la condición existente para el periodo de retorno mencionado (Tr030).

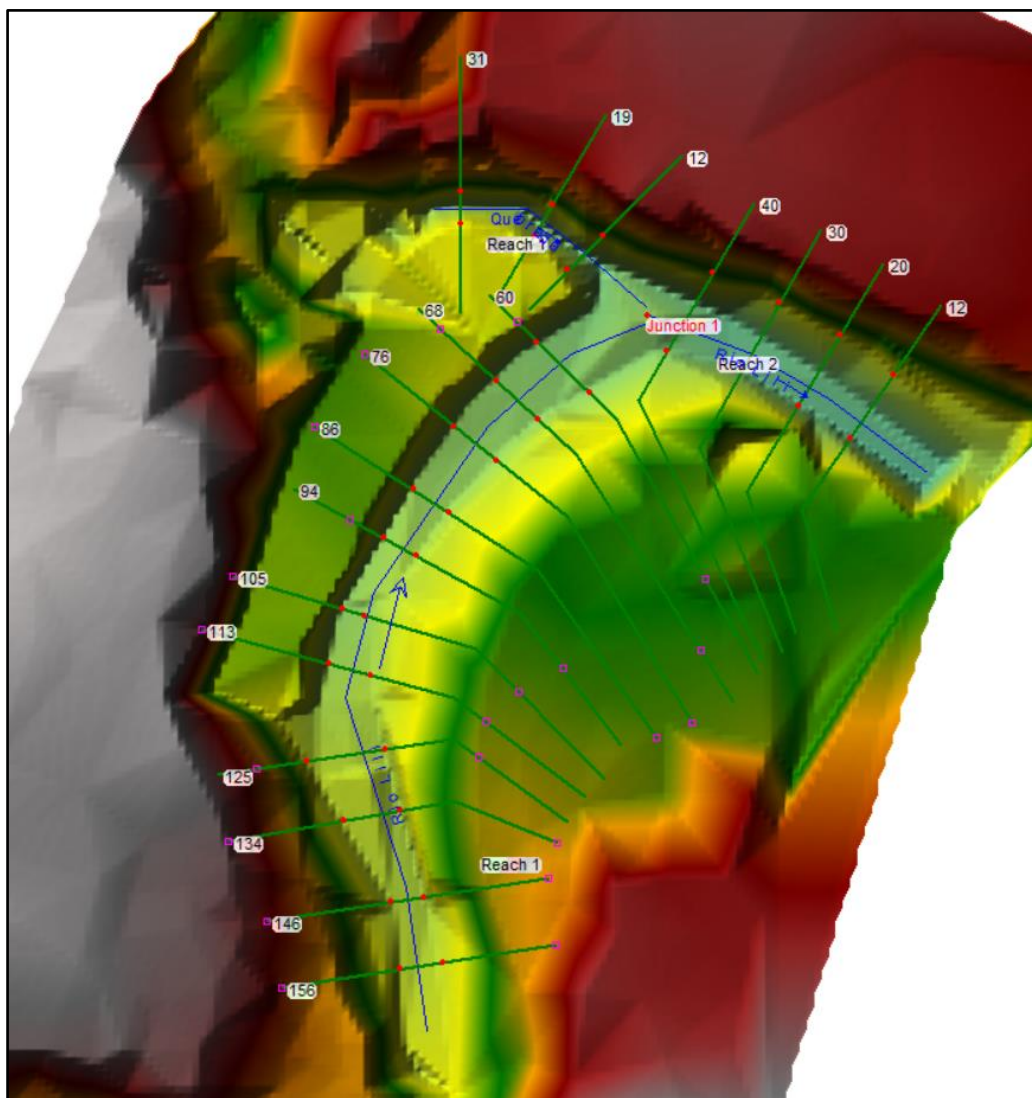


Figura 6.2 Geometría del modelo hidráulico de río Lili y quebrada (condición existente)

Fuente: Elaboración propia

6.4.2 Resultados modelación condición existente (Tr030)

En la **Figura 6.3** se presenta la planta del tramo de estudio, donde se muestra el mapa profundidades en planta para un periodo de retorno de 1 vez en 30 años.

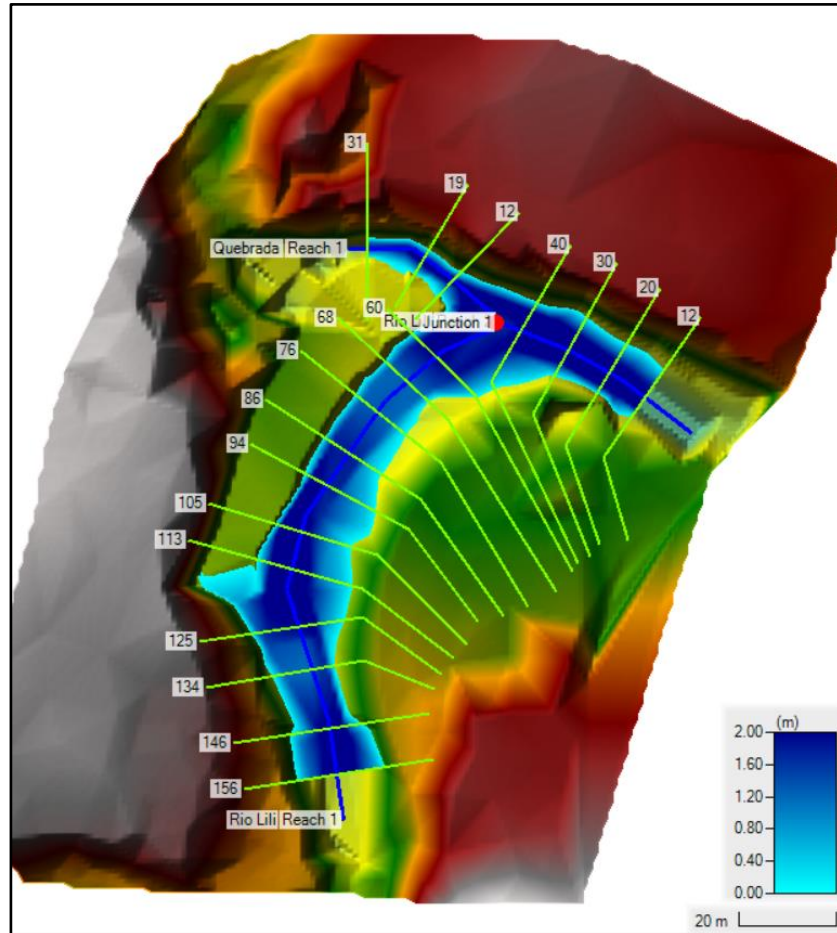


Figura 6.3 Mapa de profundidades en el tramo de estudio Tr030 (condición existente)

Fuente: Elaboración propia

En el mapa de profundidades presentado en la **Figura 6.3** correspondiente al río Lili, es posible observar que las profundidades en el tramo de estudio que oscilan entre 1.29 a 2.53 m de profundidad en el centro del cauce y profundidades menores en las márgenes de este, debido a la misma forma de la sección del tramo. El nivel de agua en las secciones donde se proyecta a futuro la obra (secciones 60 a 105 del río Lili) cuentan con una profundidad promedio de 1.80 m.

En la **Figura 6.4** se presenta la planta del tramo de estudio, donde se muestra el mapa de distribución de velocidades en planta para un periodo de retorno de 1 vez en 30 años.

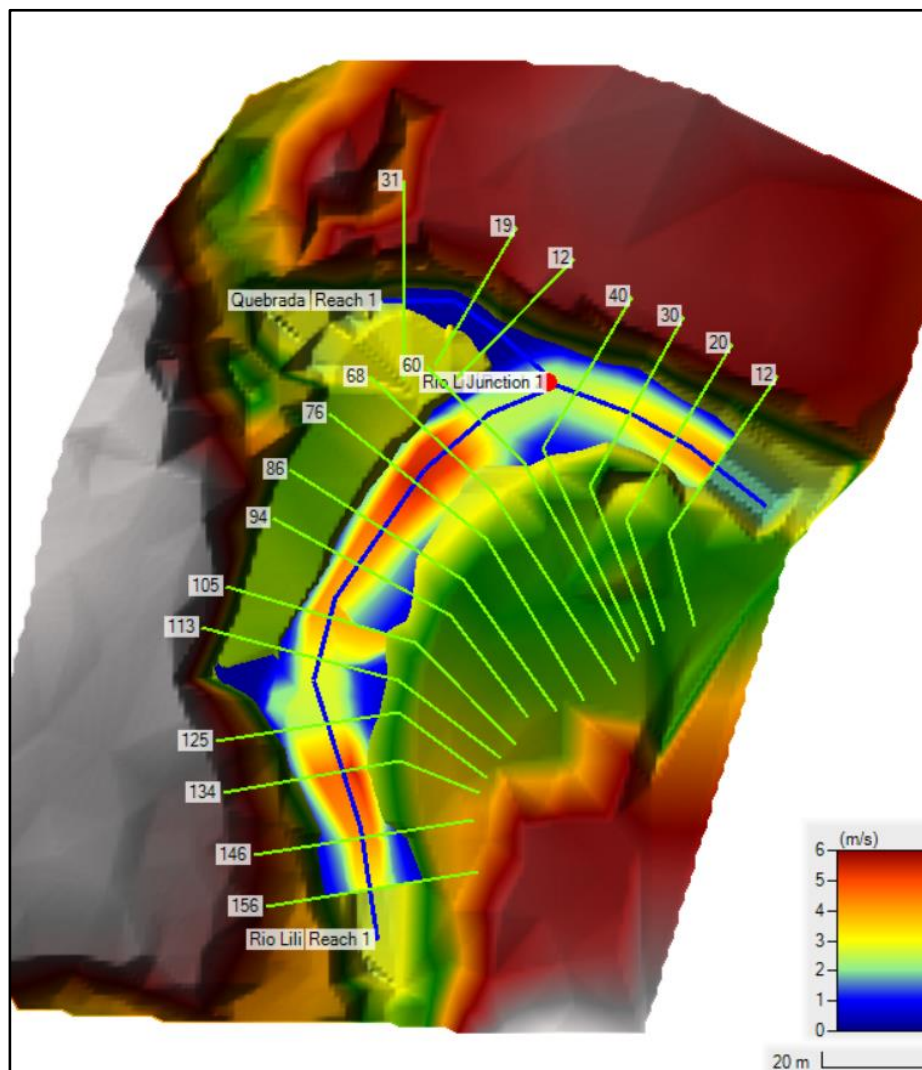


Figura 6.4 Mapa de distribución de velocidades en el tramo de estudio Tr030 (condición existente)

Fuente: Elaboración propia

En el mapa de distribución de velocidades presentado en la **Figura 6.4** correspondiente al tramo de estudio, es posible observar velocidades que oscilan entre 2.58 a 5.53 m/s, además, las velocidades para donde se proyecta el muro (secciones 60 a 105 del río Lili)

se encuentran en promedio con valor de 4.90 m/s, teniendo en cuenta que es una zona curva del río Lili, se pueden presentar fenómenos erosivos por las velocidades que alcanza el agua en esta zona.

Se evalúa el comportamiento hidráulico del río Lili específicamente entre las secciones donde se proyecta la ubicación del muro. En este orden de ideas, se realiza el análisis de las secciones más representativas de este estudio.

