

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Las obras utilizadas como defensas de protección de riberas en ríos son estructuras construidas como medida de mitigación y control ante crecidas de los ríos, además del potencial riesgo de inundaciones a las áreas aledañas a estos cursos de agua, algunas de las medidas de protección para este tipo de defensas utilizadas convencionalmente a lo largo del tiempo en nuestro medio son los “muros de gavión”, en la actualidad se conocen nuevas alternativas para la protección en riberas de ríos como ser las “geoceldas con relleno de concreto”.

El sistema de protección con geoceldas nació por la necesidad de construir obras viales en situaciones difíciles y fue desarrollado por primera vez por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos como medio para estabilizar el suelo en terrenos blandos, a medida que el cuerpo de ingenieros descubrió, las células de paredes delgadas en polietileno de alta densidad fueron encontrando a este material otros usos, como ser la protección de riberas de ríos y canalización en este caso.

Según Pilarczyk (2004) los revestimientos en base a rocas, bloques y asfalto son comunes en las obras de ingeniería, debido a lo cual, los conocimientos de diseño y los criterios necesarios para su correcto funcionamiento se han difundido ampliamente, sin embargo, afirma que el uso de otro tipo de revestimientos como los gaviones, matrices de concreto y geosintéticos, en muchos casos carecen de experiencia en la construcción como así también de metodologías de diseño establecidas de manera adecuada debido a su uso relativamente reciente en nuestro medio.

Actualmente en nuestro país la utilización de las “geoceldas” es escasa, frente a esta situación como alternativa se proponen estas obras de protección en riberas de ríos y revestimiento de los mismos, adecuadas a lugares que carecen de material pétreo, donde a los constructores les resulta más factible técnica y económicamente el uso en la protección de riberas de ríos con revestimientos de “geoceldas con relleno de hormigón”; del mismo modo, en el

departamento de Tarija solamente se conoce un proyecto de protección utilizando la aplicación de geoceldas ubicado en la localidad de Villamontes, éste proyecto fue ejecutado en el año 1996 por la Unión Europea para la protección de las riberas del río Pilcomayo encontrándose emplazado por aproximadamente 2 Km. aguas abajo al puente ferroviario.

Por lo tanto, es de gran necesidad reconocer la importancia de nuevas alternativas de revestimiento para la protección contra inundaciones, es por esto que se plantea el uso de “geoceldas con relleno de concreto”, de esta manera dar a conocer la experiencia de construcción con estas obras y metodologías adecuadas de diseño y construcción, de manera que en un futuro los técnicos encargados puedan tomar otro tipo de alternativas.

1.2. Problema de investigación

1.2.1. Planteamiento del problema

La protección contra inundaciones y revestimiento en cauces tiene en nuestro medio una escasa experiencia acerca de alternativas lo cual hace que los constructores, en su gran mayoría, utilicen muros y colchones tipo gavión.

La construcción de gaviones aporta un gran impacto ambiental sobre los ríos, ya que la materia prima para estas estructuras son los áridos que se extraen de ríos influyendo de gran manera a un potencial riesgo de desborde de estos por la mala práctica de extracción de áridos.

El mantenimiento en estructuras de muros y colchones tipo gavión ha sido un problema debido a que la morfología de la estructura trabaja conjuntamente como una estructura monolítica y si existiese una falla en las zonas inferiores de ésta, existe la necesidad de derrumbar la integridad de la estructura para su mantenimiento, en otras palabras dichas estructuras no tienen mantenimiento, por otro lado existe una gran posibilidad de corrosión y herrumbre en la malla del gavión ocasionado por aguas salinas y corrosivas, lo que causa la ruptura de la malla del gavión por la abrasión de la roca.

1.2.2. Formulación del problema

¿Las geoceldas con relleno de concreto son una alternativa viable de manera técnica, económica y sostenible para la protección en riberas de cauces naturales en nuestro medio, mitigando la explotación de canteras en beneficio al medio ambiente?

1.2.3. Sistematización del problema

¿La utilización de geoceldas sobre el uso convencional de gaviones como obra de protección de riberas en cauces naturales disminuirá la extracción de áridos en ríos?

¿El mantenimiento de geoceldas con relleno de concreto es más viable en comparación al mantenimiento de gaviones?

¿Al realizar criterios, análisis y técnicas constructivas acerca de las geoceldas con relleno de concreto se estaría contribuyendo a información sobre este tipo de revestimiento en ríos?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Analizar una alternativa como revestimiento en ríos ante el convencional método de gaviones y colchonetas, con la aplicación de geoceldas con relleno de concreto, en un tramo de la quebrada “El Monte” ubicado en el barrio Salamanca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Utilizar la información técnica de ambas alternativas para analizar sus características considerando criterios de durabilidad ante la velocidad y rugosidad de superficie de colchonetas y geoceldas.
- Realizar un análisis económico, basado en los precios unitarios y cotizaciones obtenido en nuestro medio, y tiempo de ejecución utilizando como objeto de estudio el revestimiento con colchonetas y geoceldas con relleno de concreto.
- Comparar y analizar información técnica y criterios generales de construcción de colchonetas de gavión y geoceldas con relleno de concreto, utilizadas como revestimiento en ríos.

- Identificar, mediante la información recopilada, las variables que permitan una comparación objetiva entre ambas estructuras.
- Comparar los resultados del análisis técnico de flujo y velocidad, también un análisis de precios unitarios para definir el recubrimiento que sea más adecuado.

1.4. Justificaciones del proyecto

1.4.1. Justificación técnica

Mediante el presente trabajo se busca comparar dos tipos de revestimientos de protección ante crecidas y canalización basados en distintas variables técnicas para así poder coadyuvar con la toma de decisiones.

Adicionalmente, cada vez es de mayor necesidad el uso de alternativas distintas a los gaviones, debido a la explotación excesiva de canteras de piedra para la construcción de dichas estructuras, por otro lado, proponer un trabajo integro de ambas estructuras de protección en cuestión en la investigación.

1.4.2. Justificación social

Se pretende dar a conocer un poco más los beneficios que brinda la utilización de esta alternativa tecnológica para colaborar con futuros proyectos que se realizarán en nuestro medio, como así también difundir los usos que este material brinda para la protección de áreas urbanas ante crecidas.

Por otro lado la aplicación de esta propuesta tecnológica ante la utilización de muros y colchones de gaviones brinda una estética sofisticada a la vista como estructura de protección.

1.4.3. Justificación académica

Este trabajo de investigación pretende aportar académicamente, mediante la difusión y aporte bibliográfico y uso de software (ArcGis, HEC-HMS y HEC-RAS) para el entendimiento de una metodología de comparación entre recubrimientos ante crecidas y canalización en cursos naturales, esto con el objeto de formar al estudiante para que pueda escoger la mejor

ubicación, tipo de obra y diseño procurando que se trabaje en consonancia con la hidráulica del río y no contra ella.

1.4.4. Justificación ambiental

Debido a la constante agresión hacia los ríos por la extracción de material hace necesario el control de explotación de canteras de agregado pétreo tanto en nuestro medio como en el mundo y mediante este trabajo se pretende mitigar dicho problema, ya que la utilización de geoceldas con relleno de concreto disminuye la extracción de agregado debido a que no se necesita agregado pétreo en su realización.

1.4.5. Justificación institucional

Con este trabajo se pretende realizar una contribución de información para el diseño de alternativas como obras de protección en riberas de ríos con respecto a la aplicación de metodologías convencionales al momento de realizar futuros proyectos para nuestro medio.

1.5. Marco de referencia

1.5.1. Marco teórico

1.5.1.1. Hidrología

Es la ciencia que trata de las aguas sobre la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. (U.S. Federal Council for Science and Technology, 1962)

1.5.1.2. Hidráulica fluvial

Ésta rama de la hidráulica combina conceptos de hidrología, hidráulica general y geomorfología. Estudia el comportamiento hidráulico de los ríos en lo que se refiere a los caudales y niveles medios y extremos, las velocidades de flujo, las variaciones del fondo por socavación y sedimentación y ataques contra los márgenes del río.

1.5.1.3. Revestimientos de ríos para la protección de riberas e inundaciones

1.5.1.3.1. Gaviones

Son estructuras que consisten en una caja de forma prismática rectangular de enrejado metálico de malla hexagonal, se rellenan con piedra de cantera o cualquier material similar que se pueda obtener del entorno próximo a la obra.

Las estructuras de gaviones proporcionan un amplio campo de aplicaciones en la estabilización de terrenos y protección contra inundaciones

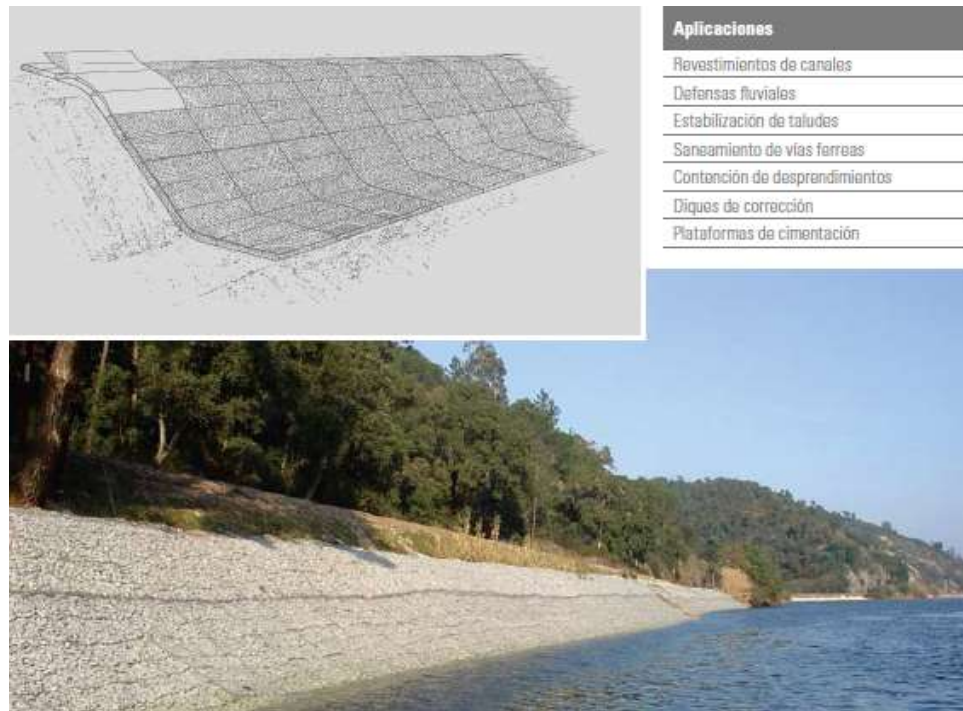


Figura 1.1. Esquema de revestimiento con colchonetas de gavión.

Fuente: (Bianchini Ingeniero, 2006).

1.5.1.3.2. Geoceldas

Este sistema de confinamiento está formado por láminas de polietileno de Alta densidad las cuales pueden ser unidas por procesos de ultrasonido o termo-fusión, en forma de paneles. De esta forma se obtiene una estructura tipo colmena muy resistente que confina y retiene el relleno empleado en el sistema. Esta puede ser rellena con cualquier tipo de material según su aplicación constructiva, ya sea en carreteras, utilizadas como muros de contención, como revestimiento de canales, protección de taludes, entre otros se utilizan rellenos de tierra, grava, arena, hormigón, etc.



Figura 1.2. Protección de taludes con geoceldas.

Fuente: (PANAWEB, 2016).

1.5.2. Marco conceptual

- Hietograma: diagrama de barras que indica la variación de la altura o intensidad de lluvia con respecto al tiempo dividido en intervalos iguales de tiempo.
- Tormenta de diseño: Una tormenta de proyecto es un patrón de precipitación que se emplea en el diseño de un sistema hidrológico. Una tormenta de proyecto se define a partir de una lámina de precipitación total, un patrón temporal y un mapa de la distribución espacial de la lluvia
- Crecida: Una avenida es la elevación del nivel de un curso de agua significativamente mayor que el flujo medio de éste. Durante la crecida, el caudal de un curso de agua aumenta en tales proporciones que el lecho del río puede resultar insuficiente para contenerlo.
- Rugosidad: Es un conjunto de irregularidades que tiene una superficie, este depende de su acabado superficial y es un factor que influye en el movimiento de cualquier flujo en un canal.
- Flujo: Es la cantidad de masa del fluido que fluye a través de un canal o tubería.
- Número de curva (CN): Es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el SCS para la estimación de la escorrentía por precipitación.
- Ribera: Se denomina así al borde de un cuerpo de agua. El término hace referencia a la zona de tierra más cercana a un cuerpo de agua.

- Gavión: Es una caja o cesta en forma prismática rellena de piedra, la cual se coloca a pie de obra desarmados para su posterior relleno.
- Geotextil: Es un material textil sintético plano formado por fibras poliméricas, similar a una tela, de gran deformabilidad, empleada para aplicaciones geotécnicas.
- Geocelda: Es una estructura tridimensional semirrígida en forma de panal utilizada para la estabilización de suelos o taludes y protección de riberas en ríos.

1.5.3. Marco espacial

El proyecto que se pretende emplazar en éste estudio se encuentra ubicado en el Estado plurinacional de Bolivia, Departamento de Tarija primera sección de la provincia Cercado. En el barrio Salamanca, entre las pasarelas que comprenden la quebrada ubicadas detrás del hospital San Juan de Dios.

1.5.4. Marco temporal

La determinación de la hidrología se la realizo utilizando datos de precipitación de la estación “El Tejar” con datos disponibles desde el año 1975 a 2012 y tomando periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, periodos seleccionados por el tipo de obra a realizar.

Se realizó el levantamiento de información de precios de los materiales del mes de mayo, información proporcionada por los vendedores de estos productos.

1.6. Alcance

- Se dará a conocer y se ofrecerá criterios constructivos e información acerca de revestimientos para cursos naturales como ser los gaviones y geoceldas con relleno de concreto.
- Se realizará una comparación técnica, basada en el material de construcción de ambos revestimientos en estudio las variables de criterio técnico serán: durabilidad ante velocidad de flujo y esfuerzos cortantes generados por el material de arrastre, rugosidad de superficie y comportamiento de flujo aplicado en ambas secciones.
- Se realizará una comparación económica basada en precios unitarios y cotizaciones de los materiales, por otra parte, en el análisis económico no se realizará estudios

socio-económicos debido a que se trata de una comparación de precios unitarios de materiales.

- La hidrología se la obtendrá a partir de modelar utilizando el software ArcGis la cuenca de la quebrada “El Monte” a partir de un modelo digital de elevación de 12.5 m de precisión, para determinar los parámetros fisiométricos y el número de curva (CN) utilizando información de suelos y vegetación proporcionado por el estudio realizado por Zonisig.
- El cálculo de caudales máximos se lo realizará utilizando el software HEC-HMS, se realizará una simulación de crecidas para tiempos de retorno de 50, 100 y 500 años, partiendo desde hietogramas para los mencionados tiempos de retorno utilizando la estación de “El Tejar” por la preferencia de ubicación sobre la cuenca y datos que proporciona la misma basados en estudios de lluvias anteriores, el criterio que se utilizará en dicho programa para estimar perdidas será el de número curva del SCS (SCS curve number method), por otra parte el hidrograma de salida al que se ajustará la simulación será el hidrograma unitario del SCS (SCS unit hydrograph).
- El análisis de flujo se lo realizará aplicando ambas estructuras en un tramo de aproximadamente 370 m. de los márgenes de la quebrada “El Monte” que se localiza en el barrio “Salamanca” detrás del hospital “San Juan de Dios”, para realizar la simulación del modelo hidráulico se utilizará el software HEC-RAS, donde se considerará caudales máximos calculados a periodos de retorno de 50, 100 y 500 años.

CAPÍTULO II

2. Hidrología

2.1. Generalidades

Es la ciencia dedicada al estudio del agua. Si bien existen muchas definiciones, tal vez la que mejor presenta los alcances de esta ciencia es la propuesta por el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología establecido por el presidente de Estados Unidos en 1959:

Hidrología es la ciencia que trata de las aguas sobre la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos.

El dominio de la hidrología abarca toda la historia de la vida del agua en la tierra. (U.S. Federal Council for Science and Technology, 1962)

Las características que tendrá la hidrología dependerán principalmente de la situación del estudio al que se esté tratando como así también el desarrollo del estudio hidrológico se realizará según el enfoque profesional y las distintas bases de conocimiento que sean utilizados en la resolución de problemas técnicos, desarrollos, o investigaciones.

El uso de la hidrología en ingeniería civil es fundamental para el planeamiento, diseño y operación de los proyectos hidráulicos, pues es el que se orienta hacia los parámetros hidrológicos de diseño. Sin embargo, dada la dependencia de esta ciencia de los aspectos meteorológicos y ambientales, los resultados deberán ser considerados como estimados en muchos casos y por lo tanto será necesario complementar las incertidumbres con métodos probabilísticos.

Desde otro punto de vista se llama como Ingeniería hidrológica a la ciencia aplicada, que usa principios hidrológicos en la solución de problemas de ingeniería, que surgen de la necesidad de uso y explotación de los recursos hídricos, así como para la protección contra daños ocasionados por éste. La hidrología aplicada moderna exige conocimientos avanzados de matemáticas, tales como la estadística, planteamientos y resoluciones analíticas del comportamiento del ciclo hidrológico que es muy complejo. (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009)

2.2. Ciclo hidrológico

Es el conjunto de transferencias de agua entre la atmósfera, el mar y la tierra en sus tres estados, sólido, líquido, y gaseoso denominado como el movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

Esta definición se puede describir cualitativamente en la figura 2.1.

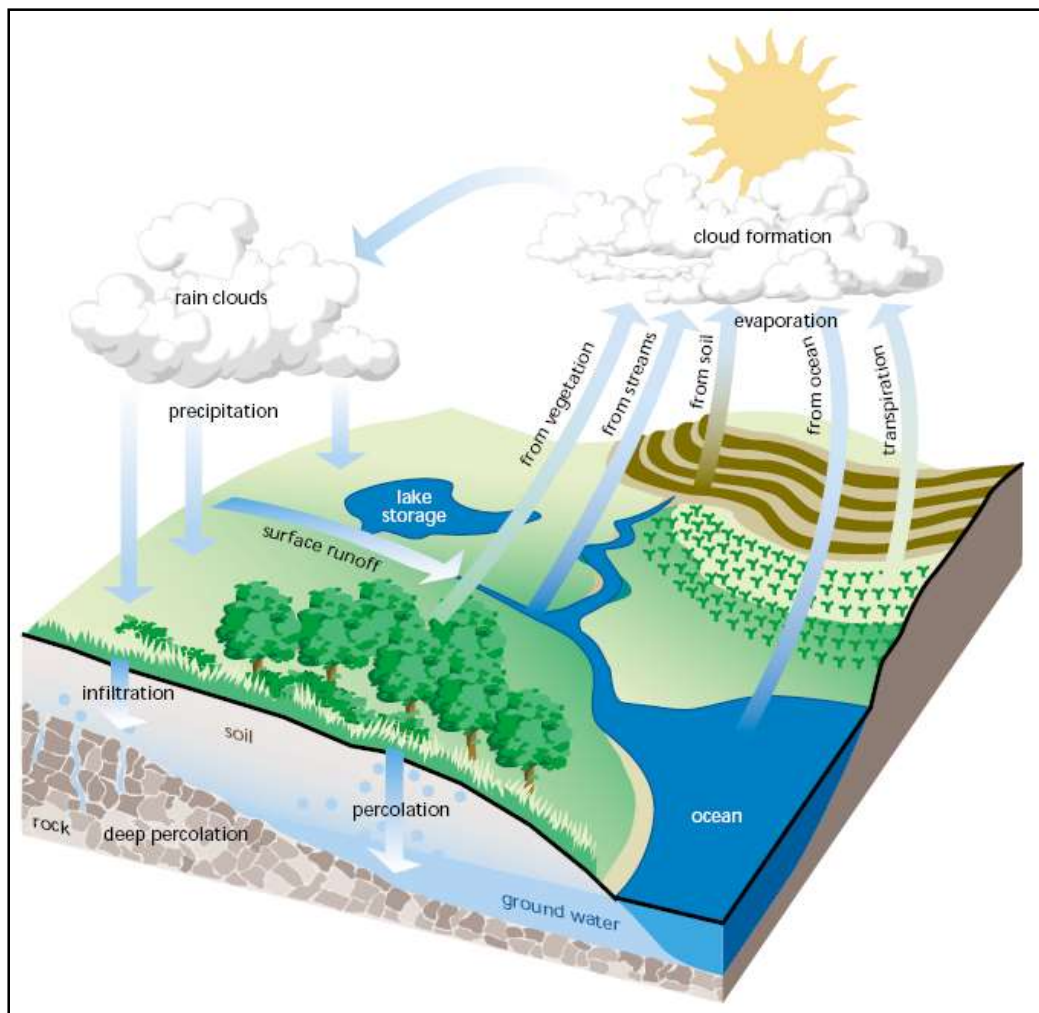


Figura 2.1. Esquema del ciclo hidrológico con sus componentes

Fuente: (Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998).

El ciclo no tiene principio ni fin pero se puede decir que el concepto de ciclo hidrológico se origina en el agua de los océanos; es un proceso continuo pero irregular en el espacio y en el tiempo. Una gota de lluvia puede recorrer todo el ciclo o una parte de él. Vale destacar que

cualquier acción del hombre en una parte del ciclo, alterará el ciclo entero para una determinada región. El hombre actúa introduciendo cambios importantes en el ciclo hidrológico de algunas regiones de manera progresiva al desecar zonas pantanosas, modificar el régimen de los ríos, construir embalses, etc.

2.3. Caracterización morfológica de la cuenca

2.3.1. Microlocalización

El cauce del río Guadalquivir divide a la ciudad de Tarija en dos partes, la mayoría de la población se encuentra ubicada en el margen izquierdo, esta área se subdivide en tres partes por las quebradas de “San Pedro” y “El Monte”.

La subcuenca de la quebrada “El Monte”, pertenece al sistema de drenaje del río Guadalquivir el que a su vez pertenece al sistema de drenaje del río Guadalquivir el cual pertenece a la cuenca del río Bermejo.

La quebrada “El Monte” se encuentra prácticamente en el centro del valle central de Tarija ubicado entre las coordenadas:

21°25' y 21°33' de latitud sur

64°45' y 64°61' de longitud oeste

Esta quebrada atraviesa la ciudad de Tarija de noreste a sudoeste.

La ubicación del proyecto a realizar está localizado en las coordenadas:

21°32'17'' de latitud sur

64°43'05'' de longitud oeste

La ubicación del proyecto de protección contra inundaciones y canalización sobre la quebrada “El Monte” será emplazado sobre una longitud de 370 m. entre las pasarelas ubicadas en el barrio Salamanca detrás del hospital San Juan de Dios.



Figura 2.2. Delimitación de la cuenca quebrada "El Monte".
Fuente: Elaboración propia.

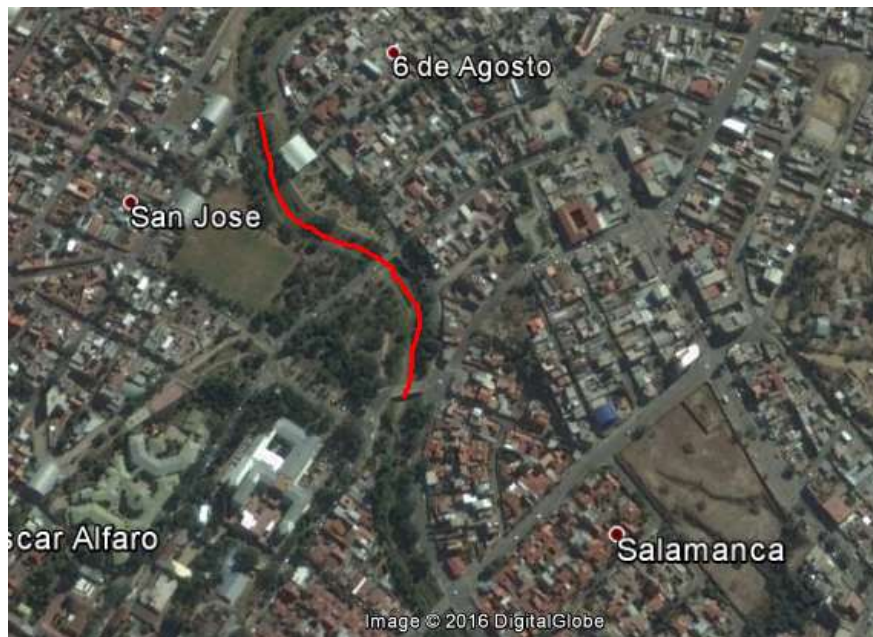


Figura 2. 3. Localización del emplazamiento proyecto de obras de protección.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Elementos básicos del río

2.3.2.1. Suelo

La información acerca del uso del suelo en la cuenca de quebrada “El Monte” fue proporcionada en base al estudio del Zonisig (2001), para la generación de bandas en la obtención del número de curva (CN) se utilizó el criterio que propone el servicio de conservación de suelos, en el texto de hidrología aplicada de Ven Te Chow (1994), acerca del grupo hidrológico de suelos el cual se comparó con la información extraída del Zonisig.

USO DE SUELO CUENCA EL MONTE

Los tipos de suelo según Zonisig, basado en los grandes grupos de suelos propuestos por Driessen y Dudal (1991), que se presentan en la cuenca son los siguientes:

- a) Leptosoles: Son suelos poco desarrollados, superficiales y limitados por estratos de rocas intemperadas o roca no alterada. Por lo general son variables en textura, estructura y color, dependiendo del material parental y el clima.
- b) Lixisoles: Estos suelos presentan mayor desarrollo pedogenético y se forman en regiones con climas húmedas hasta semi-áridas, donde la arcilla es transportada o eluviada de un horizonte superficial A, a un horizonte de acumulación Bt iluvial. La formación de estos suelos presupone varios requisitos, entre ellos la presencia de arcilla en el medio, procesos dispersivos que faciliten su migración, y periodos de alternancia lluviosos y secos que contribuyan a translocar las arcillas, permitiendo su acumulación en la parte inferior del perfil. Se desarrollan en relieves planos a inclinados, a partir de materiales aluviales, coluvio-aluviales o lacustrinos.
- c) Cambisoles: Estos suelos se encuentran en proceso de “cambio”, en su color, estructura y/o textura, que no llegan a un B árgico, nátrico, cálcico, espódico o ferrálico. Están formados a partir de una diversidad de rocas "in situ", como también de depósitos aluviales y coluviales. Se los encuentra en relieves plano a fuertemente escarpado, en diferentes tipos de climas y con diversidad de vegetación.
- d) Calcisoles: Los calcisoles son suelos bien desarrollados, comunes en regiones áridas o semiáridas, formados básicamente por un proceso de translocación de carbonatos de calcio desde los horizontes superficiales a un horizonte de acumulación a cierta

profundidad en el perfil, principalmente en sedimentos aluviales, lacustrinos y coluviales; en material rico en bases y en relieves plano u ondulado.

