

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
CARRERA DE CONSTRUCCIONES CIVILES**



**“TRABAJO DE APLICACIÓN DE EXAMEN DE GRADO PARA
LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE LICENCIATURA”**

**DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO PARA EL DISEÑO DE PUENTE BOLIVIA
UBIC. EL ALTO – LA PAZ, APLICANDO EL MÉTODO RACIONAL MODIFICADO**

POR: JAIME QUISPE QUISPE

LA PAZ - BOLIVIA

2022

DEDICATORIA

A mis padres Mario y Justina, por brindarme su amor, constante apoyo y palabras de aliento para hacer de mí una mejor persona.

A mis hermanos Julio, Federico, Juan, por ser mi motivación.

A mi amiga Elizabeth (elu), por su apoyo incondicional.

A la facultad de Tecnología a mi carrera de Construcciones Civiles por haberme acogido en sus aulas, donde quedaron marcadas mis alegrías y tristezas en la vida universitaria.

INDICE

RESUMEN

CAPÍTULO 1	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación del trabajo	1
1.3. Objetivos	1
1.3.1. Objetivo general	1
1.3.2. Objetivos específicos	1
CAPITULO 2	2
2.1. Marco teórico	2
2.1.1. Cuenca hidrográfica	2
2.1.2. Precipitación (P)	2
2.1.3. Evapotranspiración	2
2.1.4. Infiltración	3
2.1.5. Escorrentía superficial	3
2.1.6. Caudal (Q)	3
2.1.7. Intensidad (I)	3
2.1.8. Delimitación de la cuenca hidrográfica	3
2.1.9. Clasificación de las cuencas hidrográficas	5
2.1.10. Patrón de drenaje	5
2.1.11. Avenida	5
2.1.12. Características físicas de la cuenca	6
2.1.13. Perímetro	6
2.1.14. Uso y tipo de suelo	6
2.1.15. Longitud del cauce principal	6
2.1.16. Determinación del caudal	7
2.1.16.1. Método Racional Modificado	7

2.1.16.2.	Área de la cuenca	7
2.1.16.3.	Coeficiente de escorrentía	7
2.1.16.4.	Pendiente media (Sm)	9
2.1.16.5.	Periodo de retorno	9
2.1.16.6.	Tiempo de concentración ⁷ :	9
2.1.16.7.	Curva intensidad – duración – frecuencia (IDF) ⁸	10
2.1.16.8.	Longitud del cauce principal (L).....	10
2.1.16.9.	Pendiente del cauce principal (S).....	10
2.1.16.10.	Coeficiente de uniformidad (Cu)	11
2.1.16.11.	Nivel máximo de aguas extraordinarias.....	11
2.1.17.	Morfometría de la cuenca ⁹	11
2.1.17.1.	Forma de la cuenca	11
2.1.17.2.	Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (kc).....	12
2.1.17.3.	Relación de elongación de schumm (Re)	12
2.1.17.4.	Orden de la cuenca.....	12
2.1.17.5.	Densidad de drenaje	13
2.1.17.6.	Pendiente de la cuenca	13
CAPÍTULO 3	14
3.1.	Estudio de la cuenca rio seco	14
3.2.	Ubicación política y geográfica	14
CAPITULO 4	17
4.1.	Memoria de cálculo	17
4.1.1.	Calculo de caudal de diseño por el método racional modificado	17
4.1.2.	Delimitación de la cuenca hidrográfica	17
4.1.3.	Calculo del coeficiente de escorrentía	17
4.1.4.	Zonificación de la cuenca.....	18
4.1.5.	Pendiente media de la cuenca (sm).....	18

4.1.6.	Calculo de la intensidad	20
4.1.7.	Periodo de retorno	20
4.1.8.	Tiempo de concentración	21
4.1.9.	Longitud del cauce principal (Lc)	21
5.1.1.	Pendiente del cauce (Sm)	21
5.1.2.	Calculo del coeficiente de uniformidad	22
5.1.3.	Calculo del tirante máximo en función al caudal de máxima avenida.....	23
5.2.	Morfometria de la cuenca.....	23
5.2.1.	Clasificación de la cuenca	24
5.2.2.	Factor de forma	24
5.2.3.	Índice de compacidad.....	24
5.2.4.	Pendiente del cauce principal	25
5.2.5.	Relación de elongación de Schumm (Re)	25
5.2.6.	Orden de cauces	26
5.2.7.	Densidad de drenaje (Dd)	26
CAPITULO 5	27
5.1.	Conclusiones	27
5.2.	Bibliografía.....	28
ANEXOS	29

RESUMEN

El presente trabajo de aplicación tiene la finalidad principal de realizar un estudio de estimación de caudales máximos de avenida, y sus valores a diferentes periodos de retorno, previo ajuste a una función de probabilidad de la precipitación máxima en 24 horas.