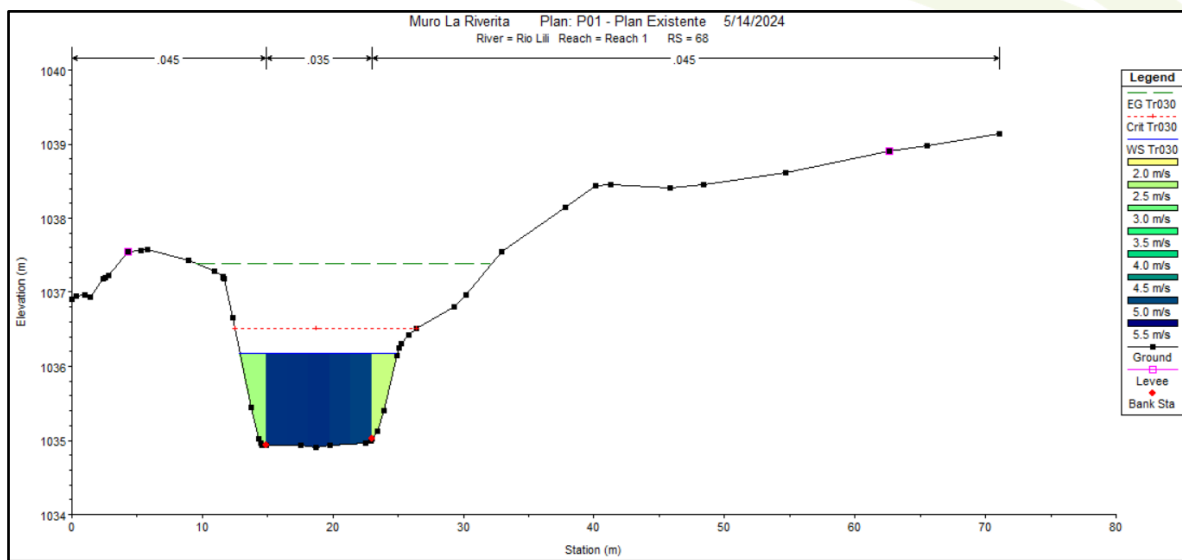


Figura 6.5. Distribución de velocidades en la sección 68 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.5** se observa una cota de lámina de agua de 1036.17 msnm, con una cota de nivel crítico de 1036.51 representando un régimen de flujo supercrítico que implica velocidades altas y una baja profundidad en comparación con el resto de tramo modelado. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 5.18 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 2.38 m/s.

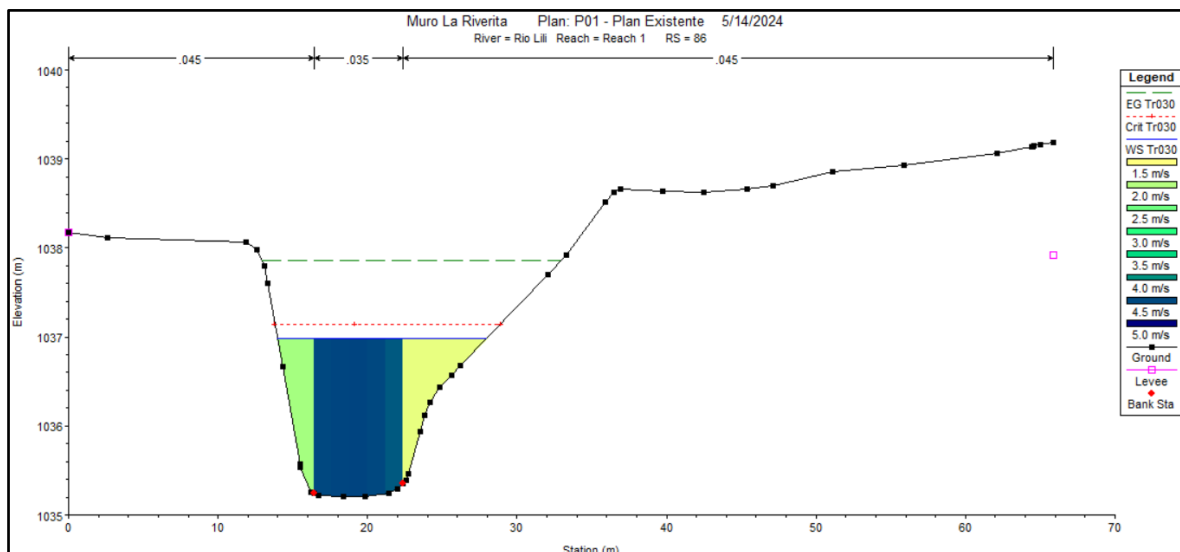


Figura 6.6. Distribución de velocidades en la sección 86 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.6** se observa una cota de lámina de agua de 1036.99 msnm, con una cota de nivel crítico de 1037.15 representando un régimen de flujo supercrítico que implica velocidades altas y una baja profundidad en comparación con el resto de tramo modelado. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 4.53 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 1.66 m/s.

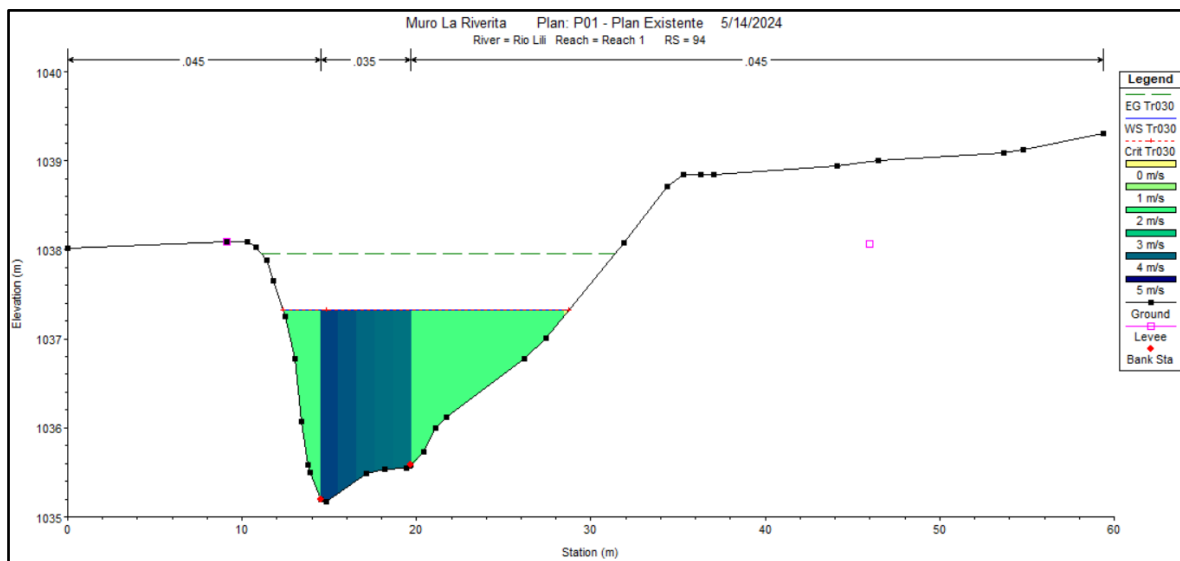


Figura 6.7. Distribución de velocidades en la sección 94 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.7** se observa una cota de lámina de agua de 1037.32 msnm, la cota del nivel crítico se encuentra en la misma cota de lámina de agua, representando un régimen de flujo crítico. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 4.26 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 1.83 m/s.

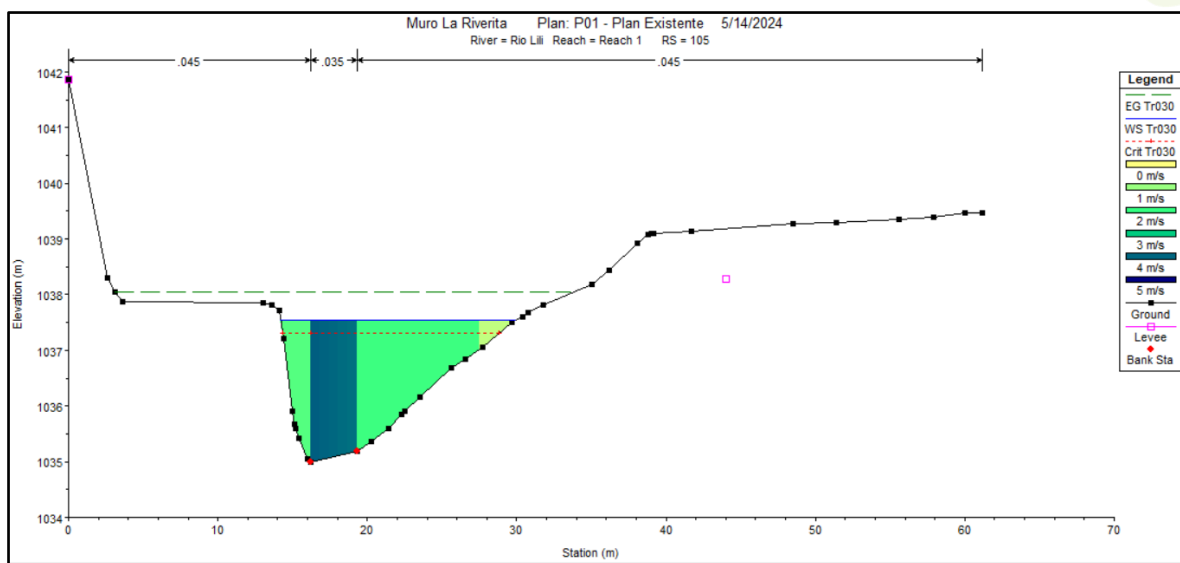


Figura 6.8. Distribución de velocidades en la sección 105 de río Lili- Tr030 (Condición – Existente)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.8** se observa una cota de lámina de agua de 1037.54 msnm, con una cota de nivel crítico de 1037.30 representando un régimen de flujo subcrítico que implica velocidades bajas y una mayor profundidad en comparación con el resto de tramo modelado, analizando el tramo desde la sección 68 hasta la presente, se evidencia entonces un resalto hidráulico producto del cambio de régimen de flujo. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 3.95 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 0.61 m/s.

En la figura a continuación se muestra el perfil hidráulico del río Lili, exponiendo cotas a lo largo del tramo modelado tanto del terreno natural (margen izquierda y derecha) como los niveles de lámina de agua, línea de energía y línea crítica.