- e) Regosoles: Los regosoles son suelos jóvenes formados a partir de materiales no consolidados, en ellos predominan los horizontes A ócrico o úmbrico y C, sin otra propiedad diagnóstica más que la del material parental. Son frecuentes tanto en relieves planos como en las pendientes inferiores de las formaciones montañosas. El desarrollo del perfil es débil a consecuencia del tiempo de formación y/o formación lenta por bajas temperaturas, sequías prolongadas o erosión natural. Las características morfológicas se determinan por el tipo de material parental.

Los tipos de suelo que se presentan en la cuenca, basado en los grupos hidrológicos de suelos propuestos por el servicio de conservación de suelos descritos en el texto de hidrología aplicada de Ven Te Chow (1994), son los siguientes:

Grupo A: Arenas profundas, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo C: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

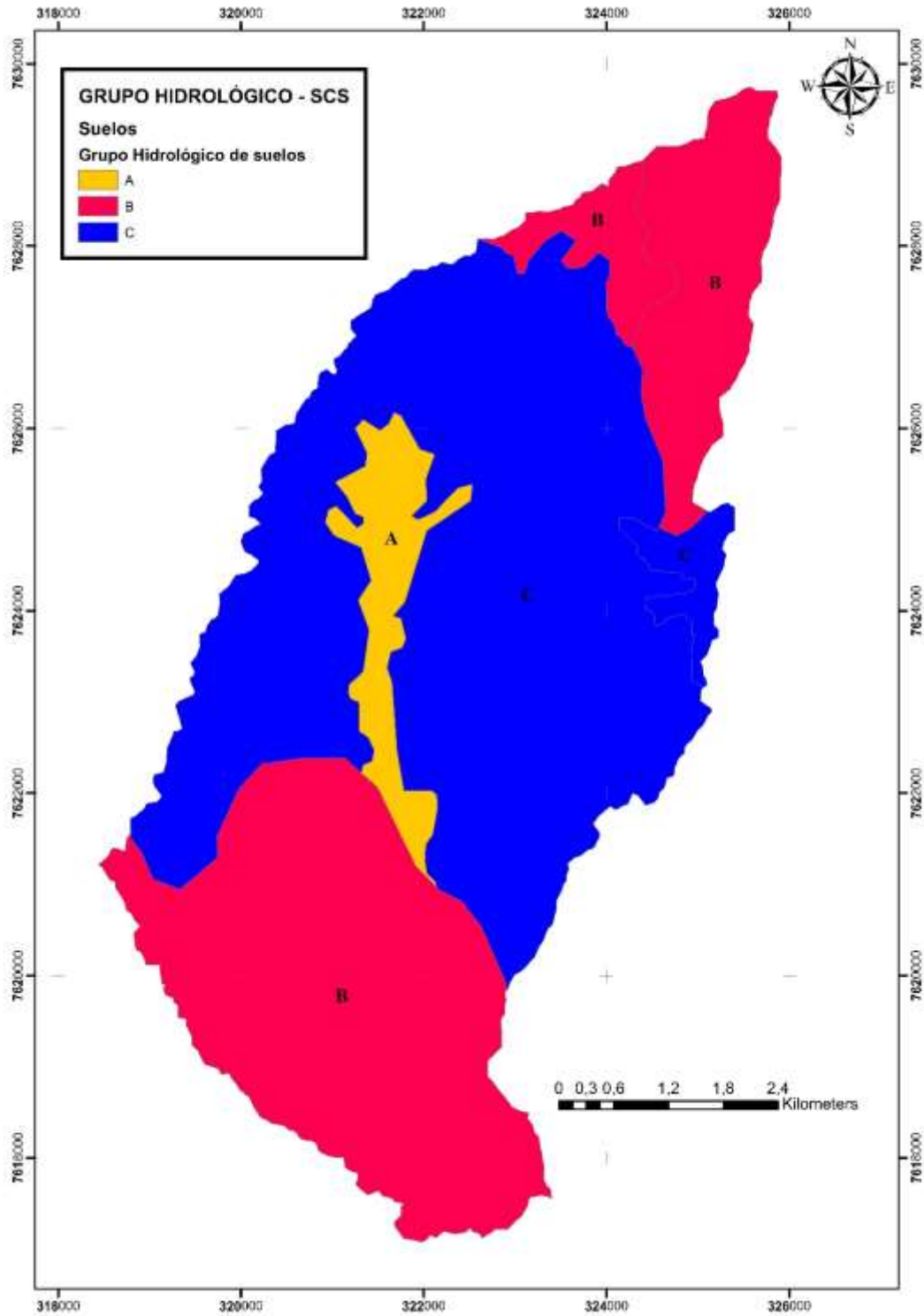


Figura 2.4. Caracterización del grupo hidrológico de suelos según SCS en la quebrada "El Monte".

Fuente: Elaboración propia, basada en modelación hidrológica en ArcGIS.

2.3.2.2. Vegetación

La vegetación predominante en la cuenca son las especies arbóreas de tipo xerofítico que se presentan en forma de bosque abierto, con una incidencia protectora relativamente baja y ocupando con estas formaciones solamente zonas reducidas, las especies más comunes son: el churqui, molles, algarrobo, jarca, arrayan, sauco, ceibo, sisico, jatanque y tipa.

La vegetación adoptada en este proyecto se realizó basada en información del Zonisig, la cual caracteriza el tipo de vegetación según la FAO-UNESCO 1973, se tomaron las categorías de vegetación hasta el nivel de Formación presentadas por la UNESCO (1973). Las unidades de diferente rango o jerarquía de acuerdo al sistema de clasificación mencionado se representan de la siguiente forma:

1, 2, etc. = CLASES DE FORMACIÓN.

A, B, etc. = SUBCLASES DE FORMACIÓN.

1, 2, etc. = GRUPOS DE FORMACIÓN.

a, b, etc. = FORMACIÓN.

(1, 2, etc.) = SUBFORMACIÓN.

Se reconocen las siguientes clases de vegetación según la FAO-UNESCO 1973, en la siguiente tabla de leyendas.

CLASES DE FORMACIÓN	SUBCLASES DE FORMACIÓN	GRUPOS DE FORMACIÓN
<p>1: BOSQUE DENSO</p> <p>Formado por árboles de más de 5 m de altura, cuyas copas se tocan.</p> <p>2: BOSQUE RALO</p> <p>Comunidad de árboles abierta. Formada por árboles de por lo menos 5 m de altura, la mayoría de las copas no se tocan, pero cubren por lo menos el 40% de la superficie.</p> <p>3: MATORRAL</p> <p>Comunidad mayormente constituida por fanerolitas leñosas cespitosas (arbustos) 0,5 a 5 m de altura pueden ser densos o ralos.</p> <p>4: MATORRAL ENANO</p> <p>Los arbustos rara vez sobrepasan los 50 cm de altura. Pueden ser densos o ralos.</p> <p>5: VEGETACIÓN HERBÁCEA</p> <p>Incluye todas las formas de crecimiento de las herbáceas graminoide y forbias.</p>	<p>A: MAYORMENTE SIEMPRE VERDE</p> <p>El dosel superior nunca está sin follaje, aunque algunos árboles individualmente pueden perder sus hojas.</p> <p>B: MAYORMENTE CADUCIFOLIO</p> <p>La mayoría de los arboles pierden su follaje simultáneamente y en conexión con la estación desfavorable.</p> <p>C: EXTREMADAMENTE XEROMÓRFICO</p> <p>Formados por especies xerofíticas, como árboles de tronco abombado, estipitados con hojas y tallos suculentos. Sotobosque de arbustos con adaptaciones xerofíticas.</p> <p>D: GRAMINOIDE ALTA</p> <p>Las formas graminoide alcanzan más de 3 m de altura, cuando están plenamente desarrolladas sus inflorescencias. Pueden tener forbias pero cubren menos que el 50%.</p> <p>E: GRAMINOIDE INTERMEDIA</p> <p>Formas graminoide dominantes de 50 cm a 2 m de altura, cuando sus inflorescencias están plenamente desarrolladas. Pueden también tener forbia, pero cubre menos del 50%.</p> <p>F: GRAMINOIDE BAJA</p> <p>Las formas graminoide dominantes son menores de 50 cm de altura cuando sus inflorescencias están desarrolladas. También puede haber forbias pero cubren menos del 50%.</p> <p>G: FORBIAS</p> <p>Vegetación en donde predominan las herbáceas no graminoide (Ej. Trébol)</p> <p>Se debe considerar en su clasificación.</p> <p>a) Los cambios estacionales en su fisonomía</p> <p>b) Diferenciación entre herbáceas tropicales y no tropicales.</p>	<p>1: OMBROFILO o PLUVIAL</p> <p>Llamado “bosque tropical”. Formado principalmente por arboles sempervirentes, generalmente con yemas desnudas. Sin resistencia al frío o a la sequía.</p> <p>2: ESTACIONAL o DE TRANSICIÓN</p> <p>Principalmente compuesto por arboles sempervirentes con alguna protección en las yemas. Es posible una reducción parcial del follaje en la estación seca. Este grupo es transicional entre pluvial y semideciduo.</p> <p>3: SEMIDECIDUO</p> <p>Arboles de dosel superior en su mayoría son deciduos por sequía muchos de los árboles y arbustos de estratos intermedios son sempervirentes. Pueden estar entremezclados en los diferentes estratos.</p> <p>4: DECIDUO POR SEQUIA</p> <p>El follaje de los árboles se pierde cada año, la mayoría de los arboles con corteza relativamente gruesa y fisurada. Con epilitas resistentes a la sequía presentes o abundantes a menudo en forma barbada. Ej. Tilandsia.</p> <p>5: MAYORMENTE ESPINOSO</p> <p>Predominan las especies con apéndices espinosos.</p> <p>6: MAYORMENTE SUCULENTEO</p> <p>Son muy frecuentes plantas suculentas con forma arbórea (escaposas) y formas arbustivas (cespitosas) pero también se presentan las otras xerofanerolitas.</p> <p>7: CON MATAS Y COJINES</p> <p>Con plantas almohadilladas y en matas localmente importantes.</p>

<p>6: CULTIVOS</p>	<p>c) Su explotación, que puede afectar considerablemente su uso.</p> <p>d) Dificultades para diferencia entre formaciones herbáceas naturales y artificiales.</p> <p>H: HIDROMÓRFICA</p> <p>Vegetación acuática, como el caso de la comunidad acuática de manglares o formaciones graminoide húmedas o inundadas la mayor parte del año.</p> <p>I: ARRAIGADO</p> <p>Compuesta de plantas acuáticas que están sostenidas estructuralmente por el agua, es decir no se sostienen por sí solas.</p>	<p>8: SINUSIA ARBÓREA</p> <p>Formaciones graminoide con árboles que crecen en macollos (grupos). Cubren del 10 al 40%.</p> <p>9: SINUSIA ARBUSTIVA</p> <p>Formación graminoide con arbustos que crecen en macollo (grupos).</p> <p>10: PLANTAS PULVINADAS</p> <p>Predominan arboles esclerófilos pulvinados, (con pulvinulo).</p> <p>11: SINUSIA DE PALMERAS</p> <p>Formación graminoide tropical con palmeras Ej. Sabanas de plameras como acronomía total. etc.</p> <p>12: SIN SINUSIA</p> <p>Formación graminoide compuesta principalmente de gramíneas. Ej. Praderas.</p> <p>13: EFÍMERAS</p> <p>Comunidad de forbias efimeras o anuales, en regiones tropicales y subtropicales, con precipitaciones muy escasas, donde desde el... a la primavera las nubes humedecen la vegetación y el suelo.</p> <p>14: MIXTO o MOSAICO</p> <p>Formaciones en las que se presentan entremezclados varios patrones Ej. Homicriptolitas cespitosas camelitas suculentas y otras formas de vida vegetal</p>
--------------------	---	--

Tabla 2.1. Leyenda de vegetación según Zonisig

Fuente: (UNESCO, 1973).

FORMACIÓN	SUBFORMACIÓN
<p>a: BAJA ALTITUD</p> <p>Formaciones que se localizan entre 0 a 500 m.s.n.m.</p> <p>b: SUBMONTAÑA</p> <p>Formaciones que se localizan entre 500 a 1.500 m.s.n.m.</p> <p>c: MONTAÑA</p> <p>Formaciones que se localizan entre 1500 a 3000 m.s.n.m.</p> <p>d: SUBALPINA</p> <p>e: NUBLADO</p> <p>Formaciones que se ubican generalmente en zonas donde la presencia de nubes (niebla) es frecuente.</p> <p>En Bolivia entre los 2.000 – 2.800 m.s.n.m.</p> <p>f: ALUVIAL AMAZÓNICA</p> <p>Típica formación de la cuenca amazónica. Rica en palmeras y lalifoliadas herbáceas altas, aletones en los árboles.</p> <p>g: DE PANTANO</p> <p>Formaciones en hábitats más húmedos edáficamente.</p> <p>h: ALPINO</p> <p>Formaciones que se localizan en altitudes mayores a 4.000m.s.n.m.</p> <p>i: SUBALPINO ALUVIAL</p> <p>Se presentan generalmente más arriba del bosque nublado.</p>	<p>(1): RIPICOLA O DE GALERÍA</p> <p>Localizadas en los bancos bajos frecuentemente inundados de los cursos de agua, dominados por arboles de crecimiento rápido, pobre en especie, sotobosque con epifitas.</p> <p>(2): OCASIONALMENTE INUNDADO</p> <p>Sobre terrazas relativamente secas, que hay en cursos de agua permanentes. Más epifitas y muchas lianas</p> <p>(3): ESTACIONALMENTE ANEGADAS</p> <p>En zonas donde a lo largo de los cursos en los cuales el agua se acumula en grandes áreas planas por varios meses, especialmente detrás de diques naturales bajos. Los arboles tienen frecuentemente zancos (raíces fulcreas) Ej. Versea Amazónica.</p> <p>(4): ANEGADA LA MAYOR PARTE DEL AÑO</p> <p>Formaciones relativamente pobres en especies arbóreas. Sotobosque de herbáceas abundante y alto. Dominan frecuentemente Salix y alnua.</p> <p>(5): SEMIDESIERTO</p> <p>Formaciones con arbustos facultativamente deciduos, a menudo con suculentas.</p> <p>(6): TURBERA ALTO ANDINA (BOFEDAL)</p> <p>Dominan los musgos, ciperáceas y gramíneas; y en las partes elevadas algunos arbustos enanos.</p> <p>(7): AMACOLLADO(PAJONAL)</p> <p>Vegetación de gramíneas amacolladas de cobertura variable con matas.</p>

<p>j: NIVAL</p> <p>Formaciones localizadas en zonas con nieve temporal o permanente.</p> <p>A menudo se presentan patrones de distribución causados por movimientos del suelo por congelación.</p> <p>q: ALUVIAL</p>	<p>(8): CESPITOSA (PRADO)</p> <p>Comunidad graminoide cespitosa, a menudo rica en forbias, dominada por hemicriptolitas.</p> <p>(9): FLOTANTE</p> <p>Formación tropical y subtropical de plantas que flotan libremente en el agua.</p>
--	--

Tabla 2.1. Leyenda de vegetación según Zonisig (Continuación)

Fuente: (UNESCO, 1973).

En la cuenca en estudio se pudieron encontrar las siguientes categorías y subcategorías de vegetación, detalladas en la siguiente tabla:

<i>Vegetación FAO</i>	<i>Clase de formación</i>	<i>Subclase de formación</i>	<i>Grupo de formación</i>	<i>Formación</i>	<i>Subformación</i>
<i>C-6</i>	Cultivos	-	-	-	-
<i>59-3C4c(5)</i>	Matorral	Extremadamente Xeromórfico	Deciduo por sequía	Montaña	Semidesierto
<i>C-6</i>	Cultivos	-	-	-	-
<i>65-3C5c</i>	Matorral	Extremadamente Xeromórfico	Mayormente espinoso	Montaña	
<i>C-6</i>	Cultivos	-	-	-	-
<i>Tarija</i>	Plantación forestal	-	-	-	-

Tabla 2.2. Categorización de vegetación en quebrada “El Monte”.

Fuente: Elaboración propia.

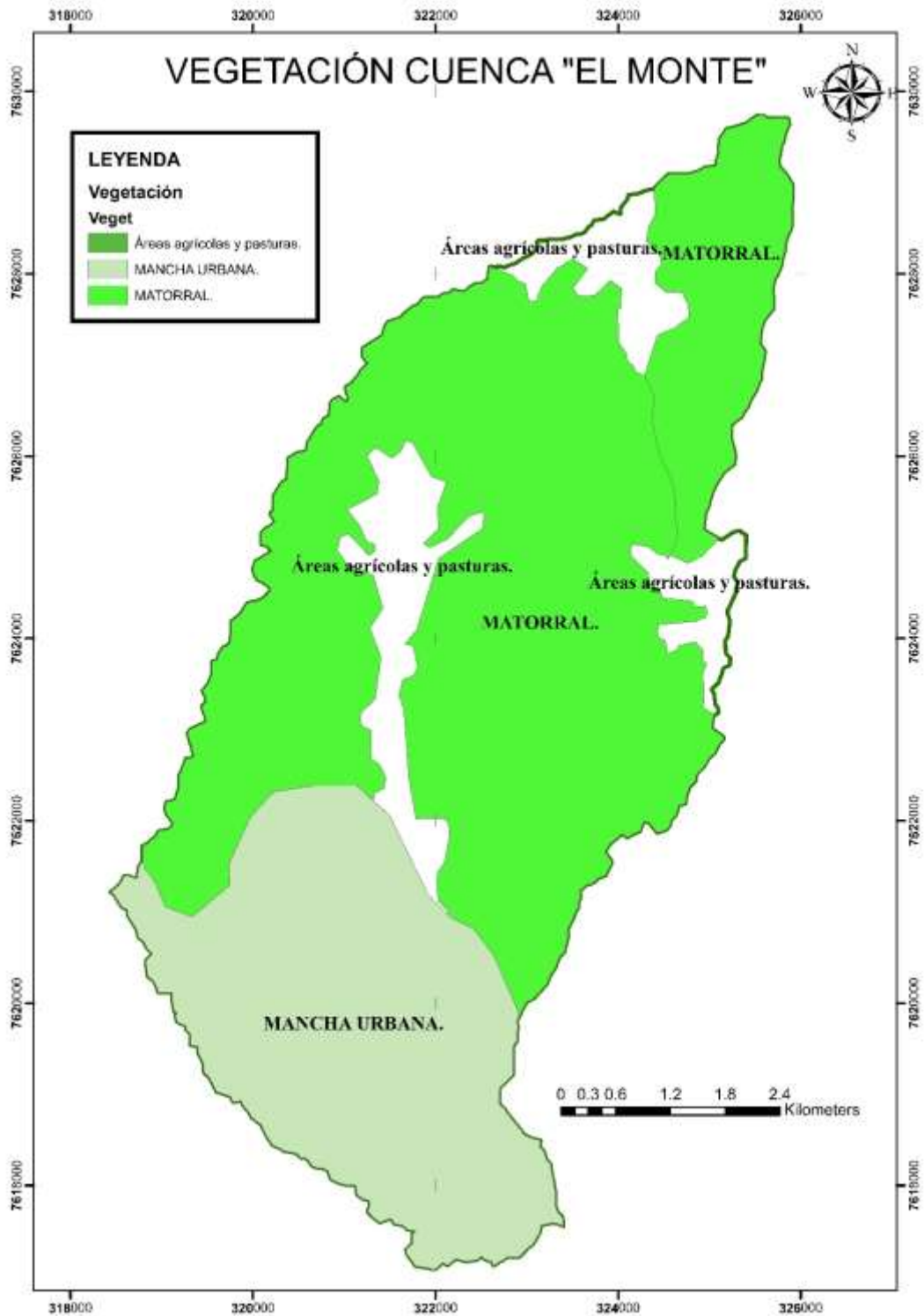


Figura 2.5. Caracterización de vegetación según Ven Te Chow en la quebrada “El Monte”.

Fuente: Elaboración propia, basada en modelación hidrológica en ArcGIS.

2.3.2.3. Clima

El clima que presenta la cuenca de la quebrada “El Monte” es de tipo subhúmedo seco, lo que significa que es caracterizado por un régimen de lluvias estacionales abundantes y una variación de lluvias de menos del 25% de un año al otro. En verano la temperatura generalmente supera los 30°C y en invierno desciende a temperaturas menores a los 0°C.

2.3.3. Parámetros fisiográficos de la cuenca

2.3.3.1. Área

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia, que caen sobre ella, tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La cuenca hidrográfica constituye la unidad de gestión del recurso hidráulico, y por definición es el territorio donde las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde el agua forma una unidad autónoma o diferenciada de otras, aún sin que desemboque en el mar.

Tradicionalmente, la delimitación de cuencas se ha realizado mediante la interpretación de los mapas cartográficos. Este proceso ha ido evolucionando con la tecnología; hoy en día, con los sistemas de información geográfica (SIG) y los Modelos Digitales de Elevación se puede delimitar el área de escurrimiento en forma sencilla.

El área de la cuenca se lo estimo a partir de una modelación en el software ArcGis 10.3.

El área de la cuenca en proyección horizontal es:

$$A = 41,16 \text{ Km}^2$$

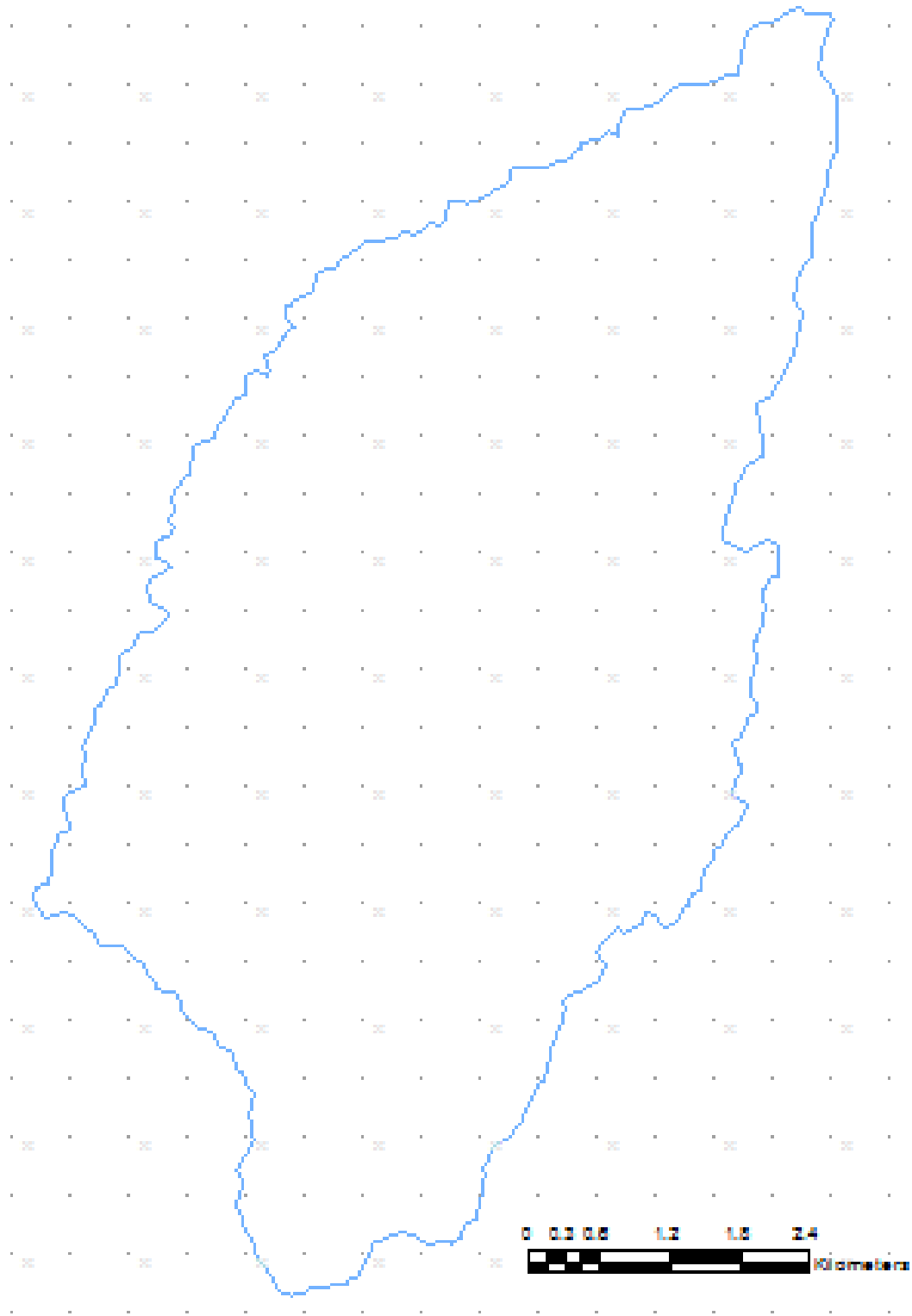


Figura 2.6. Área de la cuenca quebrada “El Monte”.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.3.2. *Perímetro*

El perímetro de la cuenca se lo estimo a partir de una modelación en el software ArcGis 10.3.