Para determinar el caudal máximo de avenida, se tomó en cuenta la morfometría de la cuenca, que nos muestran las características físicas de una cuenca. Los cuales nos permiten conocer el comportamiento de las aguas que se conducen en el río donde se encuentra el puente, así también la geomorfología de la cuenca.

Para el cálculo de los caudales de avenida dentro de la cuenca, se aplicó el método Racional Modificado, la cual nos permite conocer el caudal para diferentes periodos de retorno para 50 y 100 años en la cuenca del río Seco.

Este tipo de método normalmente es utilizado para áreas menores a 200 km² y la cuenca río Seco cuenta con MENOR AREA.

Obtenido el caudal máximo de avenida podemos tener una visión amplia de cuando se puede producir una crecida o caudal extraordinario, para controlar las acciones del agua y evitar que el puente sea inestable.

Palabras clave:

Fenómeno Avenida, cuenca, caudal de diseño, puente, Precipitación, morfometría.

CAPÍTULO 1

1.1. Planteamiento del problema

Generalmente los proyectos que se realizan para el diseño y emplazamiento de puentes, se enfocan más a estudios geotécnicos, al cálculo de la estructura, cálculo de la superestructura y a estudios topográficos.

Si bien se presentan los estudios hidrológicos, que conforman parte de la ingeniería del proyecto, son realizados de manera que no se toman en cuenta la naturaleza de la Cuenca, la morfometría y la biodiversidad que compone la cuenca, entre otros factores importantes, para determinar el caudal máximo cuando existe una máxima avenida en el río para el diseño del puente.

1.2. Justificación del trabajo

Se escogió como método de cálculo, el “Racional Modificado”, ya que presenta una cierta facilidad para el cálculo de sus variables, y su aplicación es la más utilizada en este tipo de proyectos hidrológicos e hidráulicos, aunque se debe tener cuidado con la implementación de las unidades, ya que en función de estas, la ecuación presenta un cambio en la constante presente en el denominador.

Los valores de los caudales resultantes de este proyecto de investigación, tendrán la finalidad de aportar patrones que representan conductas de caudales de creciente, tal que permitan diseños confiables en los diferentes proyectos de ingeniería civil, especialmente en el ámbito hidráulico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Calcular el caudal máximo de avenida diario aplicando el método racional modificado, para determinar el nivel de las aguas máximas extraordinarias en la cuenca hidrográfica de río Seco ubicada en el municipio de la ciudad de El Alto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Delimitar la cuenca río Seco, para realizar la zonificación de acuerdo al tipo de suelo.
- Con los datos de precipitación hallar la intensidad máxima media para un determinado periodo de retorno.
- Realizar los cálculos correspondientes para hallar el caudal máximo aproximado.
- Hallar la altura que alcanza el nivel del río para un periodo de retorno.
- Realizar la caracterización morfométrica de la Cuenca estudiada.
- Determinar factores que permita implementar un puente de manera eficiente.

CAPITULO 2

2.1. Marco teórico

2.1.1. Cuenca hidrográfica

El Estado colombiano, en el artículo 312 del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto ley 2811 de 1974), define la cuenca hidrográfica así: "Entiéndase por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de agua, en un pantano o directamente en el mar"¹. Como se puede apreciar, este es un concepto desde un punto de vista puramente hidrográfico.

Otra definición de cuenca, basada en la concepción hidrográfica, es: "Una hoya o cuenca hidrográfica se puede definir como un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple"². Se debe tener en cuenta que durante este proceso ocurren pérdidas diversas de agua, dichas pérdidas son producto de diferentes factores como evaporación o infiltración del agua en el suelo.

2.1.2. Precipitación (P)

Es parte del ciclo hidrológico que concurre a la condensación, puede presentarse como lluvia, llovizna, nieve, granizo, etc. la precipitación se mide en milímetros o litros de agua que cae en una superficie.

$$P = \frac{\text{Volumen de agua (m}^3\text{)}}{\text{Area o Superficie (m}^2\text{)}}$$

2.1.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

¹ MÓNALVE SAENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Citado por LONDOÑO, Carlos Hernando. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales- caracterización-planificación-administración. Trabajo realizado durante el periodo de año sabático. Ibagué. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería forestal, 2001. 57p.

² La cuenca hidrográfica y sus características físicas. Disponible en: <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/la-cuenca-hidrografica/>

2.1.4. Infiltración

Es un proceso donde el agua se introduce al interior de la tierra después de una precipitación y para completar el balance hídrico el agua se conduce mediante acuíferos para desembocar en un lago, mar, etc. la cantidad de agua que se infiltra al suelo dependerá mayormente de las características del suelo (permeabilidad).