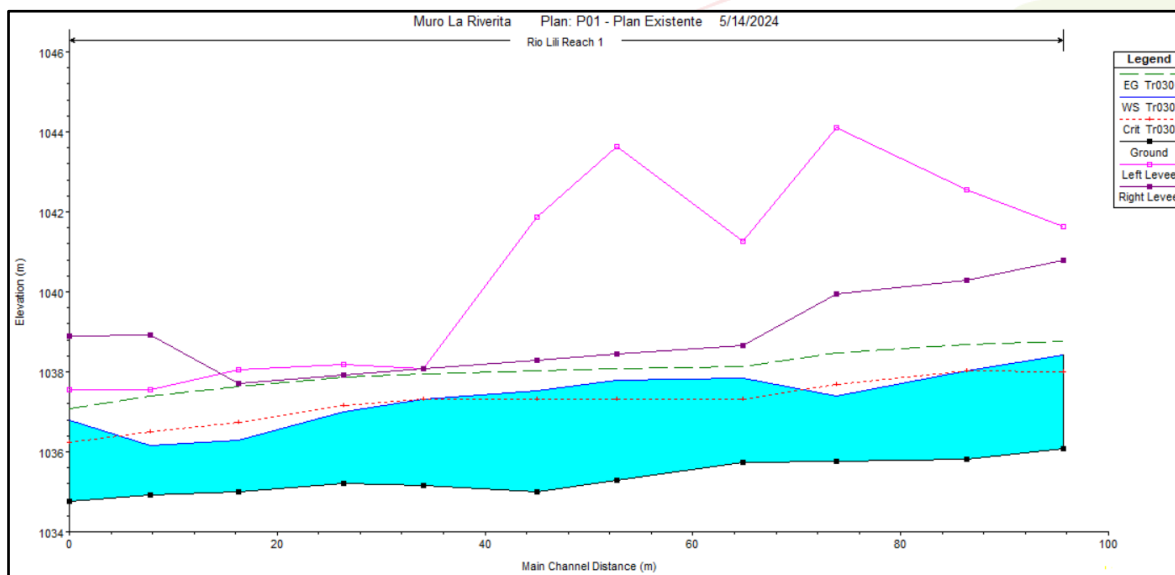


Figura 6.9. Perfil longitudinal del tramo modelado río Lili – Tr030 (condición existente)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura anterior, no se observan desbordamientos a lo largo del tramo modelado del río Lili, se observa un resalto hidráulico en las abscisas 40 y 70 lo que

implica que en algunos tramos el régimen de flujo se encuentra supercrítico y en otro subcrítico.

6.5 Modelación HEC-RAS condición proyecto (1D)

Esta segunda parte del estudio tiene como principal efectuar el análisis hidráulico del río Lili en la condición proyecto. Es importante aclarar que la condición proyecto contempla la incorporación de un muro localizado del lado izquierdo del sentido río Lili y se proponen cotas de corona para el muro de acuerdo con el nivel de lámina de agua para un periodo de retorno de 1 vez en 30 años más un borde libre de 0.5 m.

6.5.1 Geometría del modelo (condición proyecto)

En la **Figura 6.10** se muestra el tramo del río Lili y la quebrada aledaña. Se analiza la condición proyecto para el periodo de retorno mencionado (Tr030) contemplando un muro sobre la margen izquierda del río Lili entre las secciones 60 a 125 aproximadamente.

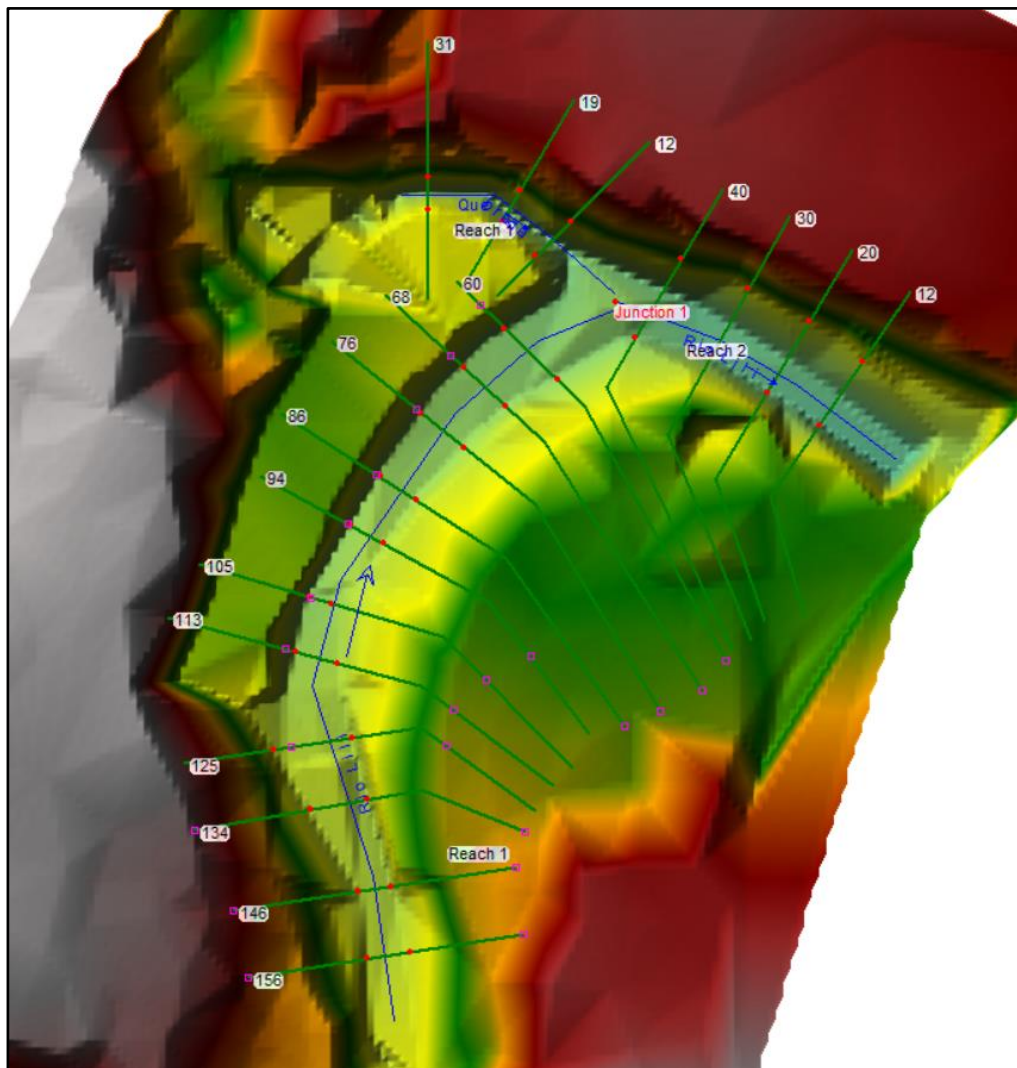


Figura 6.10 Geometría del modelo hidráulico de río Lili y quebrada (condición proyecto)

Fuente: Elaboración propia

Para establecer la cota de corona del muro en la margen izquierda del río Lili, se consideraron los resultados de la modelación existente, teniendo en cuenta las abscisas, la cota de fondo del río y la cota de lámina de agua para el periodo de retorno de estudio (Tr30).

A continuación, se presenta la gráfica de lámina de agua a lo largo del tramo modelado del río Lili, junto con la cota de corona definida para el muro, esta última calculada a

Ing. Civil Msc Rafael Clement Oliveros

partir de la línea de tendencia (que hace referencia a la lámina de agua ajustada), y la lámina de agua, considerando además un borde libre de 0.50 m.

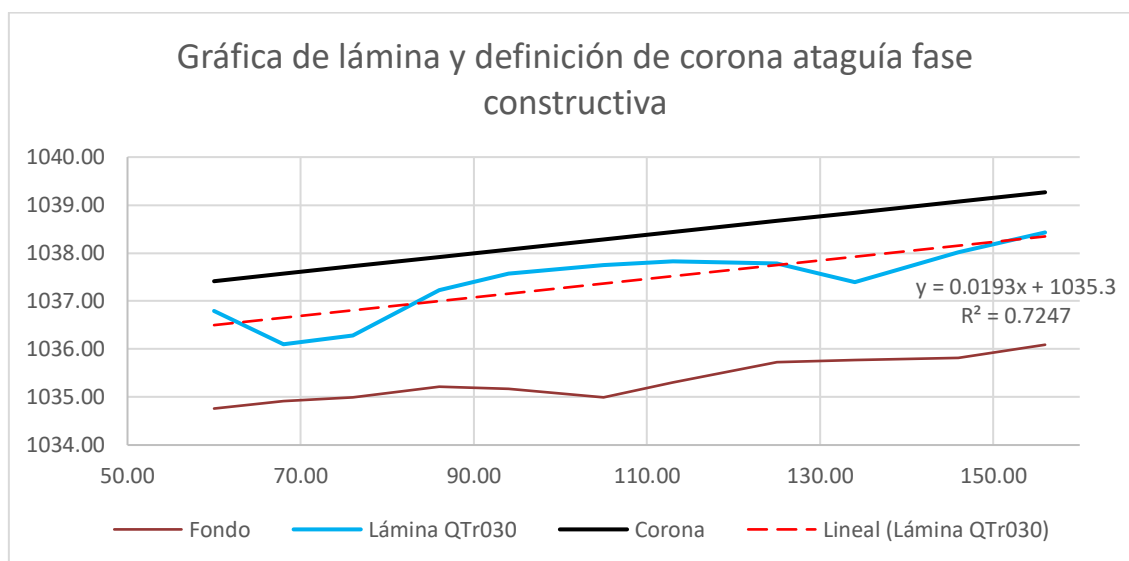


Figura 6.11. Gráfica de lámina y definición de corona de muro
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.3. Resultados tabulares de abscisas y cota de corona de muro para condición proyecto.

Abscisa (m)	Corona muro (msnm)
156.00	1039.27
146.00	1039.07
134.00	1038.84
125.00	1038.67
113.00	1038.44
105.00	1038.28
94.00	1038.07
86.00	1037.92
76.00	1037.72
68.00	1037.57
60.00	1037.41

6.5.2 Resultados modelación condición proyecto (Tr030)

En la **Figura 6.12** se presenta la planta del tramo de estudio, donde se muestra el mapa profundidades en planta para un periodo de retorno de 1 vez en 30 años en su condición proyecto.

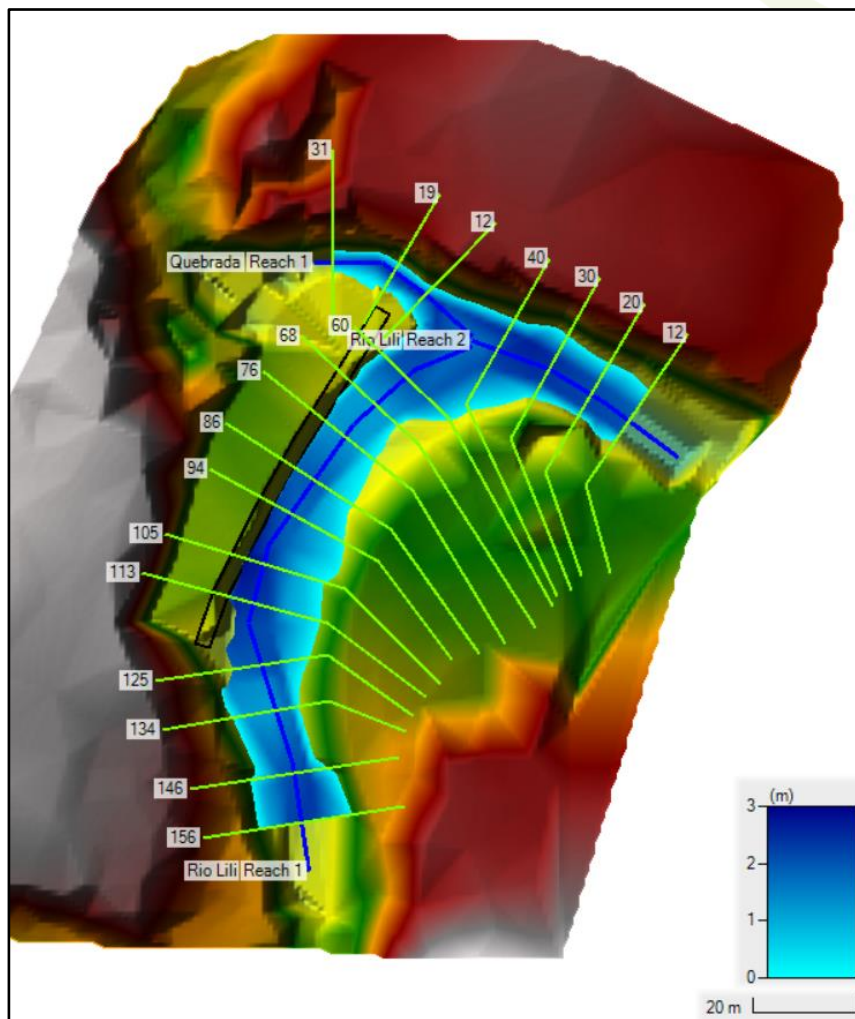


Figura 6.12 Mapa de profundidades en el tramo de estudio Tr030 (condición proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En el mapa de profundidades presentado en la **Figura 6.12** correspondiente al río Lili, es posible observar que las profundidades en el tramo de estudio que oscilan entre 1.34 a 2.55 m de profundidad en el centro del cauce y profundidades menores en las

márgenes de este, debido a la misma forma de la sección del tramo. El nivel de agua en las secciones donde se encuentra el muro proyectado (secciones 60 a 105 del río Lili) cuentan con una profundidad promedio de 1.83 m. Se puede observar que el agua no se desborda en la zona donde se plantea el muro.