El contorno de la cuenca en proyección horizontal es:

$$P = 32,68 \text{ Km}$$

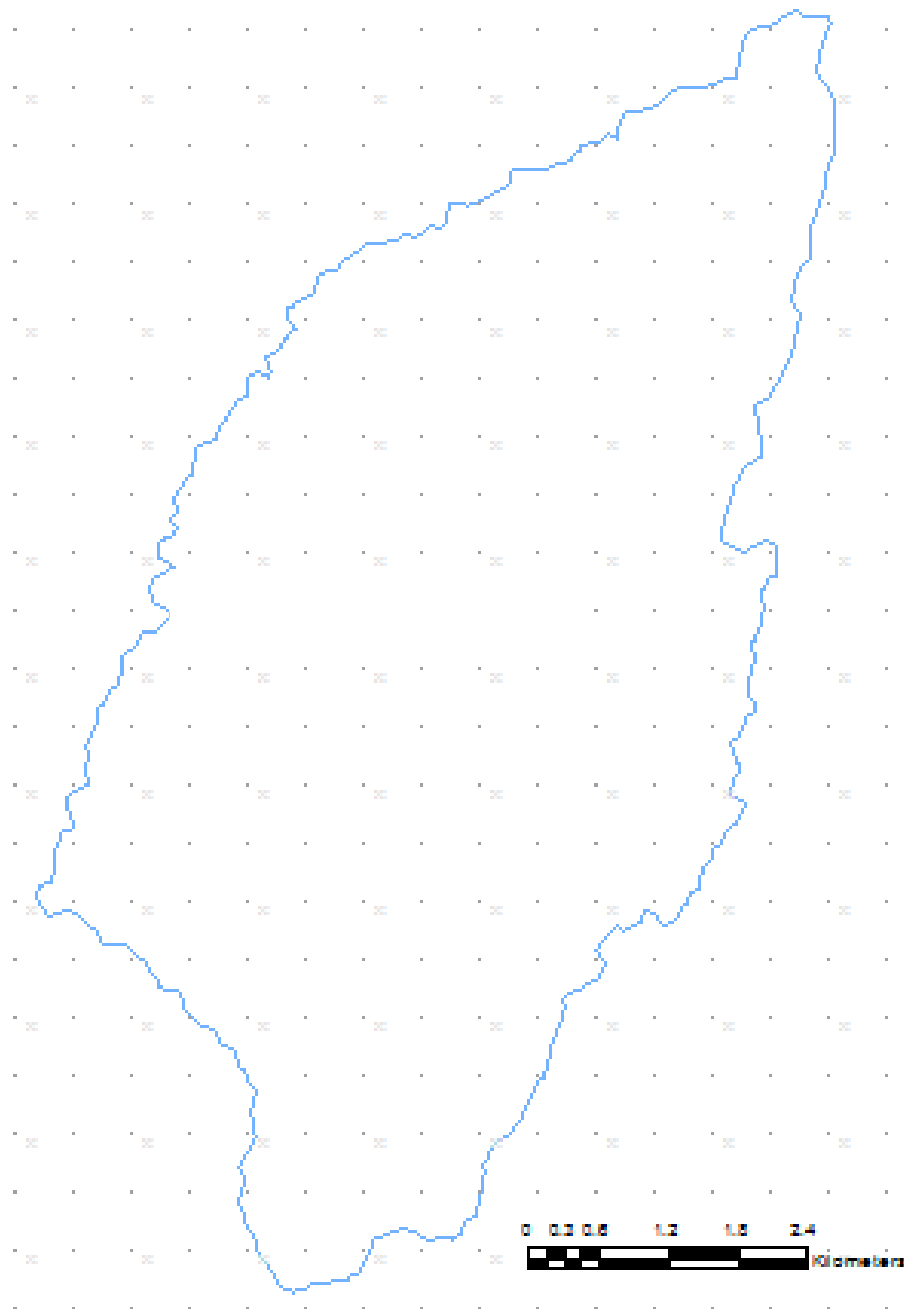


Figura 2.7. Perímetro de la cuenca quebrada “El Monte”.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3.3. Longitud de la cuenca

Es la longitud medida desde la salida de la cuenca hasta el límite de la divisoria paralela al cauce principal, a lo largo de una línea recta, se observa a detalle en la figura 2.8.

La longitud de la cuenca de quebrada “El Monte” es de 12,89 Km.

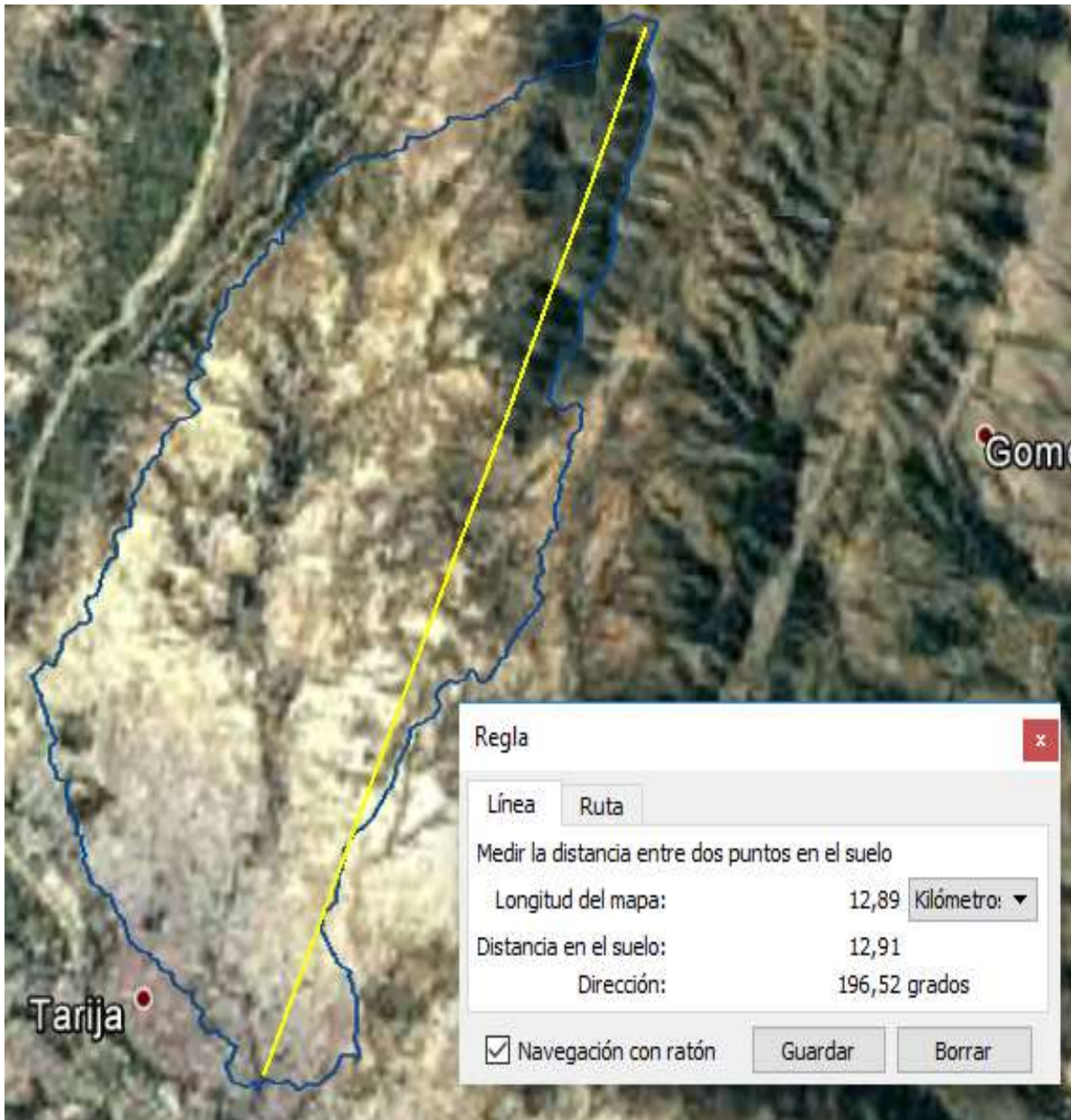


Figura 2. 8. Longitud de la cuenca L_c en Google Earth.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3.4. Forma de la cuenca

2.3.3.4.1. Índice de Horton

Horton, (1932) sugirió un factor adimensional de forma, R_f , como índice de la forma de una cuenca según la ecuación:

$$R_f = \frac{A_c}{L_c^2}$$

Donde:

R_f = índice de forma

A_c = área de la cuenca

L_c = longitud de la cuenca

Esta variable intenta evaluar la elongación de una cuenca de drenaje. El valor resultante solo da idea, qué tan cerca o lejos se está de la forma del círculo, cuyo valor $R_f = 0.79 (\pi/4)$.

$$R_f = \frac{41,16}{11,9^2} = 0,29$$

Los valores de factor de forma que propone Horton se estiman a partir de la tabla 2.3.

VALOR DE R_f	FORMA DE LA CUENCA
> 0,22	Muy alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,30 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada, ni ensanchada
0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80 – 1,20	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeado el desagüe

Tabla 2.3. Valores de factor de forma.

Fuente: (Jardí, 1985).

A partir de la tabla 2.3 podemos estimar que la cuenca en estudio tiene una forma alargada.

2.3.3.5. Características de la red de drenaje

2.3.3.5.1. Tipo de corriente

El régimen de escurrimiento del río adopta el régimen de precipitaciones sobre la cuenca. El caudal empieza a aumentar desde el mes de octubre y alcanza su máximo pico el mes de febrero, para descender meses más tarde. Entre los meses de mayo a septiembre se pierde el caudal en su totalidad; por lo tanto, el tipo de corriente que fluye por esta cuenca es efímera, es decir, que solo conduce agua durante las lluvias o inmediatamente después de éstas. (Lindsey, Kohler, & Paulus, 1977)

El agua que escurre sobre la quebrada “El Monte” es de baja calidad, esto debido a que gran parte del cauce pasa por la ciudad y este mismo es contaminado por la basura vertida en el lecho de su cauce. Existe una estación lluviosa en verano y una estación seca en invierno. El 98% de lluvias anuales cae de octubre a abril siendo un total de época húmeda de 7 meses; además en la estación húmeda del verano el régimen de las precipitaciones no es uniforme sino variable, con aguaceros intensos concentrados en pocas horas y con días completamente secos.

2.3.3.5.2. Número de orden del cauce

El orden de cauce es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca (Lindsey, Kohler, & Paulus, 1977). Es un número que refleja el grado de ramificación de la red de drenaje. Existen diversos criterios para el ordenamiento de los cauces de la red de drenaje en una cuenca hidrográfica; según:

El sistema de Horton:

- Los cauces de primer orden (1) son aquellos que no poseen tributarios,
- Los cauces de segundo orden (2) tienen afluentes de primer orden,
- Los cauces de tercer orden (3) reciben influencia de cauces de segundo orden, pudiendo recibir directamente cauces de primer orden.
- Un canal de orden n puede recibir tributarios de orden $n-1$ hasta 1.

Esto implica atribuir mayor orden al río principal, considerando esta designación en toda su longitud, desde la salida de la cuenca hasta sus nacientes.

El sistema de Strahler, para evitar la subjetividad de la designación en las nacientes determina que:

- todos los cauces serán tributarios, aun cuando las nacientes sean ríos principales.
- El río en este sistema no mantiene el mismo orden en toda su extensión.
- El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.

Diversos autores coinciden en afirmar que mientras mayor sea el grado de bifurcación del sistema de drenaje de una cuenca, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al presentar una densa red de drenaje, una gota de lluvia deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad del escurrimiento es mayor. (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009)

La red de drenaje de la cuenca de quebrada “El Monte” es de orden 4 y se aprecia en la figura 2.9.

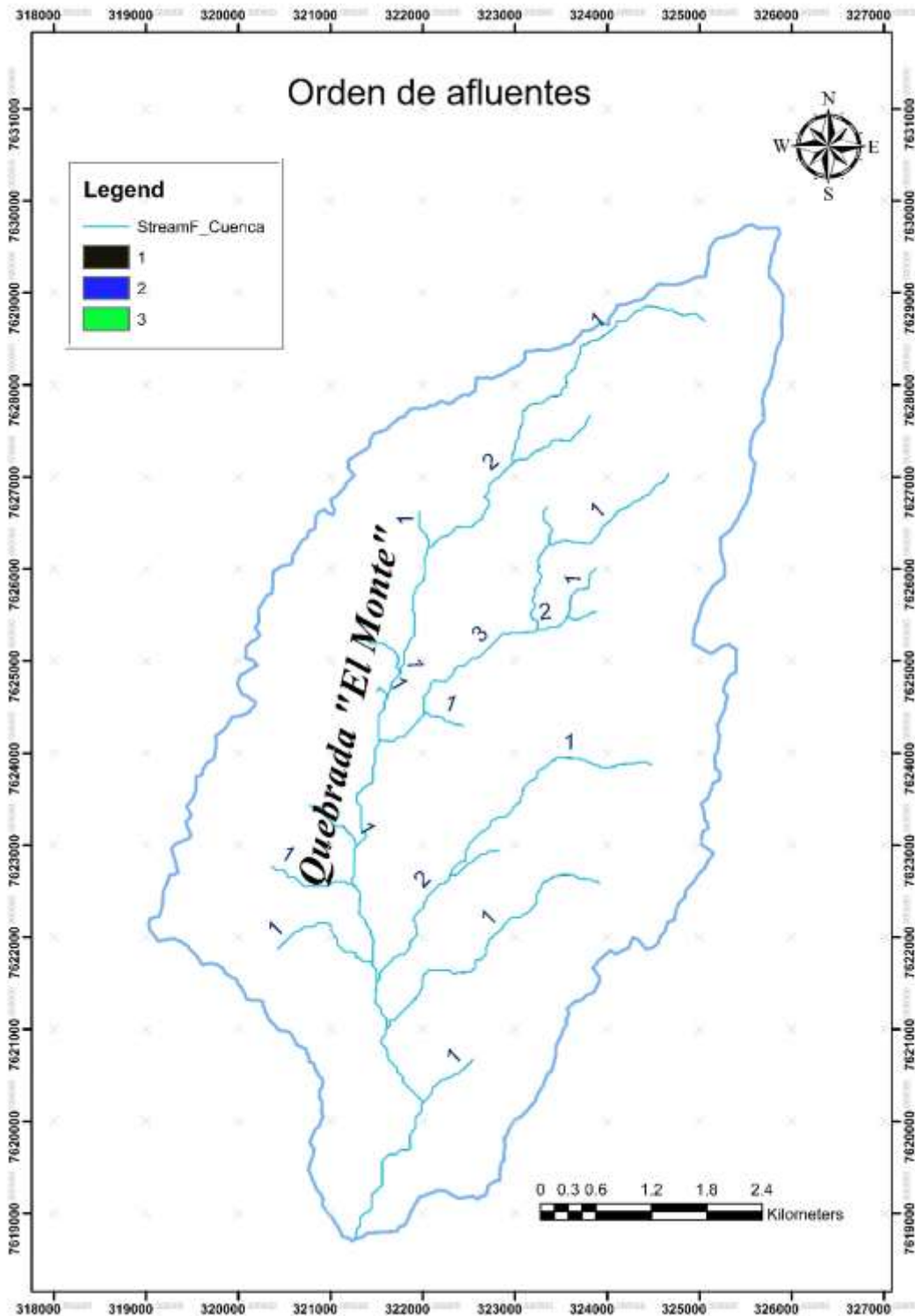


Figura 2.9. Orden de afluentes modelado en ArcGIS.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.4. Parámetros de relieve

2.3.4.1. Elevación media de la cuenca

La pendiente media de la cuenca se la estimo a partir de la modelación en el software ArcGis 10.3 partiendo desde un modelo digital de elevación (DEM) con precisión de 12,5 x 12,5 m, los resultados se pueden apreciar en la figura 2.10.

El resultado del análisis de pendientes en la cuenca resulta ser:

Pendiente media de la cuenca: $0,1232 \text{ m/m} - 12,32 \%$

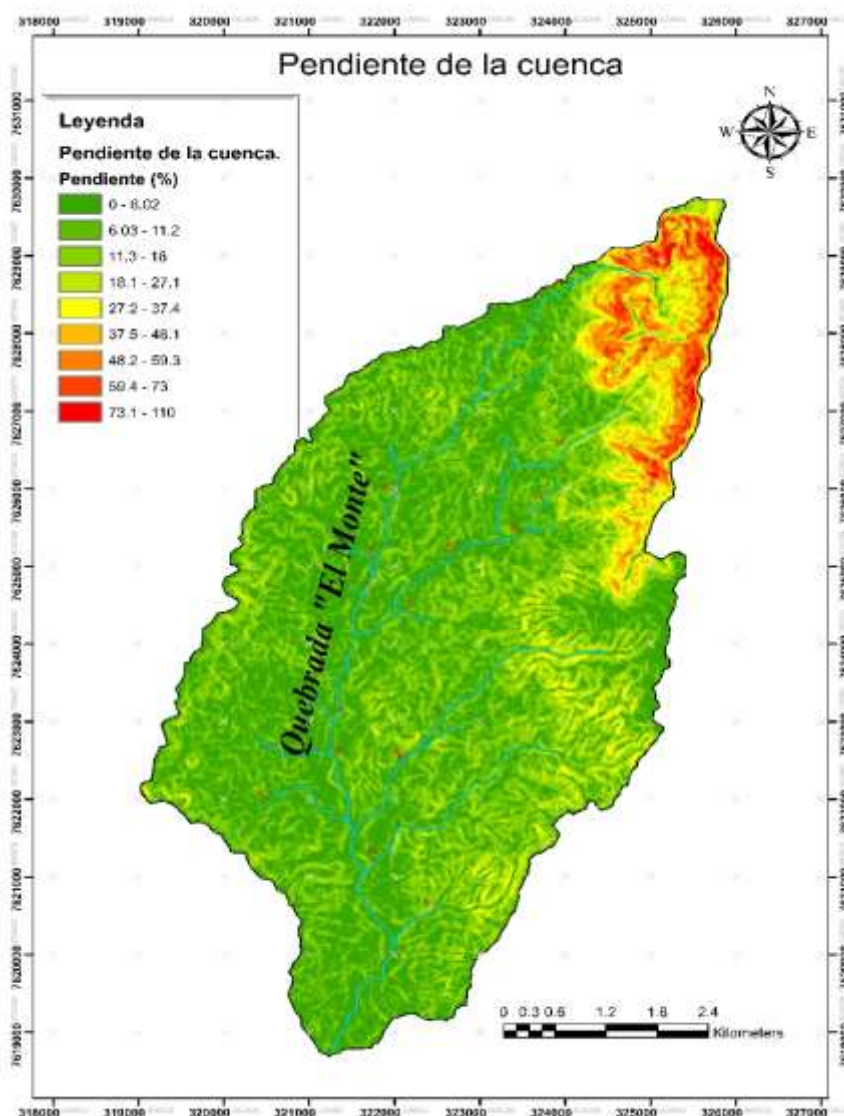


Figura 2.10. Pendiente de la cuenca quebrada "El Monte".

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4.2. Pendiente y perfil del cauce principal

La pendiente media del cauce principal se la estimo a partir de la modelación en el software ArcGis 10.3 partiendo desde un modelo digital de elevación (DEM) con precisión de 12,5 x 12,5 m, el perfil de altitudes del cauce principal se puede apreciar en la figura 2.11, esto se lo grafica con datos de altitudes del cauce principal extraídos del software que se utilizó (ArcGis 10.3).

Los resultados en base a puntos de distancia vs altura del cauce principal son los siguientes:

Altitud máxima del cauce principal: 2242 m.s.n.m.

Altitud mínima del cauce principal: 1883 m.s.n.m.

Altitud media del cauce principal: 2009 m.s.n.m.

El resultado obtenido del software para la pendiente del cauce principal es de 0.026 m/m.

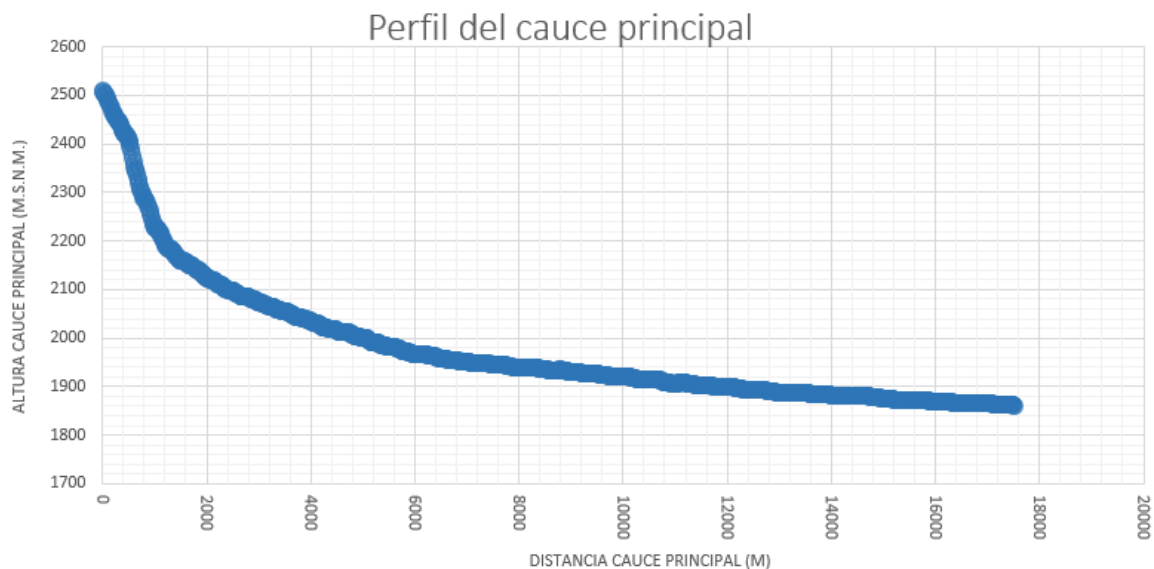


Figura 2.11. Perfil del cauce principal - quebrada "El Monte".

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Determinación de caudales máximos

2.4.1. Periodo de retorno

Período de retorno es uno de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a soportar avenidas, como por ejemplo: el vertedero de una presa, los diques para control de inundaciones; o una obra que requiera cruzar un río o arroyo con seguridad, como puede ser un puente.

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Definido como el intervalo o periodo de tiempo en el cual un evento de cierta magnitud puede ser igualado o excedido a la vez en promedio; en la tabla 2.4 se puede observar tiempos de retorno para distintas obras hidráulicas.

	TIPO DE OBRA HIDRÁULICA	Tr (Años)
1.	DRENAJE PLUVIAL	
1.1.	Lateral libre en calles de poblados donde se tolera encharcamiento de corta duración	2
1.2.	Lateral libre en calles de poblados donde no se tolera encharcamiento temporal	2
1.3.	Zonas agrícolas	5
1.4.	Zonas urbanas:	
	a) Poblados pequeños con menos de 100.000 habitantes	2 - 5
	b) Poblados medianos entre 100.000 y 1.000.000 de habitantes	5 - 10
	c) Poblados grandes con más de 1.000.000 de habitantes	10 - 25
1.5.	Aeropuertos, estaciones de ferrocarril y autobuses	10
1.6.	Cunetas y contra cunetas en caminos y carreteras	5
2.	ALCANTARILLAS PARA PASO DE PEQUEÑAS CORRIENTES	
	a) En caminos locales que comunican poblados pequeños	10 - 25
	b) En caminos regionales que comunican poblados medianos	25 - 50
	c) En caminos primarios que comunican ciudades	50 - 100
3.	ENCAUZAMIENTO DE CORRIENTES	
3.1.	Corrientes libre en zona:	
	a) Agrícola de pequeña extensión, menor a 1.000 Ha.	10 - 25
	b) Agrícola de mediana extensión, de 1.000 a 10.000 Ha.	25 - 50
	c) Agrícola de extensión grande, mayor a 10.000 Ha	50 - 100
	d) Para protección a poblaciones pequeñas, menor a 100.000 habitantes	50 - 100
	e) Para protección a poblaciones medianas, entre 100.000 y 1.000.000 de habitantes	100 - 500
	f) Para protección a poblaciones grandes, mayor a 1.000.000 habitantes	500 - 1000

Tabla 2.4. Periodos de retorno sugeridos en obras hidráulicas.

Fuente: (San Diego State University, 2010).

2.4.2. *Tiempo de concentración*

Representa el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia que cae en el extremo más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa. Por lo tanto, el tiempo de concentración sería el tiempo de equilibrio o duración necesaria para que; con una intensidad de escorrentía constante; se alcance el caudal máximo.

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

Diversos son los autores y los procedimientos de cálculo utilizados para establecer una mejor relación, pero entre si tienen grandes diferencias entre los resultados. Sin embargo las fórmulas empíricas dan valores más reales y con mejor ajuste a datos experimentales (Administradora Boliviana de Carreteras, 2011), algunas fórmulas empíricas se detallan así:

- FÓRMULA DE CHEREKE.

$$T_c = \left[0.871 * \frac{(J)^3}{H} \right]^{0.385} \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración (horas).

L: Longitud del río principal (km).

S=J: Diferencia entre cotas del cauce principal (m).

- FÓRMULA DE GIANDOTTI.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * J * L} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración (horas).

A: Área de la cuenca (km²).

L: Longitud del río principal (km).

S=J: Pendiente media del río principal (m/m).

- FÓRMULA CALIFORNIA

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{J}} \right)^{0.77} \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

Dónde:

Tc Tiempo de concentración (horas).

L: Longitud del río principal (km).

S=J: Pendiente media del río principal (m/m).

- FÓRMULA VENTURA Y HERAS

$$T_c = 0.05 * \sqrt[3]{\frac{A}{S}} \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración (horas).

A: Área de la cuenca (km²).

S=J: Pendiente media del río principal (m/m).

- FÓRMULA KIRPICH

$$T_c = 0.06626 * \left[\frac{L^2}{S} \right]^{0.385} \quad \text{(Ecuación 2.5.)}$$

Dónde:

Tc Tiempo de concentración (horas).

L: Longitud del río principal (km).

S=J: Pendiente media del río principal (m/m).

- FÓRMULA TÉMEZ

$$T_c = 0.3 * \left[\frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.76}$$

(Ecuación 2.6.)

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración (horas).

L: Longitud del río principal (km).

S=J: Pendiente media del río principal (m/m).

El tiempo de concentración de la cuenca “El Monte” se lo estimó mediante las fórmulas:

- Chereque
- California
- Ventura H
- Kirpich

Se utilizaron estas 4 fórmulas debido a que calculan el tiempo de concentración con los mismos factores (Longitud y pendiente del cauce principal), además de que los resultados de estas son similares. El tiempo de concentración se lo verificó con la velocidad media del río principal y el resultado fue de 2,01 horas, el cálculo se lo detalla en el anexo B.

$$T_c = 2,01 \text{ horas}$$

- **Tiempo de retardo**

Es el tiempo que se presenta en el hidrograma unitario del SCS de manera temporal, el cuál es el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma de P_{neto} hasta la punta del hidrograma, numéricamente este es el 60% del tiempo de concentración.

$$T_L = 1,20 \text{ horas}$$

2.4.3. Número de curva (CN)

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service – NRCS), originalmente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service - SCS) para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad. La metodología del número de la curva (CN), es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva, surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. La representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe), permitió obtener una familia de curvas que fueron estandarizadas a partir de un número adimensional de curva CN, que varía de 1 a 100, según sea el grado del escurrimiento directo. Así un número de la curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre y un CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra.

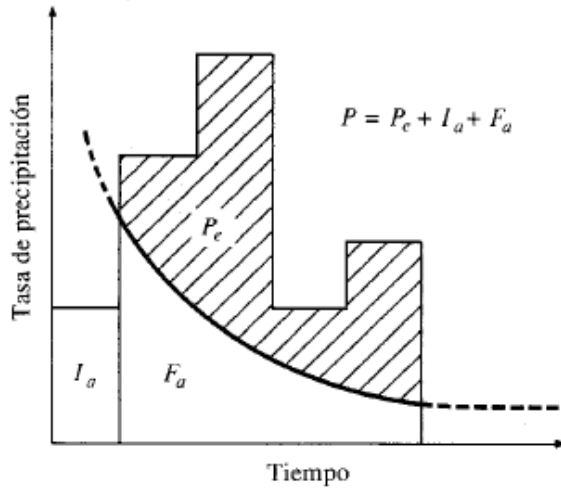
Este método de pérdidas por infiltración llamado número de curva propuesto por el SCS, dice que para la tormenta como un todo, la altura de precipitación efectiva o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S; como se aprecia en la Figura 2.12.

Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (Abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego de eso, la escorrentía potencial es la diferencia entre P e I_a , la ecuación 2.7 es la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método SCS.

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad \text{(Ecuación 2.7.)}$$

Se puede adoptar la relación empírica $I_a=0,2*S$, con base en esto se tiene:

$$P_e = Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad \text{(Ecuación 2.8.)}$$



Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS: I_a = abstracción inicial, P_e = exceso de precipitación, F_a = abstracción continuada, P = precipitación total.

Figura 2.12. Variables en el método de abstracciones del SCS.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Al representar en gráficas la información de P y P_e para muchas cuencas, el SCS encontró curvas características. Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional de curva CN, tal que $0 \leq CN \leq 100$.

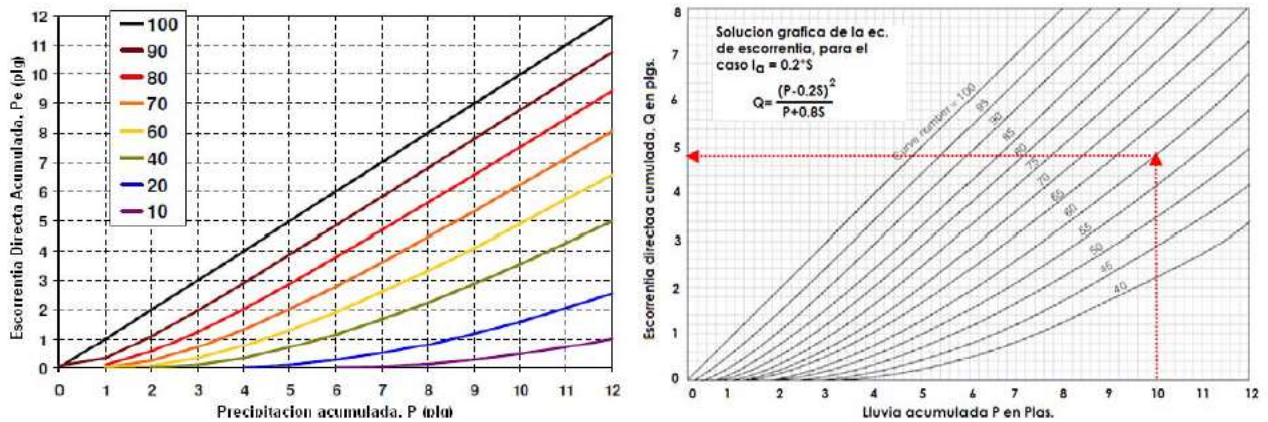


Figura 2.13. Relación entre P y Pe según NRCS.

Fuente: (U.S. Natural resources conservation system, 2009)

El número de curva y la retención potencial máxima S se relacionan por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ (Pulg)} \quad \text{Ecuación 2.9.}$$

Un factor importante a tener en cuenta en estas curvas son las condiciones antecedentes de humedad (Antecedent Moisture Conditions), las cuales se agrupan en tres condiciones básicas (Tabla 2.5.).

AMC (I)	Condiciones secas
AMC (II)	Condiciones normales
AMC (III)	Condiciones húmedas

Tabla 2.5. Condiciones antecedentes de humedad básicas.

Fuente: (Soil Conservation Service, 1972).

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales, y se establecen las siguientes relaciones para las otras dos condiciones:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad \text{Ecuación 2.10.}$$

$$CN(I) = \frac{23CN(II)}{10 - 0.13CN(II)} \quad \text{Ecuación 2.11.}$$

El método del CN, presenta en la tabla 2.6 los rangos para estimar condiciones de humedad antecedente (AMC), considerando el antecedente de 5 días de lluvia, el cual es simplemente la suma de la lluvia, de los 5 días anteriores al día considerado.

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Tabla 2.6. Clasificación de antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

Fuente: (Soil Conservation Service, Antecedent Moisture Conditions, 1972)

Condición I: Suelo seco; No aplicable a crecida de proyecto; Caudales chicos. Los suelos en la cuenca están secos, pero no hasta el punto de marchitamiento, cuando se aran o se cultivan bien. Esta condición no se considera aplicable al cálculo para determinar la avenida de proyecto porque resulta caudales chicos.

Condición II: Suelo medio; Asociado a crecidas anuales o promedios. Los suelos en la cuenca, se encuentran en estado de humedad normal.

Condición III: Suelo húmedo; Crecidas máximas; Caudales grandes. Los suelos en la cuenca se encuentran en estado muy húmedo, esto se presenta cuando ha llovido mucho o poco y han ocurrido bajas temperaturas durante los cinco días anteriores a la tormenta, y el suelo está casi saturado.

Los números de curva han sido tabulados por el Servicio de Conservación de Suelos en base al tipo y uso de suelo. En función del tipo de suelo se definen cuatro grupos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento y limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento y marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. (Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009)

NOTA: *Los resultados obtenidos del número de curva y propiedades de la cuenca se los aprecia en “Anexo A – Hidrología”.*

2.4.4. Tormenta de proyecto o diseño

Se define tormenta el conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. Una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días, y puede abarcar desde una zona pequeña hasta una extensa región. (Chereque Morán, 1989)

Una tormenta de diseño en un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-

escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un histograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, o mediante un mapa de isoyetas que especifique el patrón espacial de la precipitación. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de histogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas o en el diseño de vertederos en proyectos que involucren grandes embalses (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

De las tormentas interesa conocer las curvas Intensidad-duración-frecuencia, que se definen a continuación (Villón Béjar, 2002):

- a) La Intensidad, es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Lo que interesa particularmente de cada tormenta, es la intensidad máxima que se haya presentado, ella es la altura máxima de agua caída por unidad de tiempo. De acuerdo a esto la intensidad se expresa así:

$$i_{max} = \frac{P}{t} \qquad \text{Ecuación 2.12.}$$

Dónde: i_{max} = intensidad máxima, en mm/hora.

P = precipitación en altura de agua, en mm.

t = tiempo, en horas.

- b) La Duración, corresponde al tiempo que transcurre entre el comienzo y el fin de la tormenta. Aquí conviene definir el periodo de duración, que es un determinado periodo de tiempo, tomado en minutos u horas, dentro del total que dura la tormenta. Tiene mucha importancia en la determinación de las intensidades máximas. Tanto la duración como la intensidad pueden conseguirse de registros pluviográficos.

- c) La Frecuencia, es el número de veces que se repite una tormenta, de características de intensidad y duración definidas en un periodo de tiempo más o menos largo, tomado generalmente en años.
- d) Periodo de Retorno, intervalo de tiempo promedio, dentro el cual un evento de magnitud x, puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Representa el inverso de la frecuencia, es decir:

$$T = \frac{1}{f} \qquad \text{Ecuación 2.13.}$$

Dónde: T = periodo de retorno, en años.

f = frecuencia de las tormentas.

La intensidad de precipitación, varía en cada instante durante el curso de una misma tormenta, de acuerdo a las características de ésta. Es absolutamente indispensable, cuando se hace el análisis de las tormentas, determinar estas variaciones, porque de ellas dependen muchas de las condiciones, que hay que fijar para las obras de ingeniería hidráulica, para las que se hacen principalmente esta clase de estudios. Esto se consigue mediante dos gráficos: el histograma y la curva masa de precipitación (Villón Béjar, 2002):

- a) Hietograma, es un gráfico de forma escalonada como un histograma, que representa la variación de la intensidad expresada en mm/hora de la tormenta, en el transcurso de la misma expresada en minutos u horas, ver figura 2.14. Mediante el hietograma es muy fácil decir a qué hora, la precipitación adquirió su máxima intensidad y cuál fue el valor de ésta.
- b) Curva masa de precipitación, es la representación de la precipitación acumulada versus el tiempo, ver figura 2.15. Se extrae directamente del pluviograma. Es una curva no decreciente, la pendiente de la tangente en cualquier punto, representa la intensidad instantánea en ese tiempo.

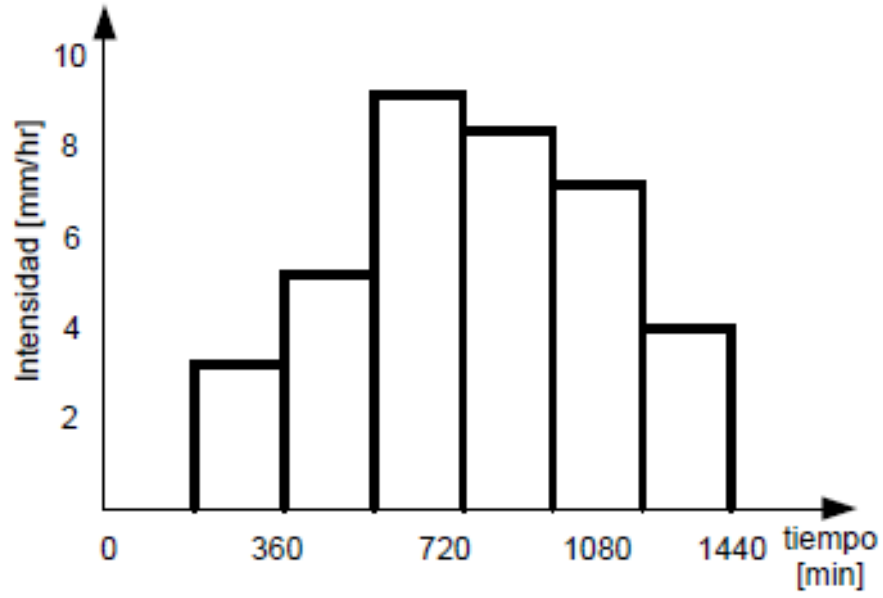


Figura 2.14. Hietograma de precipitación.
Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

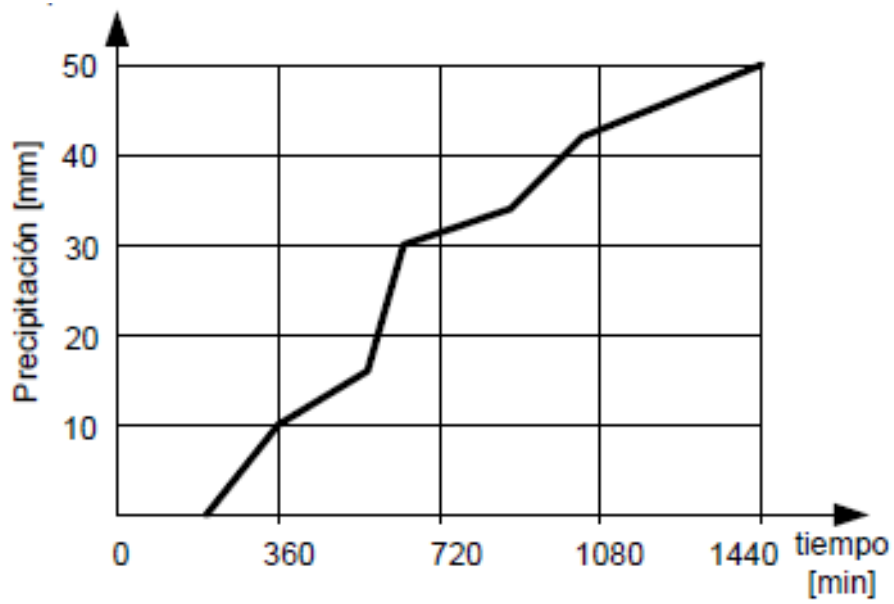


Figura 2.15. Curva masa de precipitación.
Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

2.4.5. Procesamiento y análisis de datos estación “El Tejar”

La estación seleccionada para el estudio de la cuenca en estudio fue la estación “El Tejar”, debido a la proximidad que tiene con la cuenca de la quebrada “El Monte”, de igual manera por los datos de gran significancia que ésta estación posee, la información pluviométrica de dicha estación fue proporcionada por el servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI).

La estación pluviométrica de “El Tejar” se ubica geográficamente de la siguiente manera:

Latitud (S): 21° 32’ 35’’

Longitud (O): 64° 43’ 16’’

Altitud: 1859 m.s.n.m.

Los registros de precipitación máxima que se utilizó para esta estación son de un periodo que comprende los años 1974 y 2012. (Ver Anexo A – Hidrología.)

2.4.5.1. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estación “El Tejar”

Los datos de curvas IDF para la estación “El Tejar”, para este trabajo, se los obtuvo a partir del trabajo de investigación “*relaciones IDF mediante la caracterización temporal de eventos extremos máximos de precipitación aplicación en las ciudades de Potosí, Sucre y Tarija*” realizado en el año 2013 por Fernando Iturry con colaboración y aval del servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI) y el instituto de hidráulica e hidrología (IHH) en la ciudad de La Paz – Bolivia, dicho estudio realiza un modelo de intensidades de precipitación partiendo de datos bandas pluviométricas de la estación “El Tejar” para la situación de Tarija, a continuación se da a conocer las metodologías y resultados que nos brinda dicho estudio.

La finalidad de realizar un análisis de correlación no lineal múltiple, es el de determinar una ecuación que relacione los tres parámetros fundamentales como son la intensidad, la duración y el periodo de retorno, a partir de la información de precipitación e intensidades halladas en el análisis de frecuencias. El método nos permitirá hallar los coeficientes de las ecuaciones en función a tres grupos de variables de partida: las intensidades, las duraciones y los

periodos de retorno; se aplicaron en el análisis las ecuaciones de Bernard, Sherman y Chow, ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16 respectivamente; y se determinó para cada ecuación los errores estándares, los coeficientes de determinación múltiple y los coeficientes de correlación múltiple para conocer si dicha ecuación representaba con una buena precisión los valores de partida.

$$I = \frac{K \cdot T^m}{(D + b)^n}, \text{ modelo propuesto por Sherman, 1931.} \quad \text{Ecuación 2.14.}$$

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n}, \text{ modelo propuesto por Bernard, 1932.} \quad \text{Ecuación 2.15.}$$

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n + b}, \text{ modelo propuesto por Chow, 1994.} \quad \text{Ecuación 2.16.}$$

Con la finalidad de determinar modelos que se ajusten con más precisión a la información de partida, se planteó también generar ajustes con dos ecuaciones de un mismo modelo, que tendrán un rango de aplicación dividido entre los 5 min y 1440 min de duración.

En primer lugar presentaremos el ajuste a sólo una ecuación, el que es el mejor modelo de las tres ecuaciones. La Tabla 2.7, muestra la comparación de los coeficientes hallados para las tres ecuaciones, de las cuales se eligió como la mejor ecuación la que tenga el más elevado coeficiente de correlación y el menor error mínimo cuadrático.

La tabla 2.7 muestra que la ecuación que se ajusta con menos errores y mayor coeficiente de correlación es la ecuación de CHOW.

Nº	Ecuación	R: Coef. Correlación	C: Error Cuadrático mínimo
1	Chow	0.9945	46.4453
2	Sherman	0.9917	56.3558
3	Bernard	0.9167	175.4589

Ecuación de Bernard

$$I = \frac{373.732 \cdot T^{0.211}}{D^{0.686}}$$

$$I = \frac{k \cdot T^m}{D^n}$$

Ecuación de Sherman

$$I = \frac{1131.693 \cdot T^{0.211}}{(D + 13.89)^{0.869}}$$

$$I = \frac{k \cdot T^m}{(D + b)^n}$$

Ecuación de Chow

$$I = \frac{821.751 \cdot T^{0.211}}{D^{0.803} + 5.614}$$

$$I = \frac{k \cdot T^m}{D^n + b}$$

Tabla 2.7. Ecuación IDF de mejor ajuste para el rango de duraciones: $5 \text{ min} \leq D \leq 1440 \text{ min}$.

Estación: El Tejar.

Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013)

A continuación, se detalla el procedimiento del método de correlación múltiple de la ecuación de Chow para la estación “El Tejar” siendo esta ecuación el modelo que más se ajusta para dicha estación sobre las ecuaciones de Sherman y Bernard.

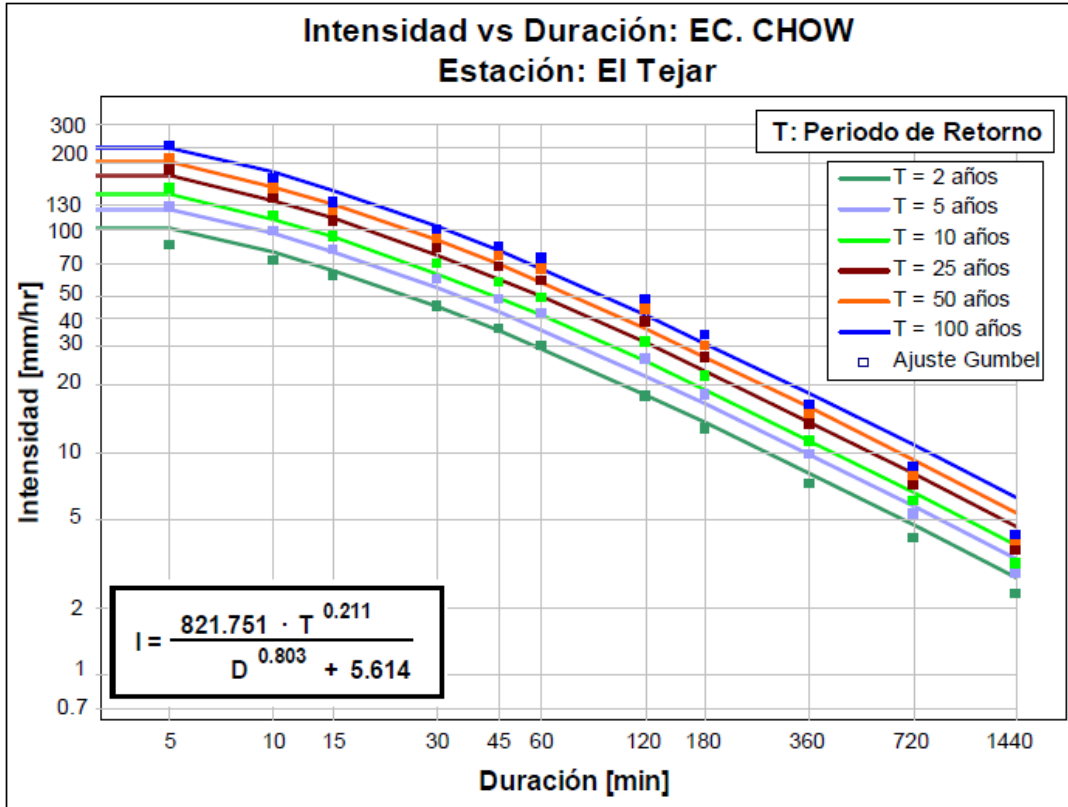


Figura 2.16. Curvas IDF del análisis de correlación no lineal múltiple para 5 min ≤ D ≤ 1440 min. Estación: El Tejar.

Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

$$I = \frac{k \cdot T^m}{D^n + b}$$

$$I = \frac{821.751 \cdot T^{0.211}}{D^{0.803} + 5.614}$$

I: Intensidad de Precipitación [mm/Hr] k = 821.751
T: Período de retorno [Años] m = 0.211
D: Duración [min] n = 0.803
 b = 5.614

Tabla de Uso Práctico

T [Años]	Intensidades [mm/hr] - Estación: El Tejar										
	Duración [min]										
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1440
2	102.815	79.536	66.055	45.426	35.447	29.407	18.208	13.554	8.046	4.708	2.732
5	124.785	96.532	80.170	55.132	43.021	35.691	22.098	16.451	9.765	5.714	3.315
10	144.473	111.762	92.818	63.831	49.809	41.322	25.585	19.046	11.305	6.616	3.838
25	175.344	135.844	112.652	77.471	60.452	50.152	31.052	23.116	13.721	8.029	4.659
50	203.009	157.045	130.426	89.694	69.990	58.064	35.951	26.763	15.886	9.296	5.394
100	235.039	181.823	151.004	103.845	81.033	67.225	41.623	30.986	18.393	10.763	6.245

Tabla 2.8. Valores de la curva IDF para duraciones: 5 min ≤ D ≤ 1440

Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

Para hallar una curva más representativa de tendencia de los puntos se decidió ajustar los valores a dos ecuaciones de un mismo modelo. Entonces se formaron dos grupos de valores de intensidades, duraciones y periodos de retorno para hacer los ajustes, de manera tal que pertenezcan a las dos tendencias claras que forman el grupo de puntos, probando varios pares de grupos, bajo los tres modelos previstos: Bernard, Sherman y Chow. Se verificó que el mejor ajuste provenía de tomar los datos de dos grupos, desde 5 min hasta 30 min y desde 45 min hasta 1440 min.

En el modelo de Chow ambas ecuaciones generan familias de curvas cuyas trayectorias, cerca de la duración de 60 minutos, no se unen existiendo un leve desplazamiento en las seis curvas, una por cada periodo de retorno ($T = 2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años). El uso de las anteriores curvas podría causar confusión cuando se requieran valores para la duraciones cercanas a 60 minutos, ya que se presentaría dos posibles valores; para evitar esta ambigüedad fue necesario determinar la intersección de ambas curvas, en la cual la intensidad será la misma en una sola duración y para un periodo de retorno determinado. (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013)

Para hallar los valores de la intensidad común se igualó las dos ecuaciones del modelo Chow, en base a la intensidad; y colocando la duración “D” en función del periodo de retorno “T”, como se muestra en la ecuación 2.17, se pudo hallar por iteraciones los valores de “D”, para los periodos de retorno designados; con ambas variables conocidas se pudo hallar las intensidades válidas para ambas ecuaciones, las mismas que integrarán las líneas para unir las familias de curvas de ambos grupos ($5 \leq D \leq 60$ min y $60 \leq D \leq 1440$ min).

$$\frac{D_T^{1.093} + 80.807}{D_T^{0.448} - 0.046} = 27.362 \cdot T^{-0.005}$$

Ecuación 2.17.

En la figura 2.17, puede verse el resultado final de las curvas IDF, donde las dos familias de curvas para la estación “El Tejar” se interceptan. (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013)

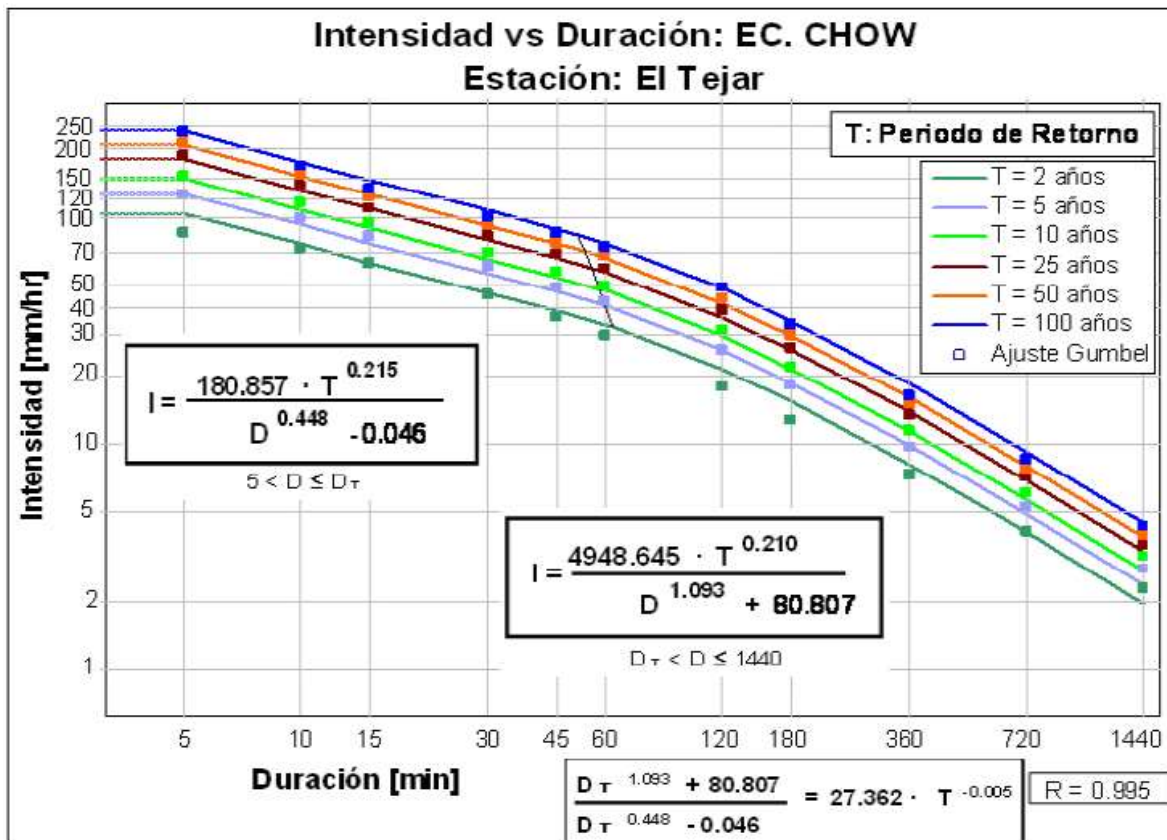


Figura 2.17. Curvas IDF del análisis de correlación no lineal múltiple para $5 \text{ min} \leq D < D_T$ y $D_T \leq D \leq 1440 \text{ min}$. Estación: El Tejar.

Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

Determinación coeficiente K_d – Estación “El Tejar”

El factor K_d es adimensional y se obtiene dividiendo las precipitaciones máximas para cada duración entre la precipitación máxima de 24 horas. Ambas precipitaciones pertenecen a un mismo periodo de retorno y son obtenidas luego de realizar el análisis de frecuencia.

$$K_d = \frac{P_d^T}{P_{24}^T}$$

Ecuación 2. 18.