En la **Figura 6.13** se presenta la planta del tramo de estudio, donde se muestra el mapa de distribución de velocidades en planta para un periodo de retorno de 1 vez en 30 años.

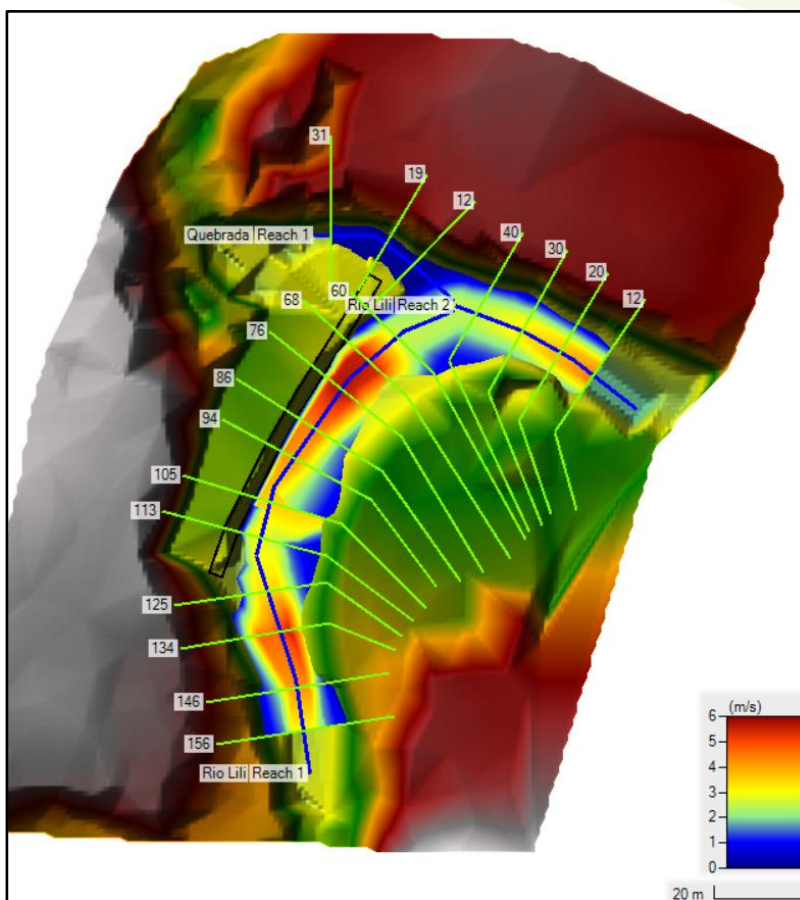


Figura 6.13 Mapa de distribución de velocidades en el tramo de estudio Tr030 (condición proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En el mapa de distribución de velocidades presentado en la **Figura 6.13** correspondiente al tramo de estudio, es posible observar velocidades que oscilan entre 2.71 a 5.61 m/s,

además, las velocidades para donde se proyecta el muro (secciones 60 a 105 del río Lili) se encuentran en promedio con valor de 4.05 m/s.

Se evalúa el comportamiento hidráulico del río Lili específicamente entre las secciones donde se encuentra el muro. En este orden de ideas, se realiza el análisis de las secciones más representativas de este estudio.

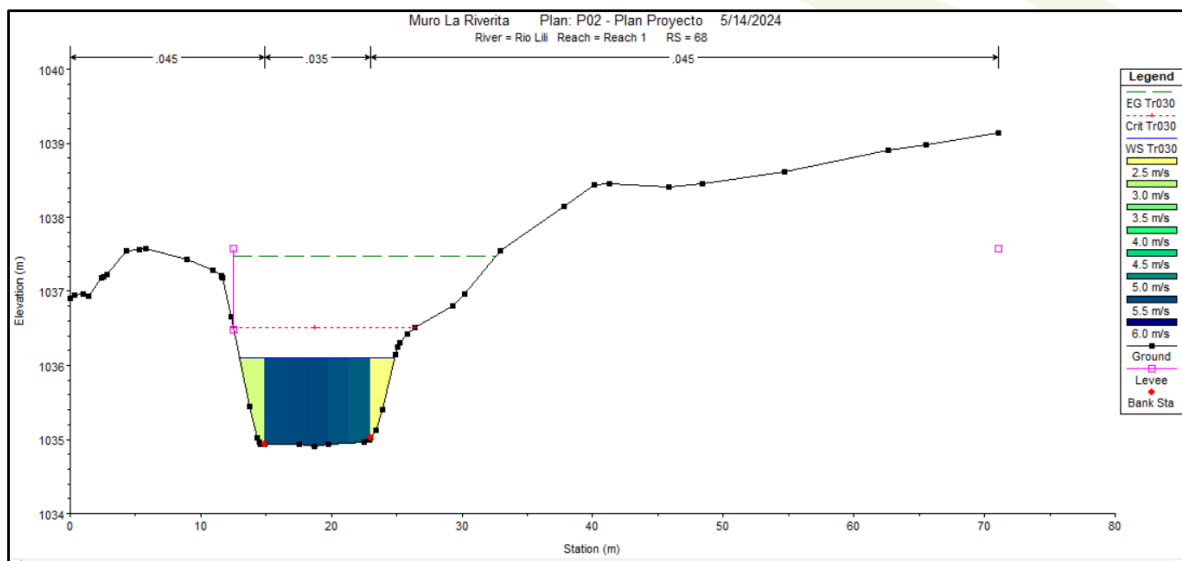


Figura 6.14. Distribución de velocidades en la sección 68 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.14** se observa una cota de lámina de agua de 1036.10 msnm, con una cota de nivel crítico de 1036.51 representando un régimen de flujo supercrítico que implica velocidades altas y una baja profundidad en comparación con el resto de tramo modelado. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 5.51 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 2.54 m/s. En esta sección, el muro proyectado se muestra como un Levee, donde la cota de corona de este se encuentra en la 1037.57 msnm.

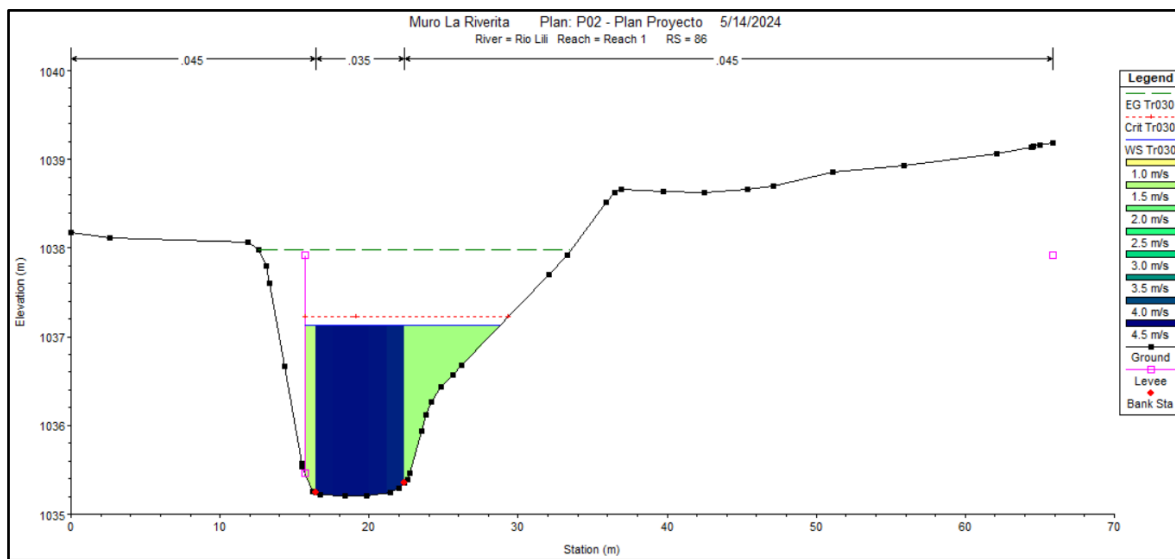


Figura 6.15. Distribución de velocidades en la sección 86 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.15** se observa una cota de lámina de agua de 1037.13 msnm, con una cota de nivel crítico de 1037.22 representando un régimen de flujo supercrítico que implica velocidades altas y una baja profundidad en comparación con el resto de tramo modelado. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 4.37 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 1.62 m/s. En esta sección, el muro proyectado se muestra como un Levee, donde la cota de corona de este se encuentra en la 1037.92 msnm.

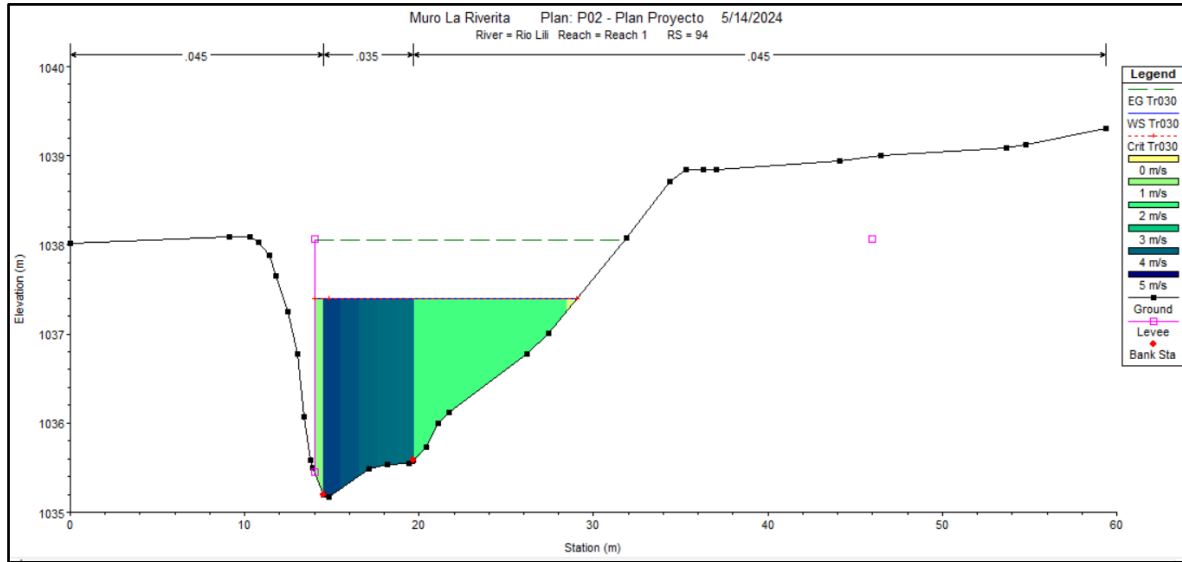


Figura 6.16. Distribución de velocidades en la sección 94 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.16** se observa una cota de lámina de agua de 1037.40 msnm, con una cota de nivel crítico de 1037.40 representando un régimen de flujo crítico. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 4.36 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 1.85 m/s. En esta sección, el muro proyectado se muestra como un Levee, donde la cota de corona de este se encuentra en la 1038.07 msnm.

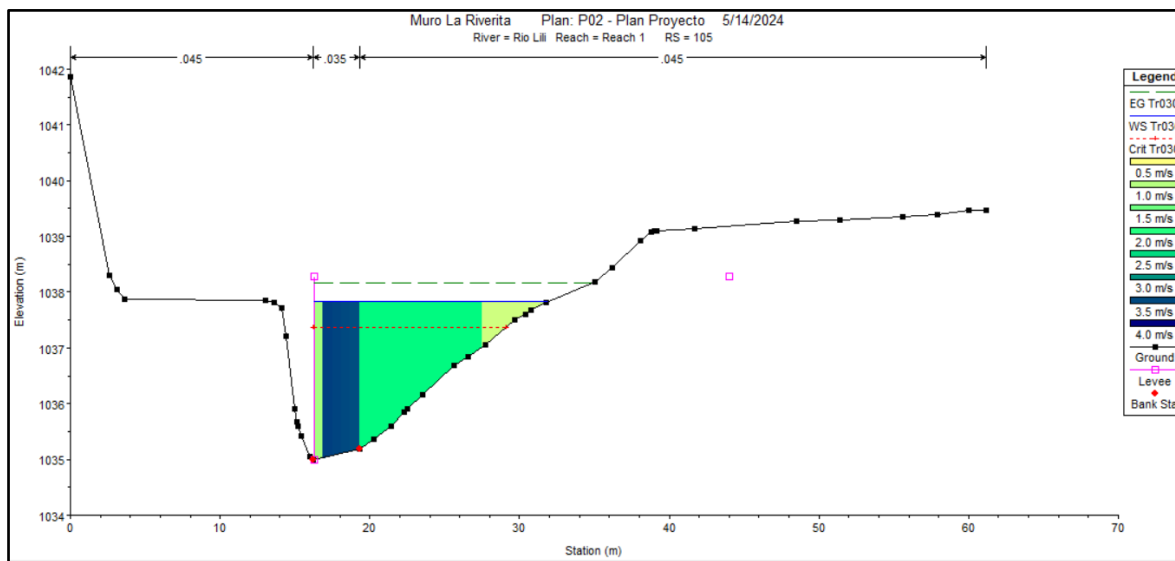


Figura 6.17. Distribución de velocidades en la sección 105 de río Lili- Tr030 (Condición – Proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 6.17** se observa una cota de lámina de agua de 1037.83 msnm, con una cota de nivel crítico de 1037.37 representando un régimen de flujo subcrítico que implica velocidades bajas y una mayor profundidad en comparación con el resto de tramo modelado, analizando el tramo desde la sección 68 hasta la presente, se evidencia entonces un resalto hidráulico producto del cambio de régimen de flujo. Por otro lado, las velocidades en el centro del cauce son del orden de 3.50 m/s y en las márgenes menores velocidades de orden de 0.83 m/s. En esta sección, el muro proyectado se muestra como un Levee, donde la cota de corona de este se encuentra en la 1037.28 msnm.

En la figura a continuación se muestra el perfil hidráulico del río Lili, exponiendo cotas a lo largo del tramo modelado tanto del terreno natural (margen izquierda y derecha) como los niveles de lámina de agua, línea de energía y línea crítica.

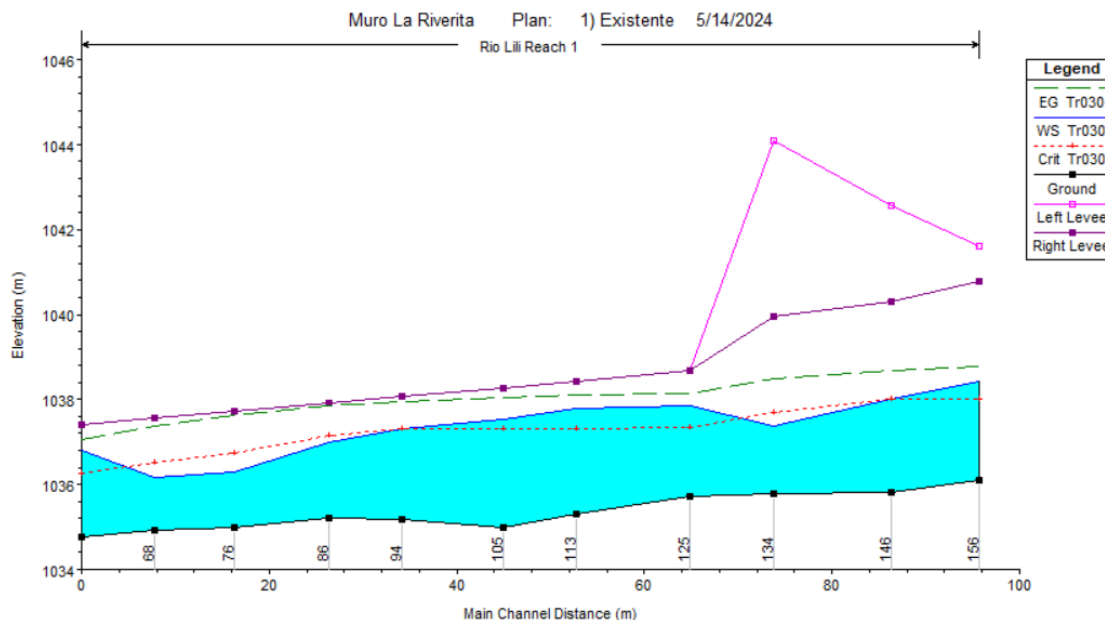


Figura 6.18. Perfil longitudinal del tramo modelado río Lili – Tr030 (condición proyecto)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura anterior, no se observan desbordamientos a lo largo del tramo modelado del río Lili, se observa un resalto hidráulico en las abscisas 40 y 70 lo que implica que en algunos tramos el régimen de flujo se encuentra supercrítico y en otro subcrítico.

6.6 CONCLUSIONES

Se realizó la modelación existente del río Lili y quebrada a través del modelo unidimensional de HEC-RAS, analizando los resultados arrojados para el tramo en general y específicamente para las secciones que comprenden la localización del muro.

Posterior al análisis de la condición existente, se realizó la modelación para la condición proyecto teniendo en cuenta el mismo caudal asociado a la condición existente (Tr030) y la cota de coronación establecida para el muro. A continuación, se ilustra los datos tabulares para la cota de coronación del muro de acuerdo con cada abscisa.



Tabla 6.4 Resumen de cotas de coronación de muro

Abscisa	Corona
156.00	1039.27
146.00	1039.07
134.00	1038.84
125.00	1038.67
113.00	1038.44
105.00	1038.28
94.00	1038.07
86.00	1037.92
76.00	1037.72
68.00	1037.57
60.00	1037.41

7 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN

7.1 Introducción

El cauce aluvial de un río es sujeto a erosionar el fondo y las márgenes de este en razón de las corrientes de aguas, por lo cual, para garantizar la estabilidad y durabilidad de obras de infraestructura es pertinente desarrollar el cálculo de la socavación; en aras de conocer y cuantificar los procesos erosivos del flujo y así establecer las condiciones de diseño de las estructuras tales como son las cimentaciones para puentes o muros en ríos. Para el cálculo de la socavación existen diferentes metodologías, de las cuales se presentan las más utilizadas y algunas de ellas fueron usadas en los cálculos de socavación. En principio se tienen en cuenta las que tienen resultados más consistentes y cercanos entre sí, las que suministran valores extremos se desechan.

7.2 Granulometría

Se recopila información de material del lecho del fondo de la quebrada Nogalitos, con su respectiva tabla de granulométrica y curva granulométrica. Se calcula la apertura por la cual pasa el 50% del material, es decir el d_{50} , para las diferentes muestras disponibles y se analizan estos resultados posteriormente.

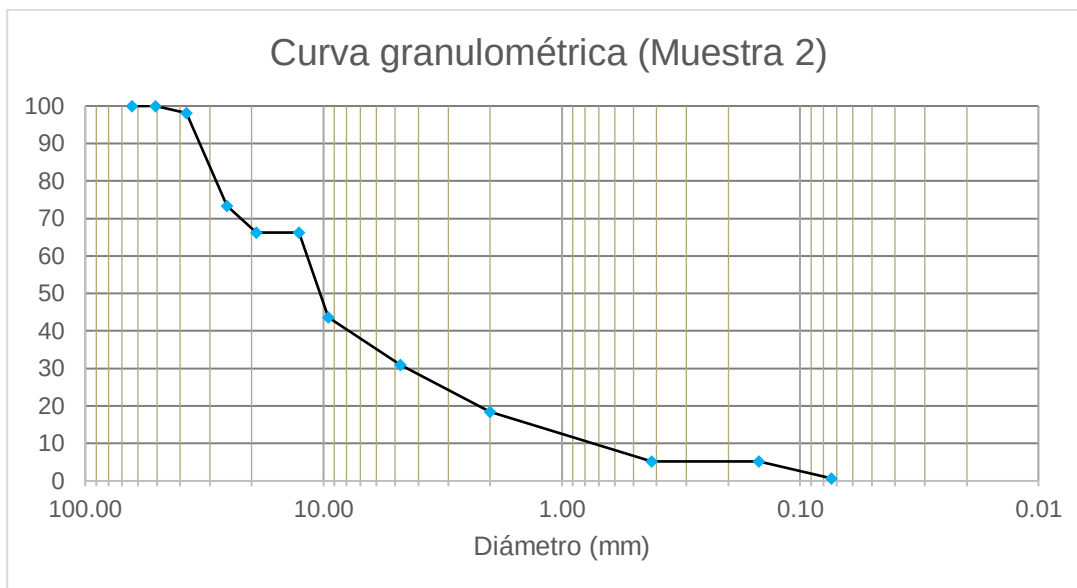


Figura 7.1. Gráfico del comportamiento granulométrico río Lili, aguas arriba (muestra 2).