Luego de realizar los cálculos encontramos una tabla con la misma cantidad de valores para las duraciones y periodos de retorno establecidos. La tabla 2.9, nos muestra los factores Kd. Con este grupo de factores se calculó el promedio de los valores en cada duración, obteniéndose valores únicos para las mismas, como muestra la tabla 2.10. Estos valores medios para cada duración, ya no toman en cuenta en periodo de retorno, es decir son independientes del mismo. (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013)

Kd- Estación: El Tejar											
T [años]	Duración [min]										
	5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1440
2	0.129	0.220	0.284	0.414	0.492	0.551	0.650	0.691	0.791	0.893	1.000
5	0.155	0.243	0.301	0.445	0.544	0.620	0.771	0.807	0.858	0.939	1.000
10	0.167	0.253	0.309	0.460	0.568	0.654	0.828	0.862	0.890	0.961	1.000
25	0.179	0.264	0.317	0.474	0.592	0.686	0.884	0.916	0.921	0.982	1.000
50	0.186	0.270	0.322	0.483	0.607	0.706	0.918	0.948	0.940	0.995	1.000
100	0.192	0.275	0.326	0.490	0.619	0.722	0.946	0.975	0.956	1.005	1.000
Promedio	0.168	0.254	0.310	0.461	0.570	0.656	0.833	0.867	0.893	0.963	1.000
Desv. Estándar	0.023	0.020	0.015	0.028	0.047	0.063	0.109	0.105	0.061	0.041	0.000

Tabla 2.9. Valores del factor Kd y su promedio, para $5 \text{ min} \leq D \leq 1440 \text{ min}$. Estación: El Tejar.

Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

Kd - Estación: El Tejar										
Duración [min]										
5	10	15	30	45	60	120	180	360	720	1440
0.168	0.254	0.310	0.461	0.570	0.656	0.833	0.867	0.893	0.963	1.000

Tabla 2.10. Valores del factor Kd independientes del periodo de retorno, para $5 \text{ min} \leq D \leq 1440 \text{ min}$. Estación: El Tejar.

Fuente: (Iturry Urquizo, SENHAMI, & IHH, 2013).

NOTA: *Los valores obtenidos en la tabla 2.10, se utilizaron para realizar los hietogramas de diseño para la estación “El Tejar” para la estimación de caudales máximos con el software HEC-HMS. (Ver Anexo A – Hidrología.)*

2.4.6. Simulación de caudales máximos

2.4.6.1. Introducción

Este documento fue elaborado utilizando la versión 4.1 del sistema de modelaje hidrológico desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de los Estados Unidos (HEC-HMS), está diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrentía en cuencas y se aplica en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar un rango general de problemas. Puede ser utilizado en pequeñas cuencas urbanas, o en grandes cuencas sin intervención, los resultados se pueden aplicar para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervenciones en cuencas, reducción del daño por inundaciones, operación de sistemas, estimación de avenidas, etc.

Los componentes del modelo son utilizados para simular la respuesta hidrológica en una cuenca. Estos incluyen; modelos de cuencas, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. En una simulación se calcula la respuesta de la cuenca dada a una precipitación, una vez definido el modelo meteorológico, las especificaciones de control definen el tiempo, y el intervalo de tiempo para el cual se realizará la simulación. (Bastidas, 2010)

2.4.6.2. Componentes del software HEC-HMS

- **Modelo de cuenca** es utilizado para representar la parte física de la cuenca. El usuario desarrolla un modelo de cuenca agregando y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos en la cuenca. La tabla 2.11 muestra una lista y descripción de los elementos hidrológicos disponibles.

Elemento	Descripción
Subcuenca (Subbasin)	El elemento subcuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. Dada la precipitación, el caudal de salida de la subcuenca es calculado restando las pérdidas de precipitación, y transformando el exceso de precipitación en caudal de salida sumándole el gasto base
Canal (Reach)	Este elemento es utilizado para trasladar el flujo aguas abajo en el modelo de cuenca. El gasto de entrada a este elemento puede venir de uno o más elementos aguas arriba. EL flujo de salida es calculado en base al tránsito y la atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (Junction)	Una unión se utiliza para unir el caudal proveniente de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida es calculado simplemente sumando todas las entradas y asumiendo que no existe almacenamiento en la unión.
Fuente (Source)	Este elemento se utiliza para introducir caudal en la cuenca, no tiene entradas, el gasto de salida es definido por el usuario.
Salida (Sink)	El elemento salida es utilizado para representar la salida de la cuenca. El gasto de entrada a este elemento puede venir de uno o más elementos. No hay gasto de salida en este elemento.
Reservorio (Reservoir)	El reservorio se utiliza para modelar la detención y atenuación de un hidrograma causada por un reservorio, estanque de detención, embalse. El gasto de entrada puede venir de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida puede ser calculado de tres formas. El usuario puede definir tablas de; almacenamiento-descarga, elevación-almacenamiento-descarga, altura-área-descarga. Se puede introducir también una relación entre la elevación y el almacenamiento o la elevación y el área y definir una o más estructuras de salida, o especificar una serie de tiempo de caudal de salida.
Desviación (Diversion)	En este elemento se modela el caudal que deja el canal principal. La entrada puede venir de uno o más elementos. La salida es de dos tipos, el caudal desviado, y el caudal que no es desviado, el desviado es calculado utilizando información de entrada, y cada una de estas salidas puede ser conectada a elementos hidrológicos.

Tabla 2.11. Descripción de los modelos hidrológicos de una cuenca en HEC-HMS

Fuente: (Bastidas, 2010).

- **Modelo de subcuencas**, existen muchos modelos matemáticos para determinar las pérdidas de precipitación, transformar el exceso en caudal, añadir el gasto base. En este manual nos referiremos como métodos para expresar los diferentes métodos matemáticos. En la tabla 2.12 se presenta la lista de los métodos disponibles para la subcuencas y los canales.

Elemento	Tipo de Calculo	Método
Subcuenca	Perdidas	Déficit y razón constante (DC)
		Exponencial
		Green y Ampt
		DC por grilla
		SCS CN por grilla
		SMA por grilla
		Inicial y razón constante
		Número de curva (CN) del Soil Conservation Service
		Smith Paralange
		Conteo de Humedad del suelo (SMA)
	Esguerrimiento en la cuenca	Hidrograma Unitario de Clark
		Onda cinemática
		Clark modificado
		Hidrograma unitario del Soil Conservation Service
		Hidrograma unitario de Snyder
		Curva S especificada por el usuario
		Hidrograma unitario especificado por el usuario
	Flujo Base	Recesión delimitada
		Mensualmente constante
Reservorio lineal		
Aproximación no lineal de Boussinesq		
Recesión		
Canal	Transito	Onda cinemática
		Retraso
		Puls modificado
		Muskingum
		Muskingum-Cunge
		""STRADDLE STAGGER""
	Perdidas / Ganancias	Constante
		Percolación

Tabla 2.12. Métodos para los cálculos en las subcuencas y los canales

Fuente: (Bastidas, 2010).

- **Modelo meteorológico** calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Se puede utilizar precipitación puntual o por grillas, tiene la capacidad de modelar precipitación sólida y líquida junto con evapotranspiración. También posee un método de cálculo de derretimiento de nieve utilizando un algoritmo de temperatura. Los métodos para la evapotranspiración incluyen el promedio mensual, el método de Priestel y Taylor, y el mismo método en forma de grilla. Un método de evapotranspiración es requerido solo cuando se modelan respuestas hidrológicas en largos períodos de tiempo. Una breve descripción de los métodos disponibles para calcular la precipitación promedio o precipitación por grillas se presenta en la Tabla 2.13.

Métodos para la precipitación	Descripción
Frecuencia de las tormentas (Frequency Storm)	Este método es utilizado para desarrollar un evento de precipitación en el cual el valor de la precipitación para diferentes duraciones tiene una probabilidad de excedencia consistente.
Estaciones por peso (Gage Weights)	Este método permite asignar pesos a las diferentes estaciones definidas por el usuario.
Precipitación por grilla (Gridded Precipitation)	Este método permite el uso de precipitación por grilla, tal como puede ser la proveniente de un radar meteorológico.
Inverso de la distancia (Inverse Distance)	Este método calcula el promedio en la subcuenca aplicando la ecuación del inverso de la distancia al cuadrado para las estaciones definidas por el usuario.
Tormenta del SCS (SCS Storm)	Este método aplica una distribución específica del SCS a una tormenta con una duración total de 24 horas.
Hietograma especificado (Specified Hyetograph)	En este método el usuario introduce el hietograma para la subcuenca.
Tormenta estándar de proyecto (Standard Project Storm)	Este método aplica una distribución en el tiempo a un valor de precipitación dado.

Tabla 2.13. Métodos del modelo meteorológico

Fuente: (Bastidas, 2010).

- **Especificaciones de control** fijan el tiempo de duración de cada corrida de una simulación. La información en las especificaciones de control incluye una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación.
- **Datos de entrada**, series de tiempo, las series de pares, los datos de las grillas son requeridos generalmente como condiciones de borde en los modelos de cuencas y meteorológicos, los datos de entrada se especifican en la tabla 2.14.

Series de tiempo	Series de pares	Datos de grillas
Precipitación	Caudal-Almacenamiento	Precipitación
Caudal	Altura-Almacenamiento	Temperatura
Niveles	Altura-Caudal	Radiación solar
Temperatura	Caudal de entrada-Bifurcado	Crecimiento de Cultivos
Radiación Solar	Secciones transversales	Capacidad de Almacenamiento
Coefficientes de cultivos	Hidrograma unitario	Tasa de percolación
Equivalente de agua	Curvas de porcentaje	Coefficiente de almacenamiento
en la nieve	Tasa de derretimiento ATI	Déficit de humedad
	Tasa de enfriamiento ATI	Áreas impermeables
	Patrones del derretimiento	Número de curva del SCS
	del suelo	Elevación
	Patrones de la tasa de	Contenido de frío
	derretimiento	Contenido de frío ATI
		Tasa de derretimiento ATI
		Contenido de agua líquida
		Equivalente de agua contenida en la nieve

Tabla 2.14. Datos de entrada al software

Fuente: (Bastidas, 2010).

2.5. Resultados simulación de crecidas HEC-HMS

Los datos que se ingresó en el paquete HEC-HMS para obtener los caudales de crecida en periodos de retorno de 50, 100 y 500 años fueron: el área de la cuenca, el número de curva (CN) de la cuenca, los hietogramas de diseño para los distintos periodos de retorno de la estación “El Tejar” y el tiempo de retardo obtenido desde el tiempo de concentración, en el Anexo A se apreciarán los resultados de hidrogramas obtenidos, como también el procedimiento que se utilizó para la obtención de resultados.

La simulación se la realizo para AMC (II) en condición normal.

Resultados para AMC (II) condición normal:

T (años)	Q (m ³ /s)
50	214,8
100	246,5
500	324,2

Tabla 2.15. Resultados caudales obtenidos por la simulación AMC (II).
Fuente: Elaboración propia basado en resultados del HEC-HMS.

CAPÍTULO III

3. Hidráulica Fluvial

3.1. Generalidades

Esta rama de la hidráulica estudia el comportamiento de los ríos cualquiera que sea la finalidad del proyecto (represamiento, defensas de ribera en ríos, canalizaciones, puente, etc.). La ingeniería fluvial nos enseña cómo intervenir en el río, cómo trabajar “con el río”, para lograr los fines de un determinado proyecto, en este para garantizar la canalización de la quebrada “El Monte”.

La hidráulica fluvial no puede comprenderse ni aplicarse aisladamente de una serie de disciplinas de ingeniería que le son complementarias. Así, la hidráulica fluvial se ubica dentro de la hidráulica general y de la hidráulica de canales en particular. La meteorología y la hidrología resultan indispensables para el estudio de una de las fases del fenómeno fluvial. Como así también se puede mencionar a la geología, la geomorfología y las disciplinas afines constituyen fundamento importante para la mejor comprensión del comportamiento fluvial. (Rocha Felices, 1998)

3.2. Hidráulica en canales abiertos

3.2.1. *Introducción*

El flujo en canales abiertos tiene lugar cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente envueltos por un contorno sólido. En el flujo de canales abiertos, el líquido que fluye tiene superficie libre y sobre él no actúa otra presión que la debida al peso del propio líquido y a la presión atmosférica.

El flujo en canales abiertos tiene lugar en la naturaleza en ríos, arroyos, etc. De forma artificial (es decir, construido por el humano) tiene lugar en los canales, acequias y canales de desagüe.

3.2.2. *Tipos de flujo*

Se puede clasificar el flujo en canales de varias formas, las principales son:

Uniforme: la velocidad del fluido no cambia ni en magnitud ni en dirección y la superficie del líquido es paralela al fondo del canal. Solo ocurre cuando la sección del canal es constante.

No uniforme: la superficie del líquido no es paralela al fondo (también se llama variado). El cambio de profundidad puede ser brusco o suave y entonces tenemos dos subdivisiones:

-Flujo variado rápido

-Flujo variado gradual

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado principalmente por efectos de viscosidad y gravedad en relación con fuerzas inerciales de flujo y este divide este comportamiento como se indica a continuación:

Flujo laminar: El flujo es laminar si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales, de tal manera que en este tipo de flujo las partículas de agua se mueven con trayectorias definidas y bastante regulares, sin que exista mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas.



Figura 3. 1. Flujo laminar

Fuente: Elaboración propia.

Flujo turbulento: Este tipo de flujo es el que más se presenta en la práctica de ingeniería civil. El flujo es turbulento cuando las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas de inercia. En el flujo turbulento, las partículas actúan de forma contraria al flujo permanente, es decir, que no son suaves, fijas, ni tienen una trayectoria regular, pero que en conjunto todavía representan el movimiento hacia delante de la corriente entera.



Figura 3.2. Flujo turbulento en una rápida.

Fuente: (Rodríguez, 2000).

3.2.3. *Velocidad de flujo en canales*

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción de las paredes del canal, las velocidades no están uniformemente distribuidas en su sección. La resistencia ofrecida por las paredes y el fondo del canal, reduce la velocidad. En la superficie libre, la resistencia ofrecida por la atmosfera y el viento también influye sobre esta variable. La velocidad máxima medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 5% a 25% total del tirante; cuanto más cerca de las paredes del canal, más profundo se encuentra este valor de velocidad máxima.

La distribución de velocidades en un canal depende también de otros factores como ser la rugosidad, la forma del canal y la presencia de curvas (Chow, 1994).

3.2.4. *Rugosidad en canales*

Coefficiente de Manning: En el año 1889, el ingeniero irlandés Robert Manning, presento por primera vez la ecuación durante la lectura de un artículo en una reunión del *Institute of civil engineers* en Irlanda. El artículo fue publicado más tarde en *Transactions*, posteriormente fue modificada y es la fórmula que sigue en vigencia, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$v = \frac{1}{n} * R^{2/3} * \sqrt{S} \quad \text{(Ecuación 3. 1.)}$$

Dónde:

V: velocidad media.

R: Radio hidráulico.

S: Pendiente.

n: Coeficiente de rugosidad de Manning.

La ecuación de Manning es un resultado del proceso de un ajuste de curvas, y por tanto es completamente empírica en su naturaleza. Debido a su simplicidad de forma y a los resultados satisfactorios que arroja es actualmente la fórmula más utilizada para cálculos en canales abiertos.

El valor n es muy variable y depende de una cantidad de factores. Al seleccionar un valor adecuado de n para diferentes condiciones de diseño, un conocimiento básico de estos factores debe ser considerado de gran utilidad.

Rugosidad de superficie: Se representa por el tamaño y forma de los granos del material que forma el perímetro mojado y que producen un efecto retardante sobre el flujo.

Vegetación: Puede ser vista como una clase de rugosidad superficial. Este efecto depende principalmente de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación, y es

muy importante en el diseño de canales pequeños de drenaje, ya que por lo común éstos no reciben mantenimiento regular.

Irregularidad del canal: Se refiere a las variaciones en las secciones transversales de los canales, su forma y su perímetro mojado a lo largo de su eje longitudinal. En general, un cambio gradual y uniforme en la sección transversal o en su tamaño y forma no produce efectos apreciables en el valor de n , pero cambios abruptos o alteraciones de secciones pequeñas y grandes requieren el uso de un valor grande de n .

Alineamiento del canal: Curvas suaves con radios grandes producirán valores de n relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementarán el coeficiente n .

Sedimentación y erosión: En general la sedimentación y erosión activa, dan variaciones al canal que ocasionan un incremento en el valor de n . Urquhart (1975) señaló que es importante considerar si estos dos procesos están activos y si es probable que permanezcan activos en el futuro.

Obstrucción: La presencia de obstrucciones tales como troncos de árbol, desechos de flujos, atascamientos, pueden tener un impacto significativo sobre el valor de n . El grado de los efectos de tales obstrucciones depende del número y tamaño de ellas.

Para calcular entonces el coeficiente de rugosidad n se dispone de tablas (como la publicada por el U.S Department of Agriculture en 1955; Chow, 1959) y una serie de fotografías que muestran valores típicos del coeficiente n para un determinado tipo de canal (Ramser, 1929 y Scobey, 1939).

Aparte de estas ayudas, se encuentra en la literatura numerosas fórmulas para expresar el coeficiente de rugosidad de Manning en función del diámetro de las partículas, las cuales tienen la forma $n = m D^{1/6}$, donde m es un factor de escala y D es un diámetro característico del material del lecho (D_{50} , D_{75} , D_{84} , D_{90}) que son, respectivamente, los diámetros correspondientes al 50, 75, 84 y 90% de la curva granulométrica del material del lecho.

Otros modelos tienen forma logarítmica y expresan n en función del diámetro de las partículas (D50 o D84) y de las características del flujo (radio hidráulico, profundidad media del flujo).

Según Ven T. Chow la tabla 3.1 presenta distintos valores para n en función al tipo de revestimiento del canal

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A-1. Metal			
a. Latón liso	0,009	0,010	0,013
b. Acero			
b.1 Estructurado y soldado	0,010	0,012	0,014
b.2 Riveteado y en espiral	0,013	0,016	0,017
c. Hierro fundido			
c.1 Recubierto	0,010	0,013	0,014
c.2 No recubierto	0,011	0,014	0,016
d. Hierro forjado			
d.1 Negro	0,012	0,014	0,015
d.2 Galvanizado	0,013	0,016	0,017
e. Metal corrugado			
e.1 Subdrenaje	0,017	0,019	0,021
e.2 Drenaje de aguas de lluvia	0,021	0,024	0,030
A-2. No metal			
a. Lucita	0,008	0,009	0,010
b. Vidrio	0,009	0,010	0,013
c. Cemento			
c.1 Superficie pulida	0,010	0,011	0,013
c.2 Mortero	0,011	0,013	0,015
d. Concreto			
d.1 Alcantarilla, recta y libre de basuras	0,010	0,011	0,013
d.2 Alcantarilla, con curvas, conexiones y algo de basuras	0,011	0,013	0,014
d.3 Bien terminado	0,011	0,012	0,014
d.4 Alcantarillado de aguas residuales con pozos de inspección, entradas, etc, recto	0,013	0,015	0,017
d.5 Sin pulir, formaleta o encofrado metálico	0,012	0,013	0,014
d.6 Sin pulir, formaleta o encofrado en madera lisa	0,012	0,014	0,016
d.7 Sin pulir, formaleta o encofrado en madera rugosa	0,015	0,017	0,020
e. Madera			
e.1 Machimbreada	0,010	0,012	0,014
e.2 Laminada, tratada	0,015	0,017	0,020
f. Arcilla			
f.1 Canaleta común de baldosas	0,011	0,013	0,017
f.2 Alcantarilla vitrificada	0,011	0,014	0,017
f.3 Alcantarilla vitrificada con pozos de inspección, entradas, etc.	0,013	0,015	0,017
f.4 Subdrenaje vitrificado con juntas abiertas	0,014	0,016	0,018
g. Mampostería en ladrillo			
g.1 Barnizada o lacada	0,011	0,013	0,015
g.2 Revestida con mortero de cemento	0,012	0,015	0,017
h. Alcantarillados sanitarios recubiertos con limos y babas de aguas residuales, con curvas y conexiones	0,012	0,013	0,016
i. Alcantarillado con batea pavimentada, fondo liso	0,016	0,019	0,020
j. Mampostería de piedra, cementada	0,018	0,025	0,030

Tabla 3.1. Coeficiente de rugosidad "n".

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1994).

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
B. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
a.1 Sin pintar	0,011	0,012	0,014
a.2 Pintada	0,012	0,013	0,017
b. Corrugado	0,021	0,025	0,030
B-2. No metal			
a. Cemento			
a.1 Superficie pulida	0,010	0,011	0,013
a.2 Mortero	0,011	0,013	0,015
b. Madera			
b.1 Cepillada, sin tratar	0,010	0,012	0,014
b.2 Cepillada, creosotada	0,011	0,012	0,015
b.3 Sin Cepillar	0,011	0,013	0,015
b.4 Láminas con listones	0,012	0,015	0,018
b.5 Forrada con papel impermeabilizante	0,010	0,014	0,017
c. Concreto			
c.1 Terminado con lana metálica (palustre)	0,011	0,013	0,015
c.2 Terminado con lana de madera	0,013	0,015	0,016
c.3 Pulido, con gravas en el fondo	0,015	0,017	0,020
c.4 Sin pulir	0,014	0,017	0,020
c.5 Lanzado, sección buena	0,016	0,019	0,023
c.6 Lanzado, sección ondulada	0,018	0,022	0,025
c.7 Sobre roca bien excavada	0,017	0,020	
c.8 Sobre roca irregularmente excavada	0,022	0,027	
d.- Fondo de concreto terminado con lana de madera y con lados de :			
d.1 Piedra labrada, en mortero	0,015	0,017	0,020
d.2 Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0,017	0,020	0,024
d.3 Mampostería de piedra cementada, recubierta	0,016	0,020	0,024
d.4 Mampostería de piedra cementada	0,020	0,025	0,030
d.5 Piedra suelta	0,020	0,030	0,035
e.- Fondo de gravas con lados de:			
e.1 Concreto encofrado	0,017	0,020	0,025
e.2 Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0,020	0,023	0,026
e.3 Piedra suelta	0,023	0,033	0,036
f.- Ladrillo			
f.1 Barnizado o lacado	0,011	0,013	0,015
f.2 En mortero de cemento	0,012	0,015	0,018
g. Mampostería			
g.1 Piedra partida cementada	0,017	0,025	0,030
g.2 Piedra suelta	0,023	0,032	0,035
h. Bloques de piedra labrados	0,013	0,015	0,017
i. Asfalto			
i.1 Liso	0,013	0,013	
i.2 Rugoso	0,016	0,016	
j. Revestimiento Vegetal	0,030	-	0,500

Tabla 3.1. Continuación coeficiente de rugosidad "n".

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1994).

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
a.1 Limpio, recientemente terminado	0,016	0,018	0,020
a.2 Limpio, después de exposición a la intemperie	0,018	0,022	0,025
a.3 Con gravas, sección uniforme, limpio	0,022	0,025	0,030
a.4 Con pastos cortos, algunas malezas	0,022	0,027	0,033
b. En tierra, serpenteante y lento			
b.1 Sin vegetación	0,023	0,025	0,030
b.2 Pastos, algunas malezas	0,025	0,030	0,033
b.3 Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0,030	0,035	0,040
b.4 Fondo en tierra con lados en piedra	0,028	0,030	0,035
b.5 Fondo pedregoso y bancas con malezas	0,025	0,035	0,040
b.6 Fondo en cantos rodados y lados limpios	0,030	0,040	0,050
c. Excavado con pala o dragado			
c.1 Sin vegetación	0,025	0,028	0,033
c.2 Matorrales ligeros en las bancas	0,035	0,050	0,060
d. Cortes en roca			
d.1 Lisos y uniformes	0,025	0,035	0,040
d.2 Afilados e irregulares	0,035	0,040	0,050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
e.1 Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0,050	0,080	0,120
e.2 Fondo limpio, matorrales en los lados	0,040	0,050	0,080
e.3 Igual, nivel máximo de flujo	0,045	0,070	0,110
e.4 Matorrales densos, nivel alto	0,080	0,100	0,140

Tabla 3.1. Continuación coeficiente de rugosidad "n".

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1994).

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
D. Corrientes naturales			
D-1 Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
a.1 Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0,025	0,030	0,033
a.2 Igual al anterior, pero con mas piedras y malezas	0,030	0,035	0,040
a.3 Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0,033	0,040	0,045
a.4 Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0,035	0,045	0,050
a.5 Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones mas eficientes	0,040	0,048	0,055
a.6 Igual al a.4 pero con mas piedras	0,045	0,050	0,060
a.7 Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
a.8 Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0,075	0,100	0,150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
b.1 Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
b.2 Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0,040	0,050	0,070
D-2 Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
a.1 Pasto corto	0,025	0,030	0,035
a.2 Pasto alto	0,030	0,035	0,050
b. Áreas cultivadas			
b.1 Sin cultivo	0,020	0,030	0,040
b.2 Cultivos en línea maduros	0,025	0,035	0,045
b.3 Campos de cultivo maduros	0,030	0,040	0,050
c. Matorrales			
c.1 Matorrales dispersos, mucha maleza	0,035	0,050	0,070
c.2 Pocos matorrales y árboles, en invierno	0,035	0,050	0,060
c.3 Pocos matorrales y árboles, en verano	0,040	0,060	0,080
c.4 Matorrales medios a densos, en invierno	0,045	0,070	0,110
c.5 Matorrales medios a densos, en verano	0,070	0,100	0,160
d. Árboles			
d.1 Sauces densos, rectos y en verano	0,110	0,150	0,200
d.2 Terreno limpio, con troncos sin retoños	0,030	0,040	0,050
d.3 Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0,050	0,060	0,080
d.4 Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
d.5 Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0,100	0,120	0,160
D-3 Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0,025	-	0,060
b. Sección irregular y rugosa	0,035	-	0,100

Tabla 3.1. Continuación coeficiente de rugosidad "n".

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1994).

3.2.5. Estudio de la quebrada

3.2.5.1. Topografía

Se realizó un levantamiento topográfico del tramo de la quebrada “El Monte”, comprendido entre el puente de la avenida Gamoneda y el badén del barrio Juan XXIII, esto se realizó con ayuda de una estación total SOKIA 630 de la cual se obtuvo puntos los cuales se los procesó en el programa AutoCAD Civil 3D y se generó la superficie de la quebrada.

El levantamiento fue comprendido únicamente en el lugar de los márgenes y el lecho del río, es decir, no abarca los alrededores del mismo.

3.2.5.2. Granulometría

Para el estudio de granulometría del lecho de la quebrada “El Monte” se extrajo una muestra de material del lecho del río y como paso siguiente se realizó el análisis granulométrico que se muestra en la tabla 3.2, 3.3 y en la figura 3.3.

Granulometría quebrada "El Monte"					
Peso total (gr.)			1000	A.S.T.M.	% que pasa del total
Tamiz N°	Tamaño (mm)	Peso retenido (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido	
3"	75	0	0	0	100
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37,5	134,2	134,2	13,42	86,58
1"	25	126,08	260,28	26,028	73,972
3/4"	19	108,86	369,14	36,914	63,086
1/2"	12,5	79,1	448,24	44,824	55,176
3/8"	9,5	16,16	464,4	46,44	53,56
N°4	4,75	82,94	547,34	54,734	45,266
N°10	2	65,35	612,69	61,269	38,731
N°40	0,425	144,25	756,94	75,694	24,306
N°200	0,075	114,33	871,27	87,127	12,873

Tabla 3.2. Granulometría de la quebrada "El Monte".