Fuente: Elaboración propia

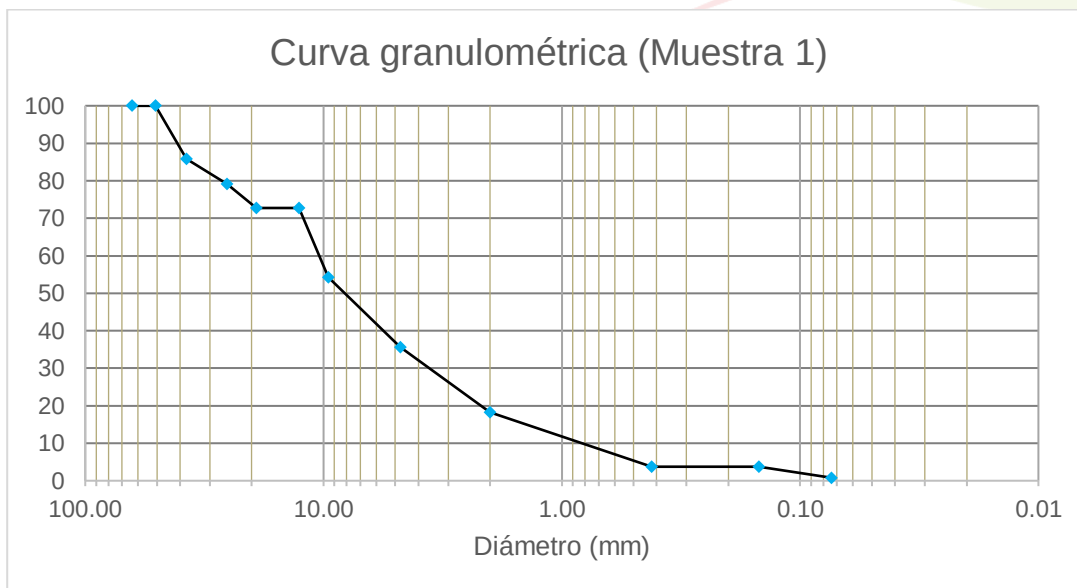


Figura 7.2. Gráfico del comportamiento granulométrico río Lili, aguas abajo (muestra 1).

Fuente: Elaboración propia

De la gráfica y haciendo una interpolación de valores se puede identificar que el valor para el D_{50} , el cual es un valor representativo del tamaño de tamiz por el cual pasa el 50% del material de la muestra, expresado en milímetros.

Se obtuvo varias muestras para analizar su granulometría. Sin embargo, para efectos conservadores, se decide emplear el valor menor valor de D_{50} . El cual corresponde 8.47 mm para el río Lili (muestra 1).

7.3 Metodología

Se determinó durante el estudio hidráulico, presentado en capítulos anteriores, que el periodo de retorno con el cual se diseñan las obras de cimentación es de 1 vez en 100 años, el cual corresponde a un caudal de $71.62 \text{ m}^3/\text{s}$ para el tramo del río Lili.

Con el fin de tener un análisis de la socavación pertinente, se consideran diferentes autores para las diferentes etapas de cálculo. Por una parte, se deberá determinar la velocidad crítica, la cual será comparada con la velocidad de la sección o local, y así determinar si se presenta efecto de socavación. Posteriormente a esto, se calcula la socavación mediante las ecuaciones de diferentes autores.

7.3.1 Velocidades críticas

La velocidad crítica para la socavación permite determinar si se da el fenómeno de socavación, por lo cual se debe realizar un análisis a través de las siguientes ecuaciones, para comparar la velocidad crítica calculada con la velocidad de flujo.

7.3.1.1 Método de Froehlich

Velocidad crítica de acuerdo a Froehlich:

Ing. Civil Msc Rafael Clement Oliveros

$$V_c = 6.19 * Y^{1/6} * (D_{50})^{1/3}$$

Ecuación 19

Dónde:

- V_c Velocidad crítica (m/s)
- Y Profundidad del flujo (m)
- D_{50} Tamaño medio del material del lecho (m)

7.3.1.2 Método de Colby (1964)

La velocidad crítica se obtiene de la siguiente expresión:

$$V_c = 5.25 * (h)^{1/2} * (D_{50})^{1/3}$$

Ecuación 20

Dónde:

- V_c Velocidad crítica (m/s)
- h Profundidad de flujo (m)
- D_{50} Tamaño medio del material del lecho.

7.3.2 Socavación general

En este numeral se presentan las metodologías de cálculo utilizadas para obtener la socavación general del cauce.

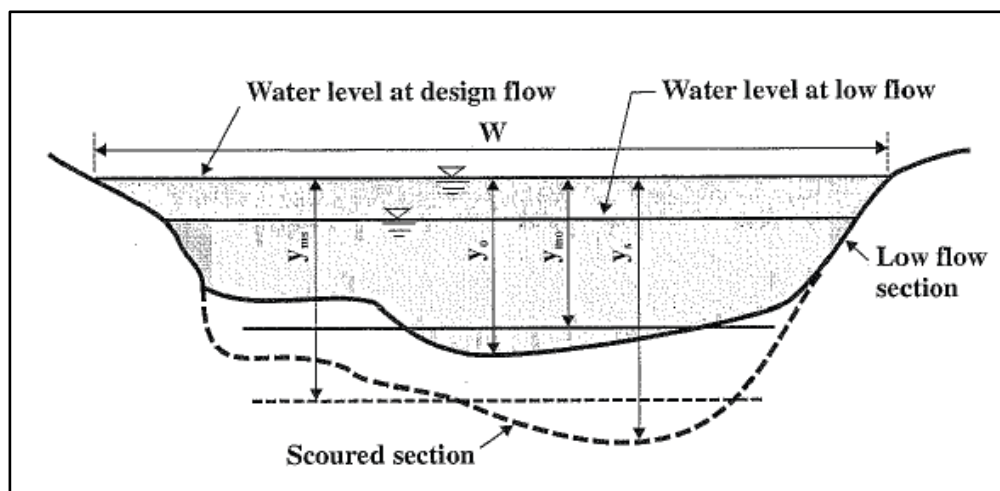


Figura 7.3. Esquematización para el análisis de la socavación general

Fuente: Prof. Revelli, Memorias de clase, Politécnico de Turín.

7.3.2.1 Farias-Pilán

$$H_s = \frac{0.35 * q^{0.7}}{(D_{50})^{-0.2}}$$

Ecuación 21

Donde:

- H_s = Profundidad media del agua después del proceso erosivo (m).
- D_{50} = Diámetro medio de partícula (mm).
- $q = Q/B$ = Caudal unitario ($m^3/s-m$).
- B = Ancho no contraído (m).
- Q = Caudal de diseño (m^3/s).

7.3.2.2 Lischtván & Lebediev

$$H_s = 0.333 \frac{q^{0.701}}{(D_{50})^{0.1999}}$$

Ecuación 22

Donde:

- H_s = Profundidad media del agua después del proceso erosivo (m).
- D_{50} = Diámetro medio de partícula (m).
- $q = Q/B$ = Caudal unitario ($m^3/s-m$).
- B = Ancho no contraído (m).
- Q = Caudal de diseño (m^3/s).

7.3.3 Socavación por curva

La presencia de una curva representa un efecto mayor de erosión frente a la socavación general, en el caso de no haber una curva, dado que el flujo percute contra la margen

externa de la curva, provocando una mayor afectación de los esfuerzos cortantes generados por el flujo.

Para la socavación por curva se considera el esquema de la figura X, donde se muestra gráficamente las variables de entrada y de salida del cálculo.

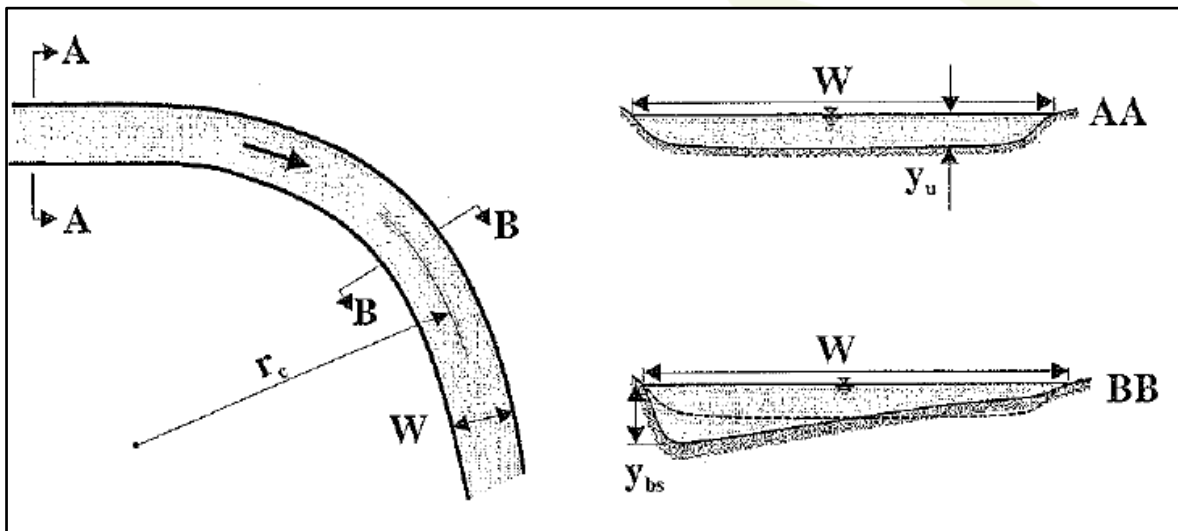
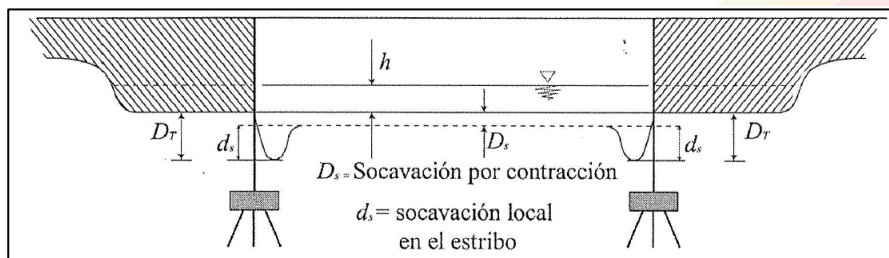


Figura 7.4 Esquematización para el análisis de la socavación por curva. Prof. Revelli, Memorias de clase, Politécnico de Turín.

7.3.4 Socavación local en estribos

En este numeral se presentan las metodologías de cálculo utilizadas para obtener la socavación local por estribos.



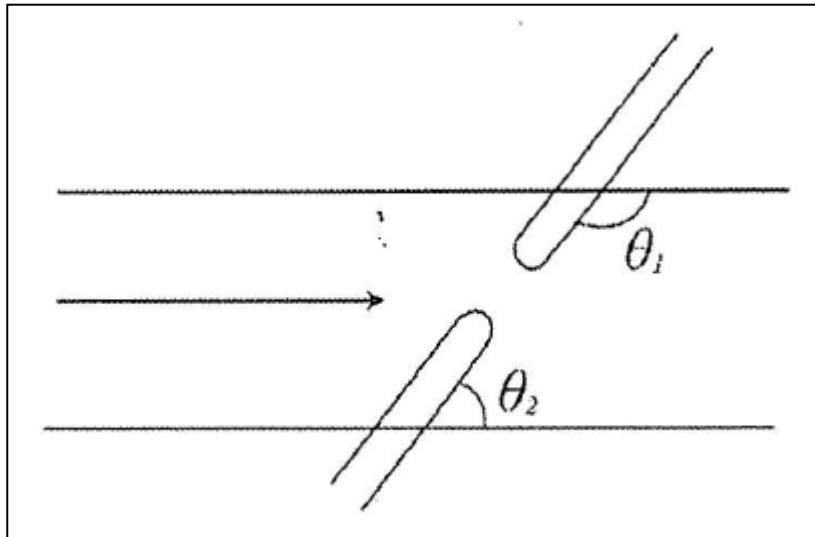


Figura 7.5. Esquematización para el análisis de la socavación local en estribos

Fuente: Álvares, 2020

7.3.4.1 Laursen

- Para un estribo ubicado en el cauce principal – en lecho móvil

$$\frac{d_s}{L} \approx 1.57 \left(\frac{y}{L} \right)^{0.5}$$

Ecuación 23

- Para un estribo ubicado en el cauce principal – agua clara

$$\frac{d_s}{L} \approx 1.89 \left(\frac{y}{L} \right)^{0.5}$$

Ecuación 24

Donde:

- $y = h$ = Tirante medio de la sección (m)
- L = Longitud del estribo (m)
- $d_s = H_s$ = Profundidad de socavación (m)

7.3.4.2 Liu et al

- En lecho móvil para estribos en contrafuerte del río

$$\frac{d_s}{L} = 1.10 \left(\frac{y}{L} \right)^{0.6} F_r^{0.33}$$

Ecuación 25

- En lecho móvil en estribos en pared vertical y estribos con aleta

$$\frac{d_s}{L} = 2.15 \left(\frac{y}{L} \right)^{0.6} F_r^{0.33}$$

Ecuación 26

- $y = h$ = Tirante medio de la sección (m)
- $d_s = H_s$ = Profundidad de socavación (m)
- F_r = Numero de Froude
- L = Longitud del estribo(m)

7.3.5 Resultados

Después de realizar la modelación hidráulica para un caudal y nivel correspondiente a un periodo de retorno de 1 en 100 años, se obtienen diferentes parámetros, tales como profundidad hidráulica, área mojada, ancho superior, velocidad y número de Froude, valores que permitirán el cálculo de la socavación junto al valor del D_{50} . Se realiza el cálculo de socavación entre las secciones aguas arriba y aguas abajo, entre las cuales se encuentra el tramo específico del río a estudiar. La socavación es un proceso de erosión que se ve afectado por las secciones en cercanía del sitio donde se quiere evaluar el efecto de la socavación, motivo por el cual se calcula la socavación para las secciones mencionadas.

A continuación, en la **Tabla 7.1** se presentan los resultados obtenidos a partir de la modelación en HEC-RAS para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años.

Tabla 7.1 Resultados de modelación HEC-RAS para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años – río Lili

Parámetros Hidráulicos de Entrada para Cálculo de Socavación										
Abscisa	Fondo del Cauce	Lámina	Prof Máx ($Y_0=h$)	Prof Media ($Y_{mo}=h_u$)	Velocidad (V)	Área Mojada (A)	Ancho Superficial (B)	Muestra	Caudal de diseño (Q)	Caudal unitario (q)
m	msnm	msnm	m	m	m/s	m ²	m		m ³ /s	m ³ /ms
156.00	1036.09	1038.68	2.59	1.65	3.13	31.51	19.07	M1	71.62	3.76
146.00	1035.82	1038.24	2.42	1.43	4.40	22.84	15.96	M1	71.62	4.49
134.00	1035.77	1037.58	1.81	1.18	5.15	16.35	13.84	M1	71.62	5.17
125.00	1035.73	1038.05	2.32	1.55	2.69	31.40	20.24	M1	71.62	3.54
113.00	1035.30	1037.95	2.65	1.12	3.19	32.46	28.98	M1	71.62	2.47
105.00	1034.99	1037.64	2.65	1.50	4.63	24.69	16.45	M1	71.62	4.35
94.00	1035.17	1037.54	2.37	1.34	4.29	23.63	17.64	M1	71.62	4.06
86.00	1035.21	1037.26	2.05	1.29	4.60	20.49	15.87	M1	71.62	4.51
76.00	1034.99	1036.48	1.49	1.06	5.63	14.94	14.09	M1	71.62	5.08
68.00	1034.91	1036.34	1.43	1.18	5.47	14.99	12.70	M1	71.62	5.64
60.00	1034.76	1037.08	2.32	1.73	2.59	33.26	19.27	M1	71.62	3.72

A partir de estos valores se procede a calcular la velocidad crítica en cada sección y realizar el respectivo comparativo con la velocidad que se presenta en cada una de estas.

Tabla 7.2 Velocidades de secciones de tramo de estudio

Abscisa	Morfología		
	Velocidad Crítica del Mov Incipiente (V^*_c)	Agua Clara o Lecho Móvil	Tramo (recto/curvo)
m	m/s		
156.00	1.48	Lecho Móvil	Recto
146.00	1.46	Lecho Móvil	Recto
134.00	1.39	Lecho Móvil	Recto
125.00	1.45	Lecho Móvil	Curvo
113.00	1.48	Lecho Móvil	Curvo

	Morfología		
Abscisa	Velocidad Crítica del Mov Incipiente (V^*_c)	Agua Clara o Lecho Móvil	Tramo (recto/curvo)
m	m/s		
105.00	1.48	Lecho Móvil	Curvo
94.00	1.46	Lecho Móvil	Curvo
86.00	1.42	Lecho Móvil	Curvo
76.00	1.35	Lecho Móvil	Curvo
68.00	1.34	Lecho Móvil	Curvo
60.00	1.45	Lecho Móvil	Curvo

7.3.5.1 Cálculo de socavación general

En la **Tabla 7.3** se presentan los resultados obtenidos para la socavación general, según diferentes autores y finalmente se usará el valor promedio de éstos.

Tabla 7.3 Cálculo de socavación general para cada sección río Lili

CÁLCULO PROFUNDIDAD DESPUÉS DE SOCAVACIÓN GENERAL			
Abcisa	MÉTODO DE FARIAS-PILÁN	Lischtván & Lebediev (granulares)	Promedio ($H_{s\text{promedio}}$)
	m	m	m
156.00	1.35	2.18	1.77
146.00	1.53	2.47	2.00
134.00	1.70	2.72	2.21
125.00	1.30	2.09	1.69
113.00	1.01	1.62	1.32
105.00	1.50	2.41	1.96
94.00	1.43	2.30	1.86
86.00	1.54	2.48	2.01
76.00	1.67	2.69	2.18
68.00	1.80	2.89	2.35
60.00	1.34	2.16	1.75

7.3.5.2 Cálculo de socavación por curva

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para el cálculo de la socavación por curva. Los autores utilizados para el cálculo de socavación corresponden a Maynard Modificado, Apmann y Maynard.

Para estimar el radio de curva y el radio de curva exterior, se hizo uso de la información de topografía y batimetría. Se observa en color verde el radio de curvatura y color amarillo el radio de curvatura exterior.

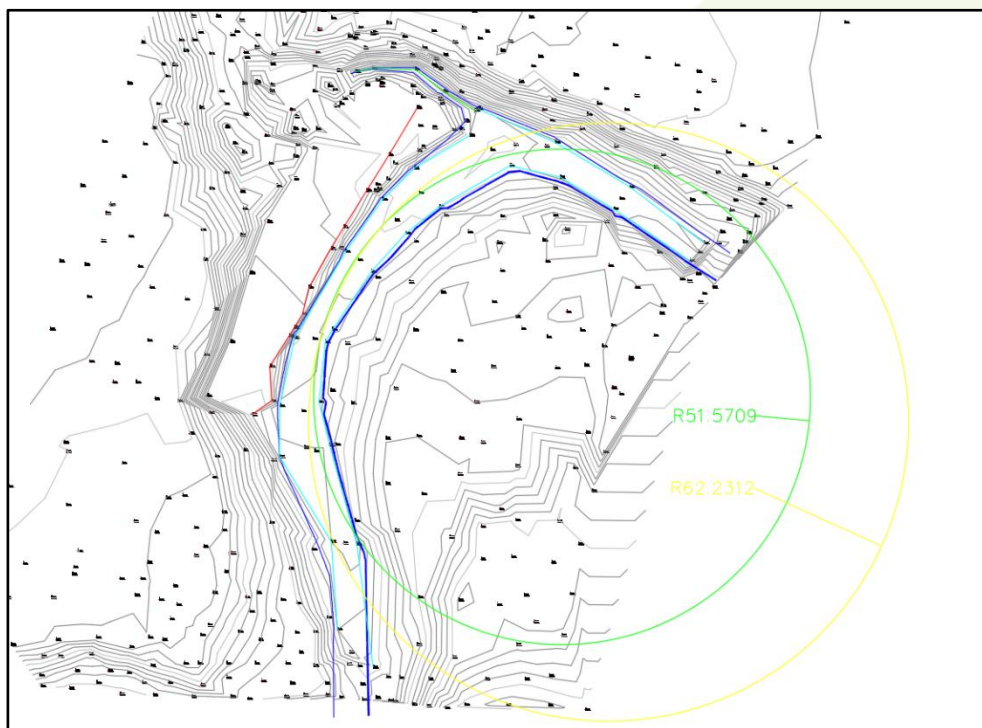


Figura 7.6. Radio de curvatura y radio de curvatura exterior

Tabla 7.4 Cálculo de socavación por curva para cada sección río Lili

CÁLCULO PROFUNDIDAD DESPUÉS DE SOCAVACIÓN EN CURVA

Abcisa	Tiene curva (SI/NO)	Maynord Modificado	Apmann	Maynord	Promedio (HS _{promedio})
	N/A	m	m	m	m
156.00	NO	NA	NA	N/A	NA
146.00	NO	NA	NA	N/A	NA
134.00	NO	NA	NA	N/A	NA
125.00	SI	2.85	0.54	3.46	2.28
113.00	SI	2.16	0.08	2.65	1.63
105.00	SI	2.71	0.71	3.24	2.22
94.00	SI	2.44	0.58	2.93	1.98
86.00	SI	2.32	0.63	2.77	1.91
76.00	SI	1.89	0.58	2.23	1.57
68.00	SI	2.08	0.70	2.44	1.74
60.00	SI	3.17	0.66	3.83	2.55

7.3.5.3 Cálculo socavación local por estribos

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para el cálculo de la socavación local. Los autores utilizados para el cálculo de socavación corresponden a, Liu et al y Laursen.

Tabla 7.5 Cálculo de socavación local para muro para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años

CÁLCULO PROFUNDIDAD DESPUÉS DE SOCAVACIÓN GENERAL							
Abcisa	Tiene muro (SI/NO)	Ancho del muro (L)	θ	Forma muro	Liu et al. (1961)	Laursen (1963)	Promedio D _{Spila}
m		(m)	°		(m)	(m)	(m)
156.00	NO			NA	NA	NA	0.00
146.00	NO			NA	NA	NA	0.00
134.00	NO			NA	NA	NA	0.00
125.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.45	1.07	1.26
113.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.23	0.91	1.07

CÁLCULO PROFUNDIDAD DESPUÉS DE SOCAVACIÓN GENERAL

Abcisa	Tiene muro (SI/NO)	Ancho del muro (L)	θ	Forma muro	Liu et al. (1961)	Laursen (1963)	Promedio DS_{Pila}
m		(m)	°		(m)	(m)	(m)
105.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.65	1.05	1.35
94.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.55	1.00	1.27
86.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.56	0.98	1.27
76.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.57	0.89	1.23
68.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.67	0.93	1.30
60.00	SI	0.30	90.00	Estribo con pared vertical	1.52	1.13	1.32

7.3.5.4 Resultado total de socavación

En este orden de ideas, se procede a calcular la profundidad de la socavación desde el terreno, para determinar la cota de socavación para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años para el río Lili

Tabla 7.6 Resultado de socavación total en las secciones de interés del río Lili

Resumen de Socavación Total							
Abcisa	$HS_{General}$	Hbs_{Curva}	$HS_{GenCurv}$	DS_{Gen}	$DS_{estribo}$	DS_{Total}	Cota Socavación
	m	m	m	m	m	m	msnm
156.00	1.77	NA	1.77	0.00		0.00	1036.09
146.00	2.00	NA	2.00	0.00		0.00	1035.82
134.00	2.21	NA	2.21	0.40		0.40	1035.37
125.00	1.69	2.28	3.98	1.66	1.26	2.92	1032.81
113.00	1.32	1.63	2.94	0.29	1.07	1.37	1033.93
105.00	1.96	2.22	4.18	1.53	1.35	2.88	1032.11
94.00	1.86	1.98	3.85	1.48	1.27	2.75	1032.42
86.00	2.01	1.91	3.92	1.87	1.27	3.14	1032.07
76.00	2.18	1.57	3.75	2.26	1.23	3.49	1031.50
68.00	2.35	1.74	4.09	2.66	1.30	3.96	1030.95
60.00	1.75	2.55	4.31	1.99	1.32	3.31	1031.45

En promedio se presentan una profundidad de socavación total de 3.96 m, y la cota mínima de socavación en el tramo estudiado es la 1030.95 msnm.