Fuente: Elaboración propia.

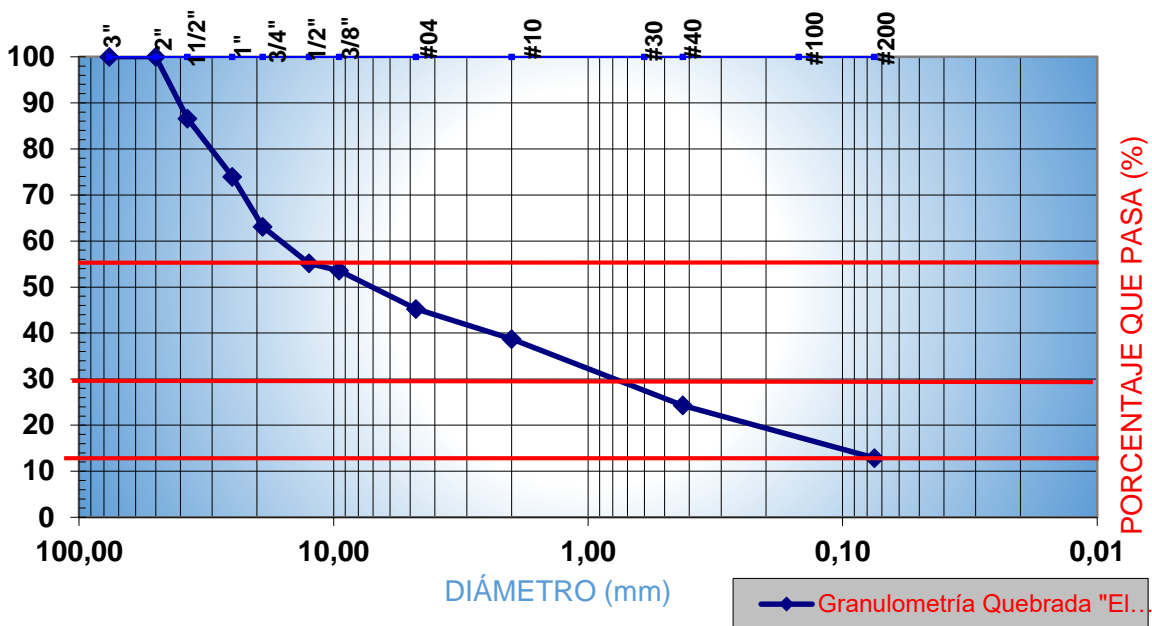


Figura 3.3. Curva de distribución granulométrica - quebrada "El Monte"

Fuente: Elaboración propia.

Clasificación	Gravas limosas mezclas de grava – arena – limo.
S.U.C.S.	GM
A.A.S.H.T.O.	A-1-b

Tabla 3.3. Clasificación de muestra de suelo - quebrada "El Monte".

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5.3. Marcas históricas de crecidas

La marca histórica de crecida que se tomó como ejemplo fue la del puente nuevo del barrio “La Salamanca” ubicado detrás del hospital regional San Juan de Dios, dicha marca histórica tiene una altura de 3.5 m desde el lecho del río. (Ver anexo B – Simulación hidráulica)



Figura 3. 4. Sección de marca histórica registrada en el puente.

Fuente: Elaboración propia.

DATOS MARCA HISTÓRICA - PUENTE PROGRESIVA 0+360.52

Área marca histórica = 81.55 m²

Perímetro histórica = 32.20 m

Altura marca histórica = 3.50 m

Partiendo de la ecuación de continuidad.

$$Q = V * A \rightarrow V = \frac{1}{n} * (R_h)^{2/3} * S^{1/2}$$

$$Q = \frac{1}{n} * \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} * S^{1/2} * A$$

$$Q = 345.80 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal calculado partiendo desde el dato observado de marca histórica nos resulta:

$$Q = 345.80 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Este resultado será utilizado como dato real comparado a los resultados a obtener en la simulación de crecidas. (Ver anexo A - Hidrología)

3.2.6. Análisis de flujo mediante HEC-RAS

HEC-RAS es un software integrado de análisis y simulación hidráulica, programa que el usuario utiliza recíprocamente con el sistema a través del uso de una interfaz gráfica del usuario (con sus siglas en inglés GUI). El sistema es capaz de realizar cálculos de los flujos de la superficie del agua, cálculos de flujo uniforme, e incluirá flujo variado, transporte de sedimento, etc.

En la terminología de HEC-RAS, un proyecto es un grupo de archivos de datos asociados con un sistema de un río en particular. El modelador puede realizar cualquiera o varios tipos de análisis, incluido en el paquete de HEC-RAS, como parte del proyecto. Los archivos de datos para un proyecto se categorizan de la siguiente manera:

Datos de planta.

Datos geométricos.

Datos de flujo uniforme.

Datos de flujo variado.

Datos de sedimentos.

Datos de diseño hidráulico.

Para empezar un proyecto de simulación hidráulica en dicho paquete el proyectista puede formular varios planes diferentes.

Cada plan representa una simulación específica de datos geométricos y datos de flujo. Una vez introducidos los datos básicos en el HEC-RAS, el proyectista puede formular los nuevos planes fácilmente. Después de que las simulaciones son hechas para los varios proyectos, los resultados pueden compararse simultáneamente en forma tabular y gráfica.

Una vez ingresados todos los datos geométricos y datos de flujo, el proyectista puede empezar a realizar los cálculos hidráulicos de simulación.

Perfiles del agua en flujo permanente:

Este componente calcula perfiles para flujo gradualmente variado. El sistema puede manejar una red de canales, un sistema dendrítico o un simple tramo del río. Y además es capaz de modelar flujos supercríticos, subcríticos y mixtos.

Por otra parte, el proceso computacional se basa fundamentalmente en:

La solución unidimensional de la ecuación de energía. En ella las pérdidas de energía son evaluadas por fricción (ecuación de Manning), por contracción y expansión (coeficiente que multiplican a la carga de velocidad).

La ecuación de Momentum es utilizada en situaciones donde el flujo es rápidamente variado. Esto incluye régimen de flujos mixtos: saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y confluencia de ríos.

Los efectos de obstrucciones como: puentes, barrajes, alcantarillas y estructuras en el plano de inundaciones pueden ser consideradas en el cálculo.

El sistema de flujo no permanente está diseñado para la aplicación en planos de inundación y estudios de protección contra avenidas. También se puede modelar cambios en los perfiles de agua en canales debidos a mejoramientos y diques.

Con los datos de entrada se generan simulaciones de curvas de remanso, que, como se desarrollaran bajo las siguientes premisas:

1. Flujo permanente (no cambia con el tiempo).
2. Flujo gradualmente variado (el flujo cambia en distancias para relativamente grandes).
3. Flujo uni-dimensional con correcciones para distribución horizontal de velocidad.
4. Pendiente suave.
5. La pendiente promedio de la línea de energía es constante entre dos secciones transversales adyacentes.
6. Condición de borde: el canal es rígido.

Resultados.

Una vez el modelo ha terminado todos los cálculos, el proyectista puede empezar viendo los resultados de la simulación hidráulica.

La salida del programa abarca entre otras, secciones transversales (mostrando la sección del canal y los niveles de agua), perfiles longitudinales, curvas “y” (tirante) Vs. “Q” (caudal), Perspectivas X-Y-Z (pseudo 3D), tabla de la sección transversal (puntos, velocidad media, número de Froude, etc.), tabla de perfil longitudinal, etc.

Los datos de salida permiten conocer, por ejemplo, el tirante de agua, la velocidad media del flujo, etc. Estos parámetros se utilizan, por ejemplo, en el diseño de puentes (para calcular la socavación producida por el paso del agua en los pilares y estribos), para diseñar la protección de los terraplenes de una carretera, para determinar la planicie de inundación y planificar el desarrollo urbano de una ciudad, etc. Los datos de salida deben tratar con sumo cuidado por especialistas.

Todos los gráficos y tablas de datos pueden ser vistos en pantalla, como así también las opciones disponibles en la ventana de secciones transversales también están disponibles en la ventana del perfil; una pantalla X-Y-Z, que muestra el resultado de simulación, también está disponible. El usuario tiene la opción de definir el arranque y acabar la situación para la magnitud del tramo considerado. El tramo puede girarse o corregirse, y conseguir perspectivas diferentes del tramo del río.

3.3. Resultados simulación crecidas en HEC-RAS

Los resultados de simulación de crecidas para las superficies revestidas con colchonetas y geoceldas realizadas en el software HEC-RAS, se detallan las tablas y gráficos de tirante y velocidad en “anexo B – Simulación hidráulica”.

CAPÍTULO IV

4. Tipos de revestimiento en ríos

4.1. Gaviones

4.1.1. Introducción

El uso de una cesta que contiene pequeñas piedras manejables, en lugar de una sola piedra grande y pesada que es difícil de mover, es un concepto antiguo que fue utilizado por la humanidad por mucho tiempo. Los primeros registros del uso de este sistema se remontan a más de 2000 años, cuando los egipcios usaron cestas de sauce cilíndricas llenas de pequeñas piedras para proteger las orillas del río Nilo.

Esas características se mantuvieron hasta el siglo XIX, cuando el sauce fue reemplazado por gaviones hechos por redes de alambre; Maccaferri fue el primero en llevar a cabo la producción industrial de gaviones en 1894. (Neermal, 2012)

4.1.2. Tipos de gavión

Los gaviones han sido utilizados a lo largo del tiempo en las siguientes aplicaciones: Construcción de diques, espigones, vertederos, encauzamiento de ríos, muros de contención, revestimiento de canales, en diversos tipos de defensas ribereñas y muros ornamentales

Este trabajo hace referencia solo del uso de gaviones como parte de revestimiento de un cauce natural.

Los gaviones tipo caja y tipo colchón son paralelepípedos rectangulares de diferentes dimensiones constituidos por una red de malla metálica tejida a doble torsión que forman una base, paredes verticales y una tapa, la cual, eventualmente, puede ser formada por separado. Son rellenados en obra con bloques sanos de roca de peso apropiado. Para este propósito, el peso específico de los bloques debe ser mayor o igual a 2 ton/m^3 . Por la conformación de las mallas, estas pueden ser:

- De abertura hexagonal (tejidos).
- De abertura ortogonal (electro soldados).

Los tipos de gavión que se observan en este trabajo son:

- Tipo caja: Las cajas forman paralelepípedos que típicamente se caracterizan por tener áreas en la base de 1 m² y alturas de 0,50 a 1 m. La separación interna de las cajas en elementos se hace mediante diafragmas espaciados cada metro, de esta manera, se facilita el montaje, relleno y la flexibilidad de los elementos. Son elementos muy versátiles que utilizan en prácticamente todas las aplicaciones de uso de gaviones mencionadas. La malla está conformada por acero de bajo contenido de carbono, revestido con aleación GalFan, además, se puede utilizar un revestimiento plastificado adicional contra exposiciones severas de corrosión. En la figura 4.1 se puede apreciar un gavión tipo caja.
- Tipo colchón: El gavión tipo colchón es el utilizado en estructuras de recubrimiento para protección contra la erosión en ríos y para estructuras de disipación. Estos gaviones se caracterizan por tener espesores de 17 a 30 cm, ancho de 2 metros y largos de 3-6 m. Además, se suele utilizar de 3 a 5 diafragmas dependiendo de las características de la estructura y el proyecto. La malla está conformada por acero de bajo contenido de carbono, revestido con aleación GalFan, además, se puede utilizar un revestimiento plastificado adicional contra exposiciones severas de corrosión. En la figura 4.2 se puede apreciar un gavión tipo colchón. (Aguilar Aguinaga, 2016)

A continuación, se muestran las dimensiones típicas según el tipo de gavión:

Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Nº Diafragmas	Volumen (m ³)
1.5	1.0	1.0	-	1.5
2.0	1.0	0.5	1	1.0
2.0	1.0	1.0	-	2.0
2.0	1.0	1.0	1	2.0
3.0	1.0	0.5	2	1.5
3.0	1.0	1.0	2	3.0
4.0	1.0	0.5	3	2.0
4.0	1.0	1.0	3	4.0
4.0	1.5	1.0	3	6.0
5.0	1.0	0.5	4	2.5
5.0	1.0	1.0	4	5.0
5.0	1.5	1.0	4	7.5
6.0	2.0	0.5	5	6.0

Tabla 4. 1. Dimensiones gavión tipo caja.

Fuente: (PRODAC, 2004).

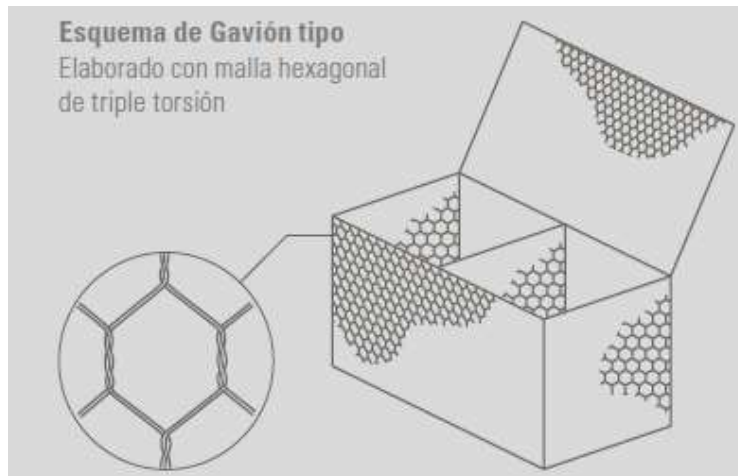


Figura 4. 1. Gavión tipo caja.

Fuente: (Bianchini, 2006).

Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Nº Diafragmas	Volumen (m ³)
4.0	2.0	0.17	3	1.36
4.0	2.0	0.23	3	1.84
4.0	2.0	0.30	3	2.40
5.0	2.0	0.17	4	1.70
5.0	2.0	0.23	4	2.30
5.0	2.0	0.30	4	3.00
6.0	2.0	0.17	5	2.04
6.0	2.0	0.23	5	2.76
6.0	2.0	0.30	5	3.60

Tabla 4. 2. Dimensiones del gavión tipo colchón.

Fuente: (PRODAC, 2004).

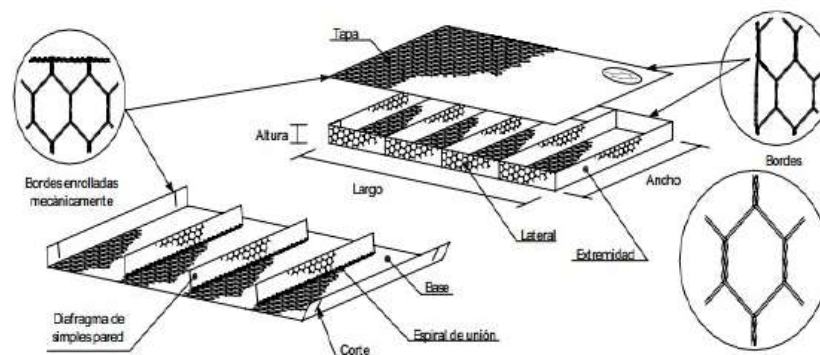


Figura 4. 2. Gavión tipo colchón.

Fuente: (MACCAFERRI, 2010).

4.1.3. Ficha técnica

Existen diversas patentes de gaviones; es decir, cada fabricante y proveedor puede manejar tanto definiciones como criterios técnicos y funcionales particulares para sus productos. Sin embargo, se pueden generalizar las características siguientes según el informe de Maccaferri realizado por Michelle Neerman (2012):

- **Monoliticidad:** Una estructura de gaviones está formada por varios elementos ligados a través de elementos continuos de fijación. Este último asegura la continuidad de la malla y permite la distribución regular de las fuerzas impuestas entre las tres dimensiones (anchura, altura y profundidad), así como asegurar que el peso total de una estructura es igual a la suma de los pesos de cada elemento.
- **Flexibilidad:** Los materiales constitutivos de los gaviones dan alta flexibilidad a la estructura en comparación con otros tipos de soluciones. La red de alambre asegura la resistencia a la tensión en la estructura, que por lo tanto puede absorber cargas no previstas en el momento del diseño. Esta es una de las características más importantes de los gaviones - la estructura se deforma, pero su resistencia no disminuye, porque al seguir los movimientos de la tierra la estructura mantiene las mismas cargas en el suelo.
- **Durabilidad:** Las capas de elementos anticorrosivos como GalFan o recubrimiento de PVC permiten que la malla resista condiciones bastante severas de exposición ante agentes corrosivos. Además, la ruptura de una sección de cable no necesariamente implica el colapso del elemento gracias al efecto de la torsión del mallado
- **Permeabilidad** Los espacios vacíos entre gaviones con relleno de piedra permiten el movimiento del fluido a través de ellos. Por esta razón, las obras de gavión no se ven generalmente afectadas por la presión hidráulica y, por lo tanto, trabajan mucho más eficientemente bajo tales circunstancias.
- **Simplicidad y economía:** Al ser simple, los gaviones no requieren mano de obra calificada ni equipo especial. Normalmente se necesitan herramientas ordinarias, como alicates, pinzas, palancas y otras herramientas fácilmente disponibles.
- **Versatilidad:** Las estructuras de gavión se adaptan perfectamente a las necesidades y condiciones locales. Si bien pueden ser construidos utilizando medios mecánicos,

también son muy adecuados para los proyectos de mano de obra intensiva. Estas estructuras pueden ser construidas en cualquier clima (temperaturas bajas o altas), sequía o temporada de lluvias, y bajo condiciones ambientales diferentes, como en presencia de agua, en sitios remotos, y en suelos pobres con baja capacidad de carga. (Neermal, 2012)

Características de la malla

La malla de forma hexagonal puede tener diversas dimensiones. Las más empleadas en nuestro medio son, de 8cm x 10cm para los gaviones y de 6cm x 8cm para las colchonetas.

La doble torsión es adoptada y recomendada por los constructores para evitar los inconvenientes detectados en el uso de la malla de gavión de torsión simple. La doble torsión evita que la malla se desarme si algún alambre se corta accidentalmente, o si es necesario cortar la malla para hacer pasar a través de ella una tubería.

Por otra parte, la cantidad de alambre de amarre que se suele utilizar, es del 6 al 8% del peso del gavión con un diámetro igual a 2.2mm GalFan.

El fenómeno de la corrosión reduce notablemente la vida útil de la malla de alambre, aspecto que debe tenerse siempre presente para realizar una estimación aceptable de la vida de una estructura de gaviones y su consiguiente valoración económica.

El efecto de la corrosión varía notablemente de un lugar a otro, según la agresividad del ambiente. En general se pueden establecer tres ambientes típicos donde se utilizan estructuras de gaviones con distintos efectos, los cuales se identifican en la tabla 4.3.

UBICACIÓN	EFEECTO	VIDA ÚTIL (AÑOS)
AMBIENTE RURAL	BAJA CORROSIÓN	35 – 45
AMBIENTE URBANO	MODERADA CORROSIÓN	15 – 18
AMBIENTE INDUSTRIAL	MAYOR CORROSIÓN	4 – 5

Tabla 4. 3. Efectos de corrosión y vida útil en mallas de gavión.

Fuente: (MACCAFERRI, 2010).

El recubrimiento disminuye con el tiempo debido a los siguientes factores:

- Ambiente en que se encuentra y acción del agua.
- Abrasión provocada por el material en suspensión y rodado, en la base antisocavante y las paredes del muro.
- Tensión al que está sometido el alambre.

4.1.4. *Instalación*

- **Material de relleno:** Para el llenado de los gaviones puede ser utilizado cualquier material pétreo siempre que su peso y sus características satisfagan las exigencias técnicas del proyecto sean funcionales y de durabilidad exigidas para la obra. Siempre debe ser preferible usar materiales de alto peso específico, especialmente porque el comportamiento de la estructura a gravedad depende directamente de su peso propio. Deben también ser descartadas piedras solubles, frías o de poca dureza.
- **Instalación:** El manual de instalación de gaviones Bianchini (2006) indica los siguientes pasos para el montaje de gaviones en obra:
 - a) Desplegar la malla, abatiéndola en el suelo. Posteriormente levantar las paredes y las dos cabezas hasta que coincidan sus aristas contiguas, formándose de esta forma la caja con la tapa abierta. A continuación coser las aristas con alambre galvanizado.



Figura 4.3. Instalación de gaviones 1er paso.

Fuente: (Bianchini, 2006).

- b) Situar el gavión, una vez armado, en el lugar de la obra que indica el proyecto. Atarlo a los gaviones contiguos mediante alambre galvanizado reforzado y torsiones entre mallas.



Figura 4.4. Instalación de gaviones 2do paso.

Fuente: (Bianchini, 2006).

- c) Una vez colocado en su emplazamiento, el gavión se rellena con canto rodado o piedra de cantera. Se puede efectuar con medios mecánicos como retroexcavadoras, excavadoras o cintas transportadoras. Es necesario colocar previamente un encofrado metálico o de madera, sostenido por puntales, para mantener el enrejado en los parámetros proyectados. Colocar tirantes transversales de alambre galvanizado reforzado cada 25 – 30 cm aproximadamente



Figura 4.5. Instalación de gaviones 3er paso.

Fuente: (Bianchini, 2006).

- d) Finalmente cerrar el gavión cosiéndolo con alambre galvanizado. Mediante el empleo de una pequeña palanca con el extremo curvado, se ayudara a la coincidencia entre las diferentes aristas de la tapa con los bordes superiores de las caras del gavión.



Figura 4.6. Instalación de gaviones 4to paso.

Fuente: (Bianchini, 2006).

4.1.5. Rugosidad en canales

La elección del coeficiente de rugosidad “ n ” a ser introducido en la ecuación de Manning puede ser hecha basándose en la tabla 4.4, que relaciona los valores de “ n ” con la naturaleza de la superficie de recubrimiento del canal.

La ecuación planteada por Meyer-Peter y Müller, es una fórmula que puede ser válida para el análisis de rugosidad en gaviones, como fue posible verificar con las pruebas realizadas en el *Hydraulic laboratory engineering research center, Colorado state University (Fort Collins USA)* y en el *Utah water research laboratory*. Los ensayos fueron hechos tanto en escala real como en modelo, para verificar el comportamiento y la resistencia de los revestimientos de fondos de canales ejecutados con gaviones. (MACCAFERRI, 2010)

Los resultados obtenidos de las pruebas analizadas se detallan en la tabla 4.4.



Figura 4.7. Cauce de un río revestido con gaviones.

Fuente: (Bianchini, 2006).

TIPO	NATURALEZA DEL CANAL	n[s.m ^{1/3}]
1	Canales revestidos con colchones Reno [®] y recubiertos con mortero.	0,0130
2	Canales revestidos con colchones Reno [®] perfectamente impermeabilizados con una mezcla de bitumen hidráulico aplicado con métodos particulares para obtener una superficie plana y bien lisa.	0,0158
3	Canales revestidos con colchones Reno [®] y gaviones caja perfectamente impermeabilizados con mezcla de bitumen hidráulico aplicado directamente.	0,0172
4	Canales revestidos con colchones Reno [®] y gaviones caja consolidados hasta la superficie con mezcla de bitumen hidráulico que envuelva las piedras superficiales.	0,0200
5	Canales revestidos con colchones Reno [®] y gaviones caja consolidados con mezcla de bitumen hidráulico que penetre en profundidad.	0,0215
6	Canales revestidos con MacMaT [®] recubierto con emulsión asfáltica.	0,0205
7	Canales revestidos con MacMaT [®] y MacMaT [®] R sin relleno.	0,0280
8	Canales revestidos con MacMaT [®] y MacMaT [®] R con vegetación.	0,0320
9	Canales revestidos con MacMaT [®] y MacMaT [®] R con relleno de pedrisco.	0,0210
10	Canales revestidos con colchones Reno [®] llenados con material bien seleccionado y colocado en obra con mucho cuidado.	0,0222
11	Canales revestidos con colchones Reno [®] llenados con material bien seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0250
12	Canales revestidos con colchones Reno [®] llenados con material de cantera no seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0270
13	Canales revestidos con gaviones caja llenados con material bien seleccionado y colocado en obra con cuidado.	0,0260
14	Canales revestidos con gaviones caja llenados con material no seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0285
15	Canales en tierra en malas condiciones de manutención: enmarañado de vegetación en el fondo y en las márgenes o depósitos irregulares de piedras y grava, o profundas erosiones irregulares. También canales en tierra ejecutados con máquinas y con mantenimiento descuidado.	0,0303
16	Cursos de agua naturales, con cauce de canto rodado y movimiento del material del fondo.	0,0480

Tabla 4.4. Coeficientes de Manning para revestimiento con gaviones.

Fuente: (MACCAFERRI, 2010).

4.2. Geoceldas

4.2.1. Introducción

El cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos de América desarrollo el primer sistema de confinamiento celular a finales de 1970 como un medio para la construcción de caminos, pistas de aterrizaje, etc. El objetivo de estos era de proveer un sistema que podría no verse afectado por las condiciones de climas húmedos.

De la gran variedad de materiales probados, el polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE) fue el material óptimo para ejecutar este producto, debido a la combinación de resistencia, vida útil y economía.

Este sistema de confinamiento celular tiene un peso muy ligero, son sistemas de confinamiento expansibles que crea una barrera contra la erosión de suelos, revestimiento sobre canales naturales y proyectos de retención de tierra. (GeoProducts - EnviroGrid, 2000)

La industria de confinamiento geocelular lidera en los campos de investigación y desarrollo, lo que se traduce en mejoras significativas de sus productos, tecnologías innovadoras, métodos ingenieriles de avanzada, aplicaciones creativas, y resultados de campo comprobados que proporcionan soluciones únicas a largo plazo para problemas difíciles.

Existen diversas concepciones del sistema de geoceldas, esto se debe a la numerosa cantidad de patentes que existen en el mercado y la forma en la que estas son aplicadas para solucionar problemas ingenieriles particulares.



Figura 4.8. Sistema de confinamiento celular.

Fuente: (PRODAC, 2016).



Figura 4.9. Sistema de confinamiento celular con relleno de concreto

Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016).

4.2.2. Ficha técnica

El sistema de confinamiento celular como ser las geoceldas es un revestimiento de canales proporciona una gran diversidad de tratamientos de impermeabilización y protección flexible para canales abiertos y estructuras hidráulicas. El sistema proporciona el grado de impermeabilidad requerido, estabilidad y protección a los canales expuestos a condiciones erosivas tanto de flujos bajos como altos, sean intermitentes o continuos.

La figura 4.10 presenta un esquema general de geoceldas aplicadas a una estructura de recubrimiento de canales. La parte superior de esta imagen refiere a una vista en planta y la parte inferior a una sección transversal, además, se muestran los elementos que forman parte del sistema total.