8 ANÁLISIS HIDRÁULICO CON OBRA DE PROTECCIÓN IMPLANTADA

Además del muro de protección sobre la margen izquierda del río, se contempla la construcción de un sistema de protección de fondo contra la erosión en bolsacreto, esto modifica las condiciones de rugosidad del cauce, mitigando los fenómenos erosivos. En ese sentido, se realiza el análisis realizando la respectiva modificación del modelo hidráulico para evaluar la variación de velocidades y posteriormente determinar el cambio en la socavación total para estimar la longitud requerida de protección.

8.1 Modelo hidráulico con obra implantada

Considerando que la obra debe extenderse ente 5 a 6 metros aguas arriba y aguas abajo del tramo donde se proyecta el muro se implementa en el modelo hidráulico de la condición proyecto antes presentado. Como resultado del modelo ajustado se analiza el perfil de velocidades de flujo de la condición proyecto sin protección respecto a la condición proyecto con la condición proyecto (ver Figura 8.1), donde se puede observar que para la condición existente las velocidades están en el rango de 2.5 a 5.5 m/s principalmente, mientras que para el resultado del escenario con protección se observa que las velocidades se reducen al rango inferior 1 m/s en la zona de intervención. La disminución de la velocidad se traduce en una reducción del potencial de erosivo del río.

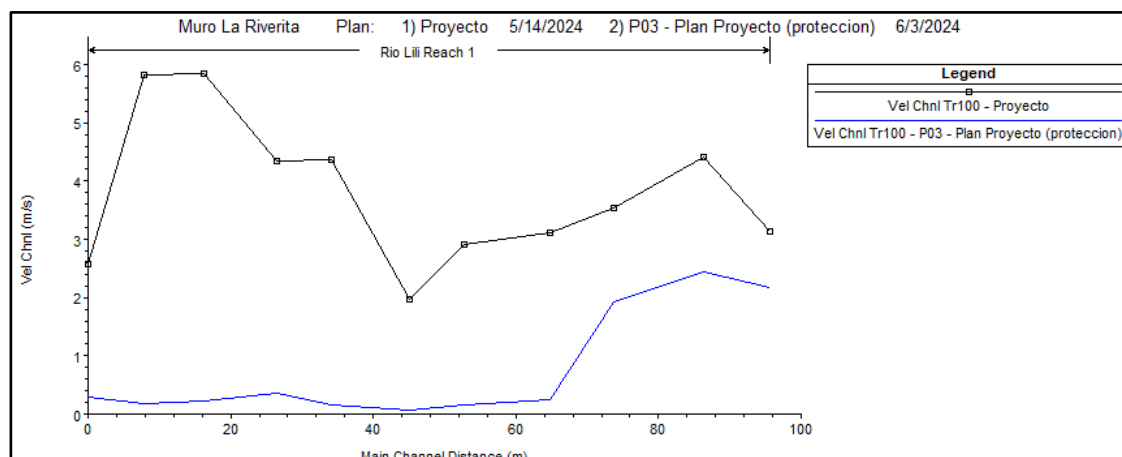


Figura 8.1. Velocidades de lo largo del tramo de modelación del río Lili (comparativo de escenarios proyecto)

8.2 Análisis de la socavación con la implementación de la obra de protección

Considerando las mismas ecuaciones, misma granulometría y metodología aplicada para el cálculo de la socavación anteriormente se realiza nuevamente el cálculo de la socavación general, por curva, local y total para el tramo del río Lili con los resultados del modelo con la obra de protección incorporada. Los resultados consideran un periodo de retorno de 1 vez en 100 años, al igual que el escenario anteriormente proyectado. En la Tabla 8.1 se presenta el resultado de la socavación total, donde se tiene una profundidad máxima de socavación total de 2.34 m, y se recuerda que la socavación antes calculada era de 3.96 m, es decir que se reduce en un 41% la profundidad de socavación una vez implementada la obra.

Tabla 8.1 Resultado de socavación total en las secciones de interés del río Lili

Resumen de Socavación Total							
Abcisa	HsGeneral	HbsCurva	HsGenCurv	DSGen	DSestribo	DSTotal	Cota Socavación
	m	m	m	m	m	m	msnm
156.00	1.59	NA	1.59	0.00		0.00	1036.09
146.00	1.64	NA	1.64	0.00		0.00	1035.82
134.00	1.51	NA	1.51	0.00		0.00	1035.77
125.00	1.47	2.86	4.33	1.25	1.09	2.34	1033.39
113.00	1.15	2.51	3.66	0.14	0.97	1.11	1034.19

Resumen de Socavación Total							
Abcisa	Hs _{General}	Hbs _{Curva}	Hs _{GenCurv}	Ds _{Gen}	Ds _{estribo}	Ds _{Total}	Cota Socavación
	m	m	m	m	m	m	msnm
105.00	1.14	2.44	3.59	0.00	0.87	0.87	1034.12
94.00	1.17	2.31	3.48	0.00	0.93	0.93	1034.24
86.00	1.31	1.80	3.11	0.21	0.89	1.10	1034.11
76.00	1.13	2.14	3.27	0.07	0.92	0.99	1034.00
68.00	1.08	2.38	3.46	0.15	0.94	1.10	1033.81
60.00	1.32	2.43	3.74	0.76	1.01	1.77	1032.99

8.3 Definición de la longitud de protección

La protección de fondo contra la erosión tipo bolsacreto deberá considerar una longitud tal que garantice la protección frente al escenario de diseño considerado en el cálculo la socavación. En ese sentido la longitud de desarrollo transversal al cauce que tendrá la protección en bolsacreto será igual al valor de Ds, es decir al valor medio de la socavación total, el cual es de 2.34 m. En la figura siguiente se muestra de manera esquemática dicha configuración.

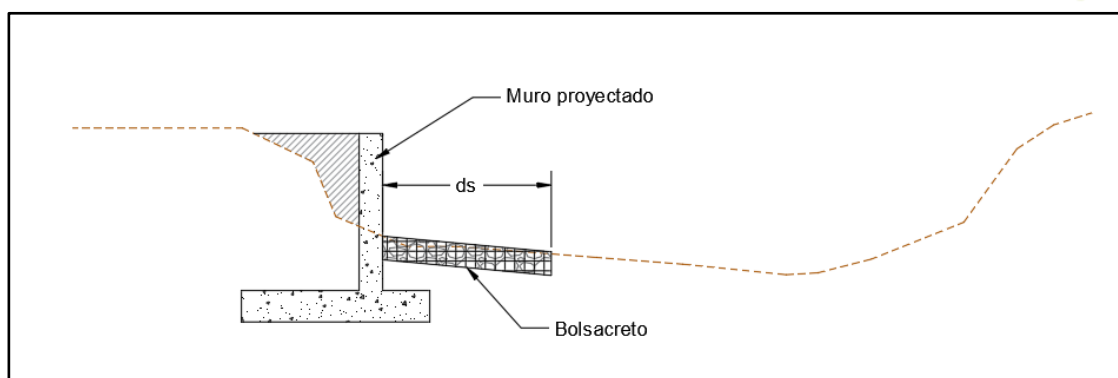


Figura 8.2. Esquema de protección de fondo

9 CONCLUSIONES

Una vez obtenidos los resultados del modelo hidráulico, se realizó el estudio de socavación para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años, para las zonas donde se plantea el muro La Riverita, determinando la profundidad de socavación. Se emplearon diferentes metodologías, con el objetivo de determinar el valor más representativo de socavación, se establece la cota de socavación y elevación mínima al final de cada estudio de socavación.

Tabla 9.1 Resumen de resultados de socavación para el Muro La Riverita sobre el río Lili

Socavación total	
Profundidad media (m) - Ds	2.98
Profundidad máxima (m) - Ds	3.96
Elevación mínima (msnm)	1030.95

Una vez implementada la obra se realizó el análisis en el que se identificó una reducción de las velocidades, y así mismo una disminución de la profundidad máxima de socavación. Con los resultados del escenario con la obra de protección implementada se tienen los siguientes resultados de socavación, donde se observa una disminución de la profundidad de socavación.

Tabla 9.2 Resumen de resultados de socavación para el Muro La Riverita sobre el río Lili con la obra de protección implementada

Socavación total	
Profundidad media (m) - Ds	1.28
Profundidad máxima (m) - Ds	2.34
Elevación mínima (msnm)	1032.99



INFORME ELABORADOR POR:

ING. CIVIL RAFAEL CLEMENT Msc. Hidrología e Hidráulica.

M.P 76202-333735 VLL

C.C. 1144052558

Ing. Civil Msc Rafael Clement Oliveros

10 BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México D.F.: Editorial LIMUSA.
- Castillo, D. J. (2021). *Caracterización Textural de Sedimentos Superficiales del Río Magdalena*. Barranquilla.
- Chow, V. T. (2000). *Hidrología aplicada*. (M. E. R., Ed.) Bogotá: McGraw Hill.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. R., Ed.) McGraw Hill.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2022). *Realizar la construcción de las obras e instalación y puesta en operación de embarcaderos fluviales ecoturísticos en zonas ribereñas al río Cauca, con el fin de potenciar, fortalecer e incentivar el desarrollo del turismo de naturaleza, cultural e invest*. Santiago de Cali: DTA.
- D., G., Ruíz, J. F., & M., C. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes principales (ACP)*. IDEAM, Subdirección de Meteorología.
- Federal Highway Administration. (1989). *HEC 11-Design of Riprap Revetment*. Virginia.
- Federal Highway Administration. (2002). *Hydraulic Design Series No. 2, Second Edition: Highway Hydrology*. Greenbelt.
- Federal Highway Administration. (2009). *HEC-23: Bridge Scour and Stream Instability Vol. 1*. National Highway Institute.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogotá D.C, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, Colombia.
- L. Allen, W. (1991). *Subsurface Drainage of Pavement Structures: Currents Corps of Engineers and Industry Practice*. Washington D.C.: Department of transportation (DOT): FAA.
- NTC. (2004). *Norma Técnica Colombiana*.
- Rodriguez Díaz, A. (2009). *Hidráulica Experimental*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rodríguez Díaz, H. (2006). *Diseños hidráulicos, sanitarios y de gas en edificaciones*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México D.F.: Univresidad Nacional Autónoma de México.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE EROSIÓN Y DESLIZAMIENTOS.



US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual Versión 6.0*. California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *Hydrological Modeling System (HEC-HMS): User's Manual*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. Davis, California.

US Army Corps of Engineers. (2016). *Hydrological Modeling System (HEC-HMS): User's Manual*. Davis, California.