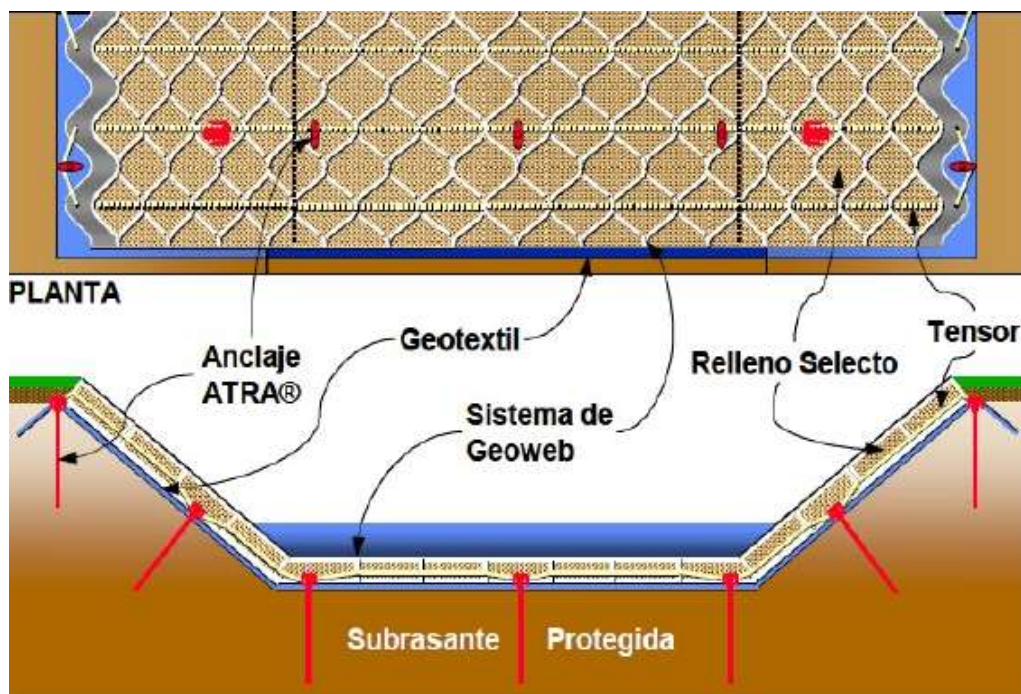


Figura 4.10. Componentes del sistema de confinamiento celular.

Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

Los componentes primarios de una instalación típica de protección de canales con geoceldas se ilustran en la figura 4.10; la especificación para cada tipo de componente se basa en las condiciones hidráulicas previstas, la geometría del canal a revestir, los materiales de relleno disponibles y el tipo de suelo en el lugar.

Los detalles de los componentes estándar del sistema de confinamiento celular se resumen a continuación:

- ***Tamaños y profundidades de las geoceldas***

Este elemento de contención y de protección puede ser de diferentes áreas transversales, alturas y puede tener agujeros para la interconexión del relleno entre las celdas adyacentes. La altura que se escoge para las celdas determina el espesor del recubrimiento. En el talud se tiene en cuenta el ángulo de inclinación de este, así como el ángulo de reposo del material de relleno.

El tamaño óptimo de la celda y la profundidad se detallan en la figura 4.11 en secciones que cubren la selección del relleno.

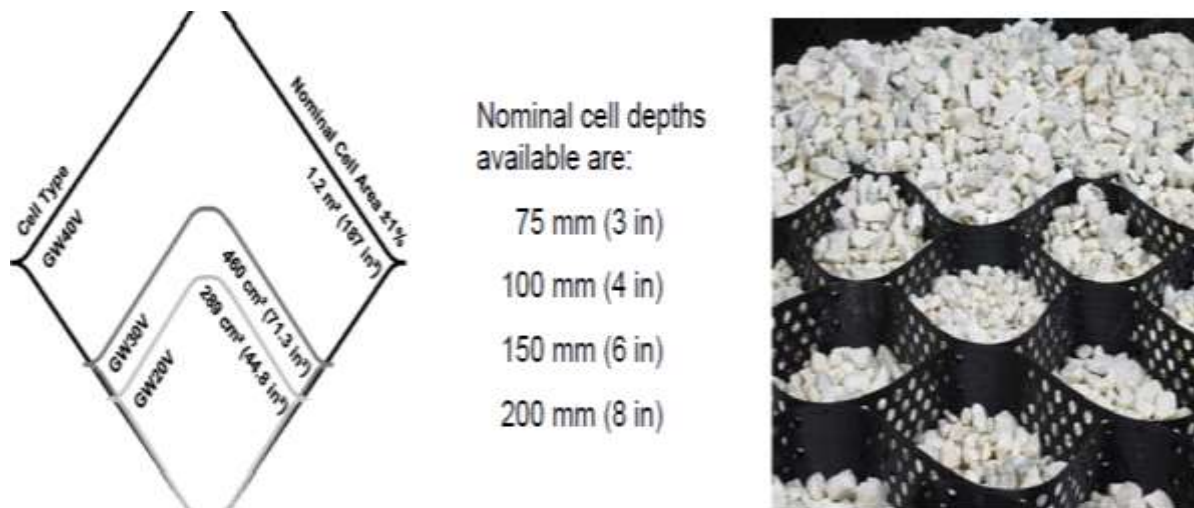


Figura 4.11. Dimensiones y profundidad de geoceldas.

Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

- ***Subcapa de geotextil***

Se recomienda utilizar una capa inferior de geotextil punzado con aguja y no tejido, esta subcapa funciona como filtro de suelo y medio de drenaje en instalaciones de revestimiento de canales. Los bordes de geotextil deben ser excavados en la subrasante en el perímetro del área de protección para evitar el flujo debajo del sistema de revestimiento; el criterio que se debe tomar para la aplicación del geotextil debe tener en cuenta los tipos específicos de suelos y las condiciones de aguas subterráneas.

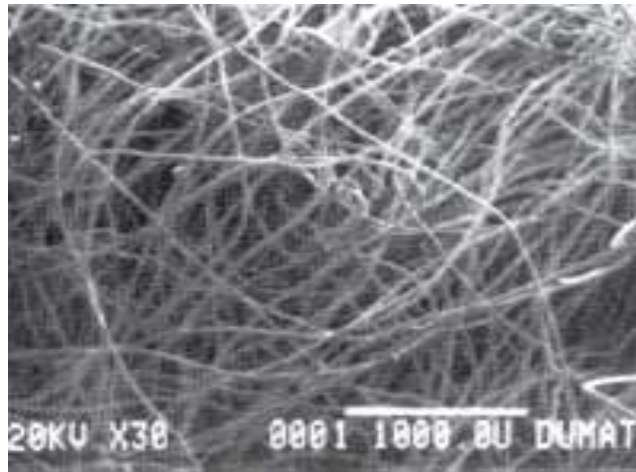


Figura 4.12. Vista microscópica de geotextil no tejido punzonado por agujas.
Fuente: (GEOSOFT - PAVCO, 2009).

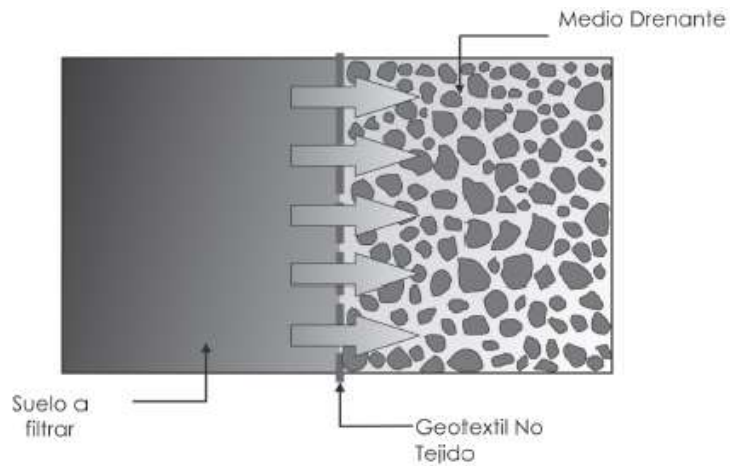


Figura 4.13. Paso del agua a través del sistema de geotextil no tejido.
Fuente: (GEOSOFT - PAVCO, 2009).



Figura 4.14. Geotextil no tejido punzonado por agujas.
Fuente: Elaboración propia.

- ***Tendones polímeros integrales***

Distribuyen el peso del sistema a través de los elementos de anclaje intermedios. Además, sirven como conexión entre los anclajes extremos de base y coronación. Los tipos de tensor se diferencian por su resistencia mínima a la rotura (ver tabla 4.5). La Figura 4.15 muestra los tendones (se ven como tiras de color blanco).



Figura 4.15. Tendones polímeros aplicados en geoceldas.
Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016).

Reference Name	Minimum Break Strength
TP-31	3.11 kN (700 lbf)
TP-67	6.70 kN (1500 lbf)
TP-93	9.30 kN (2090 lbf)
TK-89	8.90 kN (2000 lbf)
TK-133	13.34 kN (3000 lbf)
TPP-44	4.40 kN (990 lbf)

Tabla 4.5. Resistencia mínima a la rotura en tendones.
Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

- **Anclajes**

Son elementos que brindan estabilidad al sistema. Se puede utilizar diferentes tipos de anclajes, desde estacas de acero corrugado hasta anclajes patentados. El uso de anclajes intermedios no solo permite una mejor distribución de los pesos, sino también, son importantes para resistir las fuerzas de empuje hidrostático. Mientras que los anclajes de coronación soportan el peso total de las franjas transversales de geoceldas

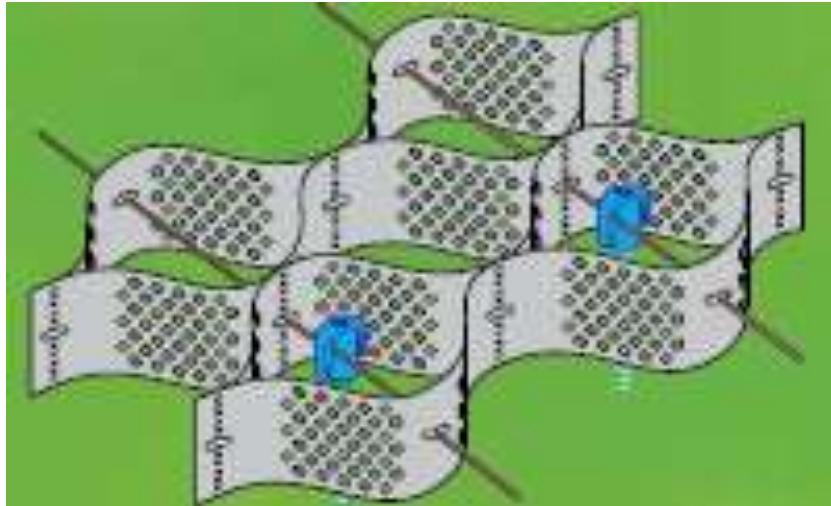


Figura 4.16. Anclaje patentado marca ATRA®.

Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).



Figura 4.17. Anclaje de hierro corrugado.

Fuente: (PRODAC, 2016).

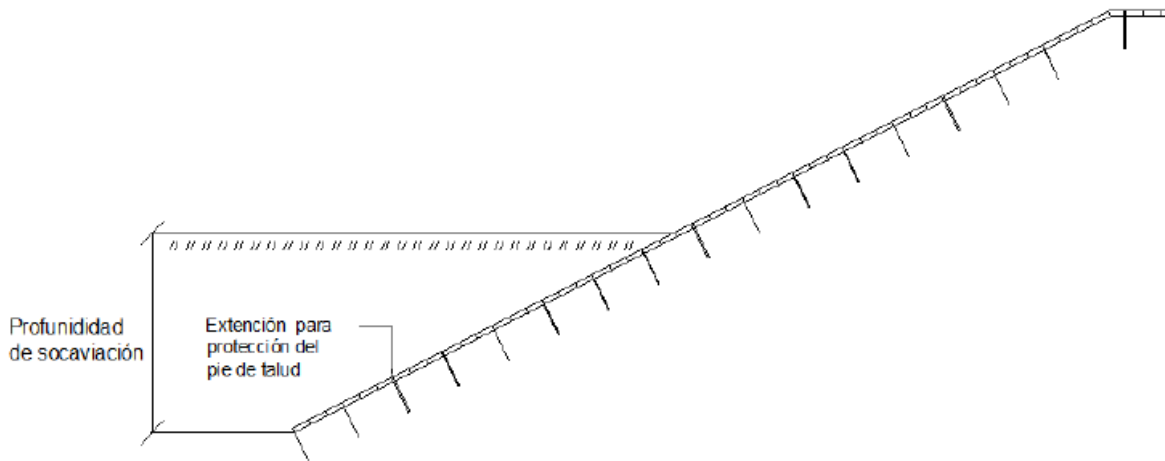


Figura 4.18. Esquema de protección de pie de talud según la socavación.

Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016).

- **Material de relleno recomendado**

Las siguientes recomendaciones de relleno son proporcionadas por el fabricante de geoceldas (GeoPool), el cual detalla las siguientes características en el catálogo *Geoweb Channel Technical Overview* (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

- a) Relleno con cobertura vegetal

General:

Los pastizales altamente estables se pueden desarrollar en canales y barrancos usando el sistema de geoceldas en situaciones donde ocurren flujos intermitentes de alta velocidad/cizallamiento. La integridad de los revestimientos vegetales no reforzados puede verse comprometida si los caudales persisten durante períodos prolongados. Las partículas del suelo son eliminadas progresivamente de la zona de la raíz, creando las arenas y los barrancos que destruyen en última instancia la protección. Sin embargo, con el sistema de geoceldas y una capa de refuerzo de césped, la estabilidad de la vegetación en canales con flujo intermitente se incrementa dramáticamente.

Beneficios del Confinamiento Celular:

Las geoceldas, cuando están llenas de tierra vegetal, forman un contenedor efectivo que se extiende por todo el revestimiento del suelo. Una cubierta de material vegetativo sobre las células forma una tapa eficaz al contenedor que impide el

desarrollo de la arboleda y el barranco y el movimiento masivo de la capa superficial del suelo cuando ocurren flujos altos y saturación del suelo.

Una profundidad predeterminada de la capa superficial del suelo y la masa vegetativa de la raíz en desarrollo está contenida y protegida dentro de las células individuales protegidas por la cobertura vegetal. Las raíces penetran fácilmente a través de la capa inferior de geotextil no tejida en el subsuelo, anclando todo el sistema de revestimiento.

El sistema de geoceldas también permite que las raíces crezcan y se entrelacen con las paredes celulares perforadas creando refuerzo adicional de la zona de las raíces.

El confinamiento y anclaje de la estructura de la raíz aumenta la resistencia de corte de la protección y la duración permisible de los eventos de flujo.

Directrices de diseño:

Se recomienda el sistema con cobertura de vegetación en situaciones de flujo intermitente en las que el desgarramiento o el revestimiento de concreto son indeseables y son deseables soluciones ambientalmente sensibles. Los flujos máximos deben ser intermitentes y de duración relativamente corta (<24 horas). La velocidad pico es de 10 m / s (33 pies / s) y el esfuerzo de cizallamiento de pico es de 860 N (18 lbf / ft²) durante períodos cortos cuando la cubierta de vegetación está bien establecida.

Se debe aplicar una estera de refuerzo de césped, totalmente sintética o sintética con un componente biodegradable, para proteger la capa superior del suelo y las semillas expuestas y para promover el establecimiento rápido de la vegetación.

Para un mejor rendimiento general, se recomienda el sistema perforado de geoceldas con una capa inferior de geotextil ligero [150 - 200 g / m² (4 - 6 oz / yd²)], agujereado y no tejido.

Selección del tamaño:

La profundidad de la celda recomendada para los revestimientos de canal Geoweb con vegetación es:

- 75 mm cuando los subsuelos apoyen el desarrollo de raíces y los ángulos de inclinación lateral sean < 26°.

- 100 mm cuando el soporte de vegetación del subsuelo es cuestionable y los ángulos de pendiente lateral son $> 26^\circ$.
- En las regiones áridas puede ser necesaria una mayor profundidad celular y riego.

Se recomienda el tamaño de celda de 460 cm^2 con un TRM para revestimientos de canal con vegetación.

Instalación del sistema:

- Se debe evitar el sobrellenado o la colocación de grandes grupos de tierra en las celdas. Asegúrese de que todas las celdas estén completamente llenas después de apisonar ligeramente (compactar) el relleno. La compactación del relleno puede retardar el desarrollo de la vegetación.
- La siembra y la instalación del TRM deben proceder inmediatamente después de la colocación del relleno del suelo.



Figura 4.19. Talud con geoceldas rellenas con cobertura vegetal.

Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016)

b) Relleno con agregados

General:

La estabilidad de los agregados está directamente relacionada con el tamaño, la gradación, la forma y la densidad de las partículas. Se puede esperar el desplazamiento de las partículas no confinadas pequeñas dentro de una capa de protección de canal de agregado debido a fuerzas de tracción moderadas. En condiciones de bajo flujo, el reabastecimiento de partículas más pequeñas ocurrirá

muchas veces. Sin embargo, la estabilidad de los componentes más grandes permanecerá cuando se selecciona correctamente.

Beneficios del Confinamiento Celular:

El confinamiento del agregado dentro de las geoceldas para formar la protección del canal proporciona resistencia adicional al movimiento agregado. Las tensiones hidráulicas limitantes se refieren a los tamaños de partícula que están expuestos en la superficie de las células individuales rellenas en lugar de las partículas de agregado más finas que están confinadas en profundidad dentro de las paredes celulares. Las paredes celulares limitan el flujo a través de la capa de agregado y, de este modo, impiden el desarrollo de canales de flujo localizados dentro de la capa protectora.

En el caso de que las condiciones de flujo produzcan fuerzas de tracción en o ligeramente por encima de los valores límite para el agregado expuesto, puede ocurrir un vaciado parcial de la celda. El efecto de tal vaciado provoca un aumento de la estabilidad del sistema en su conjunto debido a la proyección de las paredes celulares en el flujo de la corriente.

La resistencia a la erosión de un revestimiento de Geoweb con agregado puede aumentarse sin perder la flexibilidad inherente del sistema aplicando una lechada de hormigón superficial.

Directrices de diseño:

La limitación de las condiciones hidráulicas recomendadas para una serie de tipos de agregados se ha determinado mediante pruebas en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Estatal de Colorado.

Cuando se aplican lechadas de hormigón a la superficie de rellenos agregados para aumentar la resistencia a la erosión, se recomienda una profundidad mínima de penetración de lechada de 50 mm (2 pulgadas).

Se recomienda una capa inferior geotextil no tejida, de 200 a 240 g/m² (6 - 8 oz / yd²) para evitar la pérdida de partículas del subsuelo de grano fino. El tamaño de apertura de los poros del geotextil no debe exceder el D85 del subsuelo protegido.

Selección del tamaño de la célula:

La elección del tamaño de la célula Geoweb está directamente relacionada con el tamaño de partícula máximo del relleno agregado:

Geoweb Cell Depth	75 mm (3 in)	100 mm (4 in)	150 mm (6 in)	200 mm (8 in)
GW20V Cell	38 mm (1.5 in)	50 mm (2 in)	75 mm (3 in)	75 mm (3.5 in)
GW30V Cell	75 mm (3 in)	100 mm (4 in)	100 mm (4 in)	100 mm (4 in)
GW40V Cell	75 mm (3 in)	100 mm (4 in)	150 mm (6 in)	150 mm (7 in)

Tabla 4.6. Tamaño de agregado para relleno recomendado.

Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

Sistema de anclaje:

El anclaje de superficie nominal para un revestimiento Geoweb con carga de agregado incluye tendones continuos que atraviesan el centro de 800 mm (32 pulg.) Con anclajes ATRA® de 500 mm (20 pulg) espaciados a intervalos de 1 m (3 pies) a lo largo de cada tendón. Si no se pueden utilizar los anclajes ATRA®, el espaciamiento de los tendones debe reducirse a 400 mm (16 pulgadas) para aumentar el peso superpuesto del cojinete de relleno agregado directamente en el sistema de tendones.

Instalación del sistema:

Las operaciones de llenado deben evitar el derribo final o la caída de un agregado pequeño [< 75 mm (3 in)] desde alturas mayores de 1000 mm (3 pies) y gran agregado [> 75 mm (3 in)] desde alturas mayores de 500 mm (20 pulgadas). Se debe asegurar de que las células no estén demasiado llenas.

El agregado se puede compactar en las celdas Geoweb usando un tamper de placa o la parte posterior de un balde liso en el equipo de colocación.



Figura 4.20. Talud con geoceldas rellenas de agregado.

Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016).

c) Relleno con concreto

General:

El hormigón vertido puede proporcionar una protección duradera para los canales y estructuras hidráulicas que están expuestos a fuertes cargas hidrodinámicas. Los revestimientos convencionales de protección de hormigón armado son esencialmente rígidos y deben incluir juntas de construcción/expansión distinta para realizar de manera eficaz su ejecución. A menudo se requiere una base granular selectiva estable para minimizar la posibilidad de formación de huecos por debajo del blindaje. El movimiento incontrolado de los materiales de base puede provocar grietas estructurales y en casos extremos, elevación y desplazamiento del revestimiento. El potencial de daño se incrementa si ocurren deformaciones a largo plazo o estacionales.

Beneficios del Confinamiento Celular:

El relleno de las geoceldas con hormigón premezclado produce un sistema de revestimiento duradero y resistente a la erosión de espesor uniforme que conserva la flexibilidad y la capacidad de adaptarse a los movimientos potenciales del suelo. Se pueden omitir capas de lecho granular compactadas especiales, necesarias con losas de hormigón vertido convencionales. El sistema actúa principalmente como una forma ligera y flexible que se puede adaptar fácilmente a una amplia gama de geometría de canales.

La contracción de secado normal del relleno de hormigón da a toda la superficie de revestimiento la capacidad de drenar el agua subterránea de la subrasante. La contracción uniformemente distribuida también mejora la capacidad del sistema de articularse en caso de deformación de la subrasante.

La calidad, el acabado superficial y el grosor del hormigón se pueden seleccionar para satisfacer necesidades específicas de diseño. Una capa inferior de geotextil no tejida, combinada, si es necesario, con puertos de salida personalizados, garantiza el drenaje eficiente de la subred y la protección del filtro del subsuelo.

Se mantiene un enlace mecánico entre el relleno de hormigón y el interior de cada celda por la superficie de pared única del sistema de confinamiento. La pared puede ser texturizada perforada o texturizada no perforada. La amplitud de la textura es

mayor que la posible contracción del hormigón, bloqueando así el relleno de hormigón en las células individuales del sistema. Las perforaciones de 10 mm (3/8 in) de diámetro permiten el flujo de hormigón entre celdas, proporcionando un bloqueo superior del relleno de hormigón en las celdas individuales del sistema.

El hormigón puede colocarse mediante bombas, saltos montados en la pluma o descargas directas de camiones mezclados.

Directrices de diseño

Se recomienda el relleno de concreto para canales que pueden estar expuestos a altas velocidades de flujo, turbulencia o choque hidrodinámico. La calidad del hormigón, en términos de resistencia a la compresión, relación agregado/cemento, relación agua/cemento y arrastre de aire, debe seleccionarse de acuerdo con la práctica de ingeniería normal en relación con las condiciones del sitio.

El concreto mezclado y el hormigón escalonado se pueden usar como rellenos de bajo costo donde las tensiones hidráulicas y las condiciones de intemperie son moderadas. Diversos acabados superficiales, paleta, escoba o rastrillo, que cumplan con requisitos específicos de estética o fricción superficial son posibles. Los agregados o gravilla también se pueden incrustar en la superficie del relleno de hormigón húmedo para producir una variedad de texturas, colores y acabados superficiales.

La evaluación de la permeabilidad del subsuelo y el potencial de extracción rápida es especialmente importante cuando se determina el tipo de geotextil o sub-capa geocompuesta.

Selección del tamaño de la celda:

La celda, con un área de células de 460 cm² (71,3 pulgadas²), se recomienda generalmente en pendientes mayores de 18,5 ° (3H: 1V), a menos que el relleno de hormigón tenga una caída muy baja.

La selección de la profundidad de la celda se basa normalmente en las posibles fuerzas de tracción y de elevación a las que podría estar expuesto el revestimiento protector. Además de aumentar el peso unitario del sistema, una mayor profundidad de la celda aumenta significativamente la rigidez a la flexión y la resistencia al levantamiento del sistema.

La geocelda de 75 mm (3 pulgadas) de hormigón relleno de hormigón fue probado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Estatal de Colorado de acuerdo con ASTM WK7072 y flujos sostenidos de hasta 10,8 m/s y esfuerzos de cizallamiento hasta 980 N (20,5 lbf/m²) sin señales de peligro. El hormigón tenía un acabado áspero.

Anclaje de superficie:

Los requisitos especiales de anclaje de pendiente pueden determinarse sobre la base de análisis hidráulicos detallados.

Instalación del sistema:

El relleno de concreto debe proceder desde la parte superior de las pendientes laterales hasta el dedo del pie. No se recomienda el sobrellenado de celdas.



Figura 4. 21. Talud con geoceldas rellenas de concreto.

Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016).

- ***Predimensionamiento del sistema.***

Una vez seleccionado el material de relleno adecuado para el revestimiento, la dimensión de celdas debe ser determinada considerando la variación de características que presenta el lugar de proyecto. En el caso de las geoceldas con relleno de concreto, aumentar la altura de las celdas va a incrementar la rigidez a la flexión y la resistencia del sistema al empuje, en la figura 4.22 se muestra un gráfico basado en las velocidades máximas que puede soportar el revestimiento según el espesor.

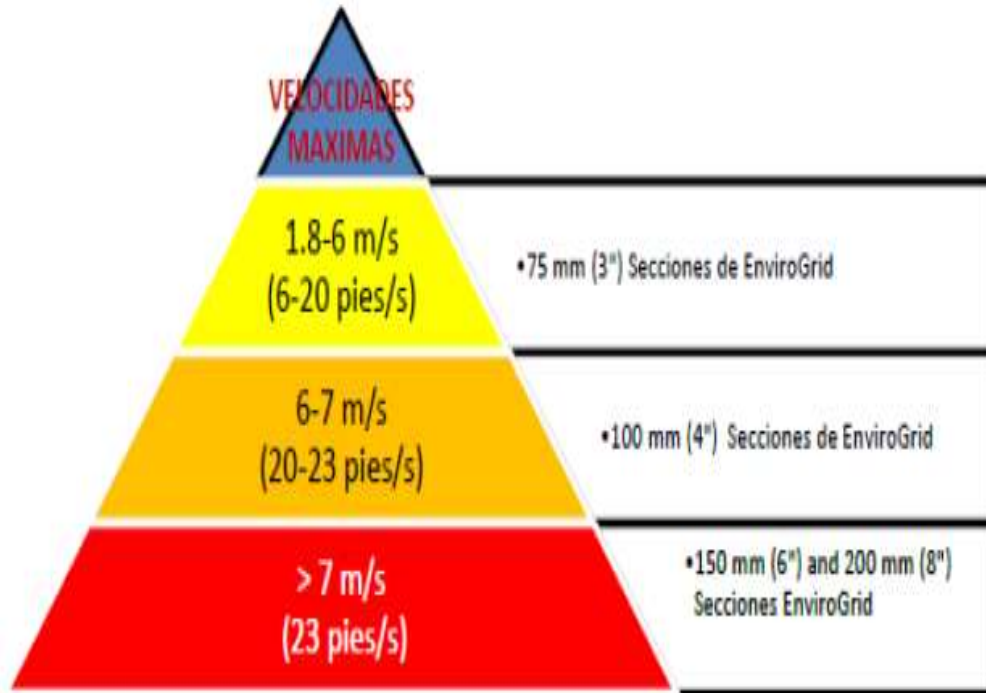


Figura 4.22. Altura de geoceldas según velocidades de flujo.

Fuente: (Aguilar Aguinaga, 2016).

4.2.3. *Instalación y armado*

Los criterios de diseño de las geoceldas son muy diversos, no solo dependen del tipo de patente con el que se trabaja, sino, también de las condiciones de los proyectos juegan un papel sumamente importante. Es por esto, que la existencia de una guía de diseño estricta no puede ser posible en el caso de las geoceldas. Como resultado de esta particularidad los profesionales de ingeniería deben analizar en cada proyecto que solución es la más adecuada para este. Para fines de este trabajo se presentan los siguientes criterios para la instalación de geoceldas con relleno de concreto.

Preparación del terreno:

- Limpiar los taludes y la solera de la vegetación existente.
- Excavar y perfilar el tramo de canal del proyecto.
- Colocar, compactar y perfilar el relleno de tierra requerido.
- Excavar zanjas para la fijación del material en la corona y perímetro del talud, de acuerdo con los requerimientos.

Colocación de capa geotextil de separación:

- Colocar el geotextil especificado sobre los taludes del canal.
- Traslapar adecuadamente las secciones adyacentes en dirección aguas abajo.
- Verificar que el geotextil esté colocado en el perímetro de las zanjas previstas para fijar el material.
- Clavar los bordes de las secciones de geotextil para evitar su desplazamiento.

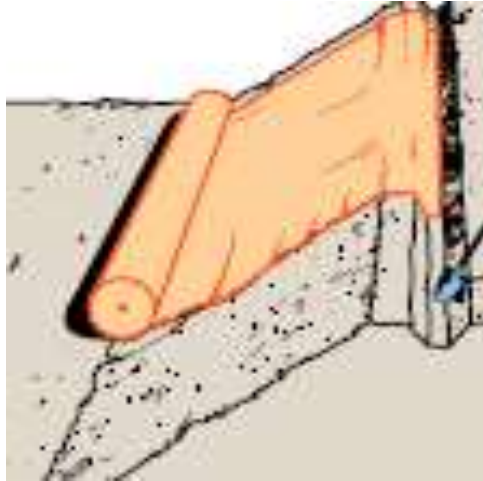


Figura 4.23. Colocación de geotextil.

Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

Instalación de las secciones de geoceldas:

- Introducir una fila de estacas de anclaje a lo largo del borde superior del área de talud por proteger. Colocar las estacas en el centro de celdas predeterminadas.
- Extender parcialmente la sección de geoceldas y colocar cada celda extrema de la sección sobre la estaca que le corresponde.
- Estirar la sección hacia abajo sobre los taludes laterales del canal hasta que alcancen la longitud especificada.

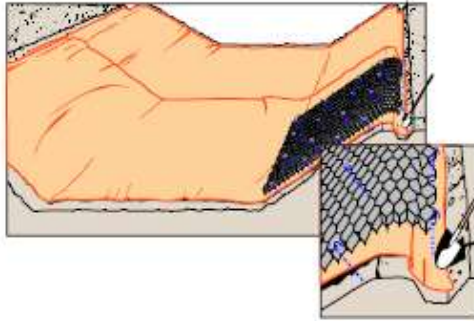


Figura 4.24. Colocación de geoceldas sobre el talud.

Fuente: (PRESTO - GEOSYSTEMS, 2008).

- Mantener las secciones completamente estiradas por medio de uno de los siguientes:
 - a) Anclajes ATRA®, estacas rectas o en forma de J (permanentes o provisionales). Existen herramientas especiales para introducir dichos anclajes a fin de acelerar su colocación.
 - b) Rellenar varias celdas perimetrales.
 - c) Otros métodos aceptables pueden también utilizarse.
- Alinear intercaladamente los bordes de las secciones adyacentes, comprobando que la superficie superior de las secciones adyacentes esté al mismo nivel.
- Sujetar las secciones entre sí con la llave de conexión ATRA®. Pasar la llave ATRA a través de las ranuras de las secciones traslapadas (lado a lado), o en el punto de conexión de las celdas (extremo con extremo), y girarla hasta la posición de “cerrado”.
- Cuando las secciones se conectan extremo con extremo, no estirar completamente algunas filas de la sección contigua para facilitar la colocación de las llaves ATRA antes de extender completamente dicha sección. Para mayor facilidad, insertar la llave completamente a través de una celda antes de insertarla a través de la celda contigua. Las secciones contiguas deberían estar bien conectadas antes de empezar a rellenar.

Colocación del relleno:

El llenado de las secciones puede empezar después de concluida la fase de instalación de geoceldas, una vez que estas estén ancladas.

Puede utilizarse una serie de equipos, tal como:

- a) Excavadora hidráulica (Retroexcavadora).
- b) Cargador frontal.
- c) Faja transportadora.
- d) Balde dirigido por grúa.
- e) Canalón de mezcladora.

En la fase de relleno se debe limitar la altura de caída del material de relleno a un máximo de 1 m, llenar desde la corona hacia el pie del talud y las celdas deben llenarse en exceso (bajo control), a fin de permitir la consolidación y compactación del relleno, de manera que el relleno quede al mismo nivel tanto en las áreas superiores como en el pie.



Figura 4.25. Distribución de hormigón sobre geoceldas.

Fuente: (BCOM - PROSER Consultores, 1996).

CAPÍTULO V

5. Presupuesto y tiempo de ejecución

5.1. Presupuesto

5.1.1. *Cómputos métricos*

Por medio del cómputo métrico, se miden las estructuras que forman parte de una obra de ingeniería, con el objeto de:

- a) Establecer el costo de la misma, o de una de sus partes.
- b) Determinar la cantidad de materiales necesarios para ejecutarla.

El computo métrico es un problema de medición de longitudes, áreas y volúmenes, que requiere el manejo de fórmulas geométricas, computar es entonces medir, computo, medición y cubicación son palabras equivalentes.

El cómputo métrico supone el conocimiento de los procedimientos constructivos de la práctica y su éxito depende en gran medida de una experiencia sólida. El trabajo de medición puede ser ejecutado de dos maneras que son: sobre la obra misma, o sobre los planos.

El trabajo de medición en este proyecto fue ejecutado sobre la topografía y el material utilizado

5.1.2. *Precios unitarios*

El precio unitario puede definirse como el importe de la remuneración o pago total, que debe cubrirse al contratista por unidad de obra de cada uno de los conceptos de trabajo que realice.

Este factor se compone de los costos unitarios directos (CD), más los costos indirectos (CI) en relación con el volumen de obra y por lo tanto, la expresión matemática del precio unitario puede escribirse de la siguiente manera:

$$PU = CD + CI$$

Los costos directos “CD” son los que engloban el costo de:

- 1) Material.

2) Mano de obra. - Conformada por la suma de:

2.1) Mano de obra

2.2) Cargas sociales. -Porcentaje de “2.1” el cual puede adoptarse entre 55 a 71.18%, en el proyecto se asumió 55%.

2.3) Impuestos IVA. - Porcentaje de la suma entre “2.1+2.2”, el cual en el proyecto se asumió 14.94%.

3) Equipo, maquinaria y herramientas

3.1) Herramientas. -Es un porcentaje de “2” que se asumió 5%.

El costo indirecto “CI” es todo aquel gasto que no es integrante de los costos directos, tales como:

4) Gastos generales y administrativos

Es un porcentaje de “1+2+3” el cual en el proyecto se asumió como 12%.

5) Utilidad

Es un porcentaje de “1+2+3+4” el cual en el proyecto se asumió como 8%.

6) Impuestos

Es un porcentaje de “1+2+3+4+5” el cual en el proyecto se asumió como 3.09%.

Por tanto el precio unitario de cada actividad seria la suma de los costos directos más los costos indirectos o sea “ $PU=1+2+3+4+5+6$ ”.

Los precios unitarios de cada material utilizado y presupuesto general de la obra se encuentran en el anexo D.

5.1.3. Presupuesto

En el caso en que el presupuesto significa el compromiso de la ejecución, es necesario determinar el costo con la máxima aproximación, en este caso es recomendable el sistema analítico por el cual el calculista en base a los pliegos de condiciones y especificaciones y a los planos a diseño final, calcula los precios unitarios de cada una de las actividades que forman parte de la obra como asimismo los correspondientes volúmenes de obra. Este método permite establecer el costo total de la obra como resultado de la suma de los costos parciales por ítems, además de facilitar la determinación de las cantidades de materiales y mano de obra a emplearse en la obra.

5.1.4. Resultados

A partir del análisis de precios unitarios (Ver anexo D) se obtuvo la siguiente tabla de resultados:

TIPO DE REVESTIMIENTO	PRESUPUESTO GENERAL
Gaviones	5,650,921.07 Bs.
Colchonetas de gavión	4,051,764.30 Bs.
Geoceldas con relleno de concreto	3,290,785.87 Bs

Tabla 5. 1. Presupuesto general de revestimientos en ríos.

Fuente: Elaboración propia en base a análisis de precios unitarios.

5.2. Tiempo de ejecución

La estimación de costos y la elaboración de presupuestos, representa uno de los pasos más importantes en lo que se refiere la planificación de ejecución en una obra. En cada etapa de la construcción, el presupuesto representa la base para la toma de decisiones y, en los que se refiere en obras de carácter público (licitaciones), es el factor más importante en la adjudicación de contratos.

El propósito principal de la planificación es establecer un conjunto detallado de directrices que permita al equipo de trabajo saber exactamente:

- a) Qué tiene que hacerse, quién lo tiene que hacer y cuándo se tiene que hacer además es necesario que.
- b) Que las actividades requeridas para completar el proyecto estén delineadas y coordinadas de manera precisa.
- c) Que los recursos necesarios estén disponibles cuando y donde sean necesarios y en la cantidad correcta.
- d) Saber cuáles actividades se pueden realizar simultáneamente y cuáles tienen que hacerse secuencialmente.
- e) Entender que en todo proyecto siempre estará presente la incertidumbre y la necesidad de manejar los riesgos a los cuales se expone el proyecto.

El cronograma de la obra fue desarrollado en función de los rendimientos de la mano de obra y la cantidad del personal disponible para efectuar las diferentes actividades. Dicho

cronograma consiste en un diagrama de Gantt elaborado mediante el programa “Microsoft Project”.

El diagrama Gantt y cronograma de ejecución de la obra para la superficie revestida con gaviones y con geoceldas se encuentra en el anexo D.

TIPO DE REVESTIMIENTO	TIEMPO DE EJECUCIÓN
Gaviones	167 días calendario.
Colchonetas de gavión	121 días calendario.
Geoceldas con relleno de concreto	107 días calendario.

Tabla 5. 2. Tiempo de ejecución de obras de revestimiento en ríos.

Fuente: Elaboración propia en base a análisis de precios unitarios.

CAPÍTULO VI

6. Análisis de resultados

6.1. Comparación técnica

6.1.1. Durabilidad

Las especificaciones técnicas de cada revestimiento, detallan los valores resistentes los cuales fueron estimados mediante pruebas en laboratorios. La tabla 6.1 detalla los valores de resistencia a la erosión y durabilidad entre gaviones y geoceldas con relleno de concreto.

Tipo de revestimiento.	Vida útil	Velocidad crítica.	Esfuerzo de arrastre crítico.
Geoceldas	75 años	8 m/s	37.31 kg/m ²
Colchoneta de gavión	45 años	4.2 m/s	15.30 kg/m ²
Gaviones	45 años	4.2 m/s	15.30 kg/m ²

Tabla 6. 1. Resumen de valores de velocidad y esfuerzo de arrastre crítico para revestimientos en ríos.

Fuente: Elaboración propia basada en información de las patentes.

Las geoceldas con relleno de concreto poseen valores de durabilidad ante la velocidad crítica y resistencia ante el esfuerzo de arrastre crítico mayor a los valores de los gaviones.

6.1.2. Rugosidad de superficie

Esta comparación se basa en el coeficiente de rugosidad “n” propuesta por Manning y se ha determinado que las geoceldas poseen una superficie más lisa que los gaviones; mientras que los gaviones y colchonetas poseen un valor de “n” entre 0.020 – 0.027, para las geoceldas se tiene el coeficiente de rugosidad “n” de 0.016 que corresponde a la rugosidad del hormigón. Ver en la tabla 6.2 el resumen de los resultados obtenidos para los valores del coeficiente n de cada revestimiento. Por lo tanto, las geoceldas con relleno de concreto poseen un valor más adecuado de rugosidad de la superficie.

Tipo de revestimiento.	Coeficiente de rugosidad de Manning “n”.
Geoceldas c/relleno de concreto.	0.016
Colchoneta de gavión	0.020 – 0.027
Gaviones.	0.020 – 0.027

Tabla 6. 2. Resumen de valores del coeficiente de rugosidad de Manning “n”.

Fuente: Elaboración propia basado en valores de rugosidad “n” de Manning.

6.1.3. Comportamiento de flujo

La comparación del comportamiento de flujo, se realizará comparando los mayores tirantes y velocidades obtenidos en las secciones de la simulación hidráulica realizada en HEC-RAS comparando las variables mencionadas sobre el terreno natural y los terrenos recubiertos con geoceldas con relleno de concreto y colchonetas (Ver anexo B).

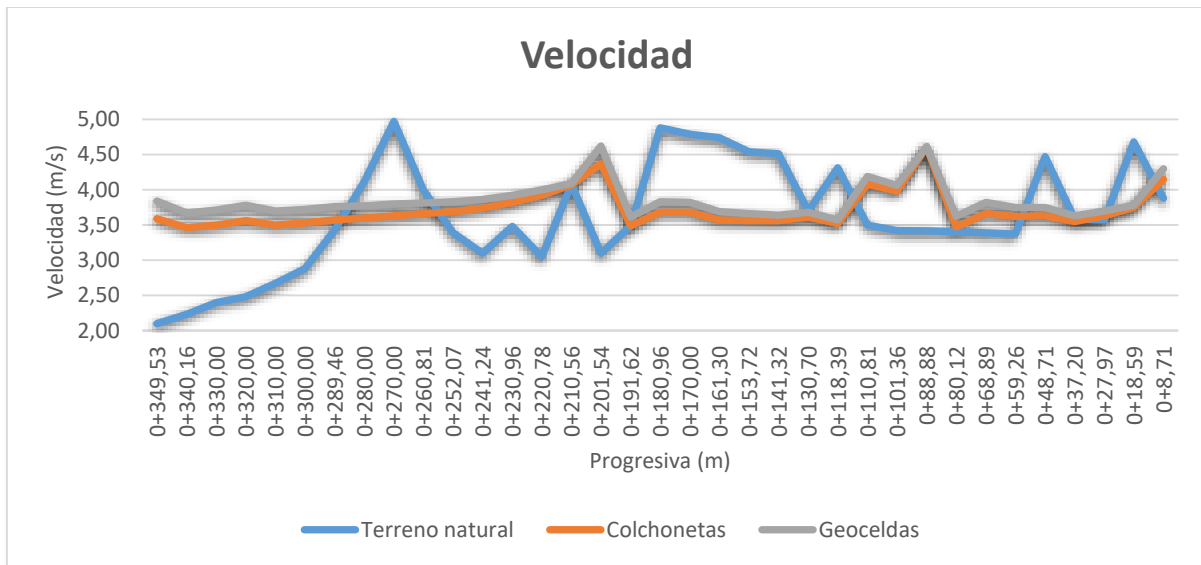


Grafico 6.1. Comportamiento de velocidades sobre terreno natural y revestimientos.

Fuente: Elaboración propia basada en resultados de perfiles de velocidad de HEC-RAS

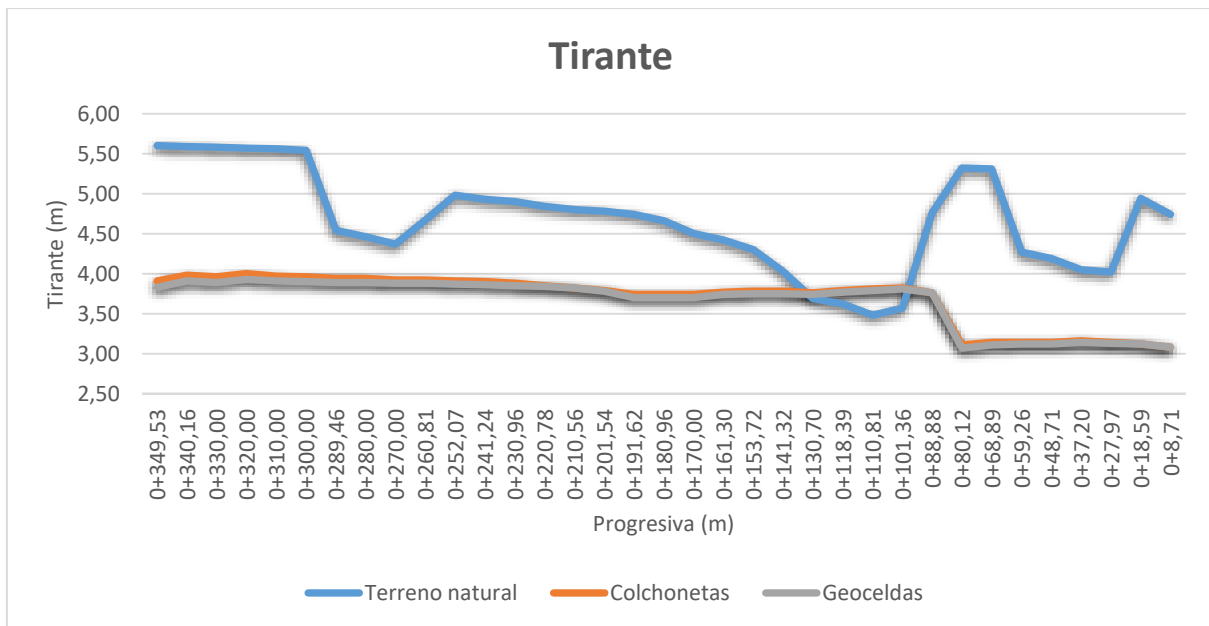


Grafico 6. 2. Comportamiento de tirantes sobre terreno natural y revestimientos.

Fuente: Elaboración propia basada en resultados de perfiles de flujo de HEC-RAS

En resumen, al apreciar los resultados de la comparación del grafico 6.1 se puede ver que al aplicar ambos revestimientos se pudo mejorar las velocidades en el tramo en estudio, por otra parte, se puede observar que el revestimiento con colchonetas presenta velocidades menores que las geoceldas con relleno de concreto.

El grafico 6.2 nos muestra los tirantes que se presentan en cada escenario y podemos concluir que utilizando revestimientos el tirante de la sección baja considerablemente, en cuanto a la comparación de revestimientos las geoceldas con relleno de concreto presentan tirantes menores al revestimiento con colchonetas.

6.2. Comparación económica

La comparación del presupuesto general basado en precios unitarios de ambos revestimientos emplazados en el tramo en estudio de la quebrada “El Monte” ubicado detrás del hospital San Juan de Dios se detalla a continuación en la tabla 6.3.

Tipo de revestimiento.	Costo total (Bolivianos).
Gaviones.	5,650,921.07 Bs.
Colchoneta de gavión	4,051,764.30 Bs.
Geoceldas c/relleno de concreto.	3,290,785.87 Bs

Tabla 6. 3. Resumen de presupuesto general de gaviones y geoceldas.

Fuente: Elaboración propia, basada en resultados de precios unitarios (ver anexo D).

Partiendo de una comparación de precios unitarios podemos resaltar que las geoceldas con relleno de concreto con un costo total de ejecución de 3,290,785.87 Bs. tienen un menor precio al del costo total de ejecución de las colchonetas de gavión con un total de 4,051,764.30 Bs.

En resumen, el costo de construcción de las geoceldas con relleno de concreto resulta ser un 25% menor en comparación al costo de construcción de las colchonetas de gavión.

6.3. Tiempo de ejecución

El tiempo de ejecución de ambos revestimientos se lo hizo en base al método del diagrama de Gantt, el cual se detalla en el anexo D, en la tabla 6.4 se aprecian los resultados del tiempo de ejecución de ambos revestimientos.

Tipo de revestimiento.	Tiempo de ejecución (Días calendario).
Gaviones.	167
Colchoneta de gavión	121
Geoceldas c/relleno de concreto.	107

Tabla 6. 4. Resumen de tiempo de ejecución de gaviones y geoceldas.

Fuente: Elaboración propia, basada en resultados de diagrama de Gantt (ver anexo D).

El resultado de tiempo de ejecución de las obras de protección se puede apreciar que el menor tiempo son los de la construcción de geoceldas con relleno de concreto con 107 días calendario, por otra parte las colchonetas de gavión tienen un tiempo de ejecución de 121 días calendario, resultando las geoceldas como la alternativa de menor tiempo de ejecución con 14 días de anticipación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Partiendo de los objetivos definidos y la comparación realizada, se obtiene los siguientes puntos:

- Con base a criterios constructivos y características observadas en la modelación hidráulica, se puede determinar que el revestimiento con geoceldas con relleno de concreto es factible al momento de utilizarlo como alternativa de obra de protección, ya que este tipo de revestimiento es de similar comportamiento a las colchonetas de gavión y también por las características técnicas estudiadas en el presente trabajo.
- La comparación de durabilidad ante la velocidad crítica de flujo observada en la modelación hidráulica en HEC-RAS, nos permitió apreciar que las velocidades en el perfil del revestimiento con geoceldas con relleno de concreto (4.62 m/s) son mayores que las velocidades con colchonetas (4.60 m/s), no obstante, la velocidad crítica que presentan las colchonetas es mayor a la velocidad crítica admisible que el fabricante recomienda (4.5 m/s), por lo tanto, desde el punto de vista de la velocidad crítica, las geoceldas con relleno de concreto son el revestimiento más adecuado para el tramo en estudio presentando una velocidad crítica admisible de 8 m/s.
- Los valores de coeficiente rugosidad de superficie que presentan estos revestimientos son:

Geoceldas con relleno de concreto – 0.016

Colchonetas de gavión – 0.020

Estos valores demuestran que las geoceldas con relleno de concreto tienen menor coeficiente de rugosidad que las colchonetas, dicho valor haciendo variar el tirante de agua en ambos revestimientos donde se aprecia que las geoceldas obtienen un tirante menor al de las colchonetas.

- El resultado de la comparación de precios unitarios entre ambos revestimientos reflejó que las geoceldas con relleno de concreto poseen un precio menor al de los

- gaviones, con un resultado de 25% menor al precio de la construcción de gaviones, ambas estructuras construidas sobre un mismo tramo bajo las mismas condiciones.
- El cronograma de ejecución, realizado mediante un diagrama de Gantt, distingue que la construcción de geoceldas con relleno de concreto (tiempo de construcción 107 días) con referencia hacia la construcción de colchonetas (tiempo de construcción 121 días) presenta un tiempo de ejecución menor, lo cual supone que dicho revestimiento es más adecuado para la construcción en tiempos cortos.
 - Hechas las observaciones anteriores, desde el punto de vista técnico y económico se define que el revestimiento más adecuado para la protección de márgenes urbanos en el tramo seleccionado de la quebrada “El Monte” es la construcción de las geoceldas con relleno de concreto, dicho criterio adoptado debido a que este revestimiento actúa de manera similar a la de las colchonetas y tiene un precio menor a las mismas.
 - Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica dependen del criterio y parámetros que se adoptaron para la situación en estudio, por tanto se debe tener en cuenta que los resultados de la simulación hidráulica no pueden ser adoptados como resultados absolutos, sino, son conceptos de magnitud y comportamiento que el flujo podría presentar, es decir los resultados de la modelación hidráulica deben solamente tomarse como una referencia estimada a lo que podría ocurrir en un evento de crecida real.
 - Debido a las condiciones económicas actuales en nuestro medio, es importante que las obras que se realicen sean lo más funcionales y económicas, para evitar pérdidas económicas innecesarias, por lo que resulta muy factible el precio que presenta la construcción de geoceldas con relleno de concreto.
 - Resulta claro que es necesario un mayor conocimiento sobre las geoceldas con relleno de concreto, que son una alternativa innovadora en nuestro país, por lo que es necesario despertar el interés tanto de los investigadores como en las dependencias de gobierno involucrados en el diseño y construcción de obras de protección.

Recomendaciones

El análisis realizado e investigado en el proyecto, complementa con la finalidad de colaborar en la toma de futuras decisiones las siguientes consideraciones:

- Se puede permitir afirmar una propuesta que constituya una solución de construcción integral entre las dos estructuras, es decir, utilizar los dos tipos de revestimientos dependiendo cual sea la naturaleza del problema a solucionar.
- Es necesario que para cualquier tipo de revestimiento exista una planificación de condiciones de mantenimiento que no requiera un alto costo del mismo para prolongar su vida útil o su re-construcción.
- El análisis de interacción de flujo de inundación mediante modelos físicos sobre ambos tipos de revestimientos es necesario de tomar en cuenta para definir qué tipo de revestimiento en ríos como obra de protección utilizar.
- Como solución ante las posibles inundaciones en los márgenes de la quebrada, se debe considerar en ampliar la sección por la que fluye el cauce protegiendo los márgenes con el tipo de revestimiento más adecuado.
- Para obtener resultados de mayor confiabilidad es necesario contar con mayor cantidad y variedad de datos para que los resultados de la simulación tanto hidrológica como hidráulica sean resultados confiables.
- Guardar concordancia entre las fechas y tiempos en los que se realizará la construcción de las obras para evitar contratiempos, como por ejemplo las épocas de lluvia.
- Analizar cualitativamente los resultados valiéndonos de las gráficas y perfiles, que brinda la simulación hidráulica con HEC-RAS, para identificar las tendencias del flujo y sus efectos en la geometría del río.
- Es de gran importancia realizar zonificaciones de sección por tramos de quebrada, utilizando secciones iguales, así poder controlar las velocidades y tirantes que puede presentar el proyecto.