2.1.5. Escorrentía superficial

Es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca o superficie, Es decir la altura en milímetros del agua escurrida y extendida.

$$\text{Escorrentia superficial} = \text{Precipitación total} - (\text{Infiltración} + \text{Evapotranspiración})$$

2.1.6. Caudal (Q)

Caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección (tubería, cañería, oleoducto, río, canal, etc.) por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

$$Q = \frac{V}{T}$$

Dónde:

V: Velocidad en metros cúbicos (m³)

T: Tiempo en segundos (seg)

2.1.7. Intensidad (I)

Es la razón de la cantidad de agua que cae en una superficie y la altura que va aumentando en un determinado lugar y tiempo.

$$Q = \frac{P}{T}$$

Dónde:

P: Precipitación en milímetros (mm)

T: Tiempo en horas (h)

2.1.8. Delimitación de la cuenca hidrográfica

Los caudales efluentes de las cuencas hidrográficas están delimitados por líneas divisorias las cuales son las encargadas de separar las precipitaciones que caen en hoyas inmediatamente vecinas. La divisoria une los puntos de máxima cota entre hoyas.

El Estado Colombiano, en el artículo 2do del decreto número 2857 de 1981 emanado del Ministerio de Agricultura, establece que "una cuenca hidrográfica se delimita por la línea de divorcio de las aguas. Entendiéndose por línea de divorcio la cota o altura máxima que divide dos cuencas contiguas. Cuando los límites de las aguas subterráneas de una cuenca no coincidan con la línea

superficial de divorcio, sus límites se extenderán subterráneamente hasta incluir la de los acuíferos que confluyan hacia la cuenca deslindada por las aguas superficiales"³.

Generalmente, la delimitación de la cuenca como área de estudio, en mapas o fotografías aéreas, se hace siguiendo la línea de mayor altura o divisoria de aguas, hasta encerrar toda el área cuyas aguas drenan a través de un colector común, en una sección o punto considerado, que bien puede ser la desembocadura o cualquier sección dentro del cauce principal. En los mapas, la línea de mayor altura está representada por la forma cóncava que presentan las curvas de nivel, en tanto que los drenajes o partes más bajas están determinados por la forma convexa de las curvas de nivel (Ilustración 1).

El relieve de los sistemas hidrológicos, es decir su topografía, brinda un primer aspecto para el análisis con el fin de demarcar hoyas hidrográficas, regiones donde se presenta escorrentía que es drenada por un cuerpo de agua.

Cuando distintos cauces de agua se encuentran en una misma región, se establecen divisorias para separar y delimitar las áreas de las hoyas; tenemos entonces la divisoria topográfica y la divisoria freática, esta última está relacionada con el caudal base de la hoya; como es muy posible que las dos divisorias no coincidan, es muy frecuente que se utilice la división topográfica para establecer el área de drenaje.

Se puede clasificar los cauces de agua con base en la constancia de escorrentía, para este caso anunciaremos la clasificación dispuesta por Monsalve Sáenz⁷:

- Perennes: corrientes con agua todo el tiempo, el nivel de agua subterránea no desciende nunca debajo del lecho del río.
- Intermitentes: corrientes que escurren durante el periodo de lluvia y se secan durante el verano el nivel de agua subterránea se conserva sólo por encima del lecho del río solo en la estación lluviosa.
- Efímeros: existen durante o inmediatamente después de las precipitaciones.

La divisoria de los cauces de agua se emplea principalmente para identificar el área de la cuenca hidrográfica y su morfometría.

³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 2857 (13, octubre de 1981). Por el cual se dictan las disposiciones generales de las cuencas. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1981. 3 p.

2.1.9. Clasificación de las cuencas hidrográficas

La subdivisión o clasificación de las cuencas hidrográficas se realiza con el fin de hacer manejable el estudio de sus datos hidrométricos, además de caracterizar el área de influencia del cauce.

A continuación, la clasificación de las cuencas por categorías de tamaño⁸¹:

- Microcuenca. Área determinada por divorcios de agua, con una superficie menor o igual a 10.000 Ha (100 *km*²).
- Cuenca pequeña. Área con una superficie mayor a 10.000 Ha, pero menor o igual a 100.000 Ha (1000 *km*²).
- Cuenca mediana. Le corresponde una superficie mayor a 100.000 Ha., pero menor o igual a 500.000 Ha (5000 *km*²).
- Cuenca grande. Es aquella que tiene una superficie mayor de 500.000 Ha, pero menor o igual a 1.000.000 Ha (100.000 *km*²).
- Cuenca muy grande. Es la que tiene una superficie mayor a 1.000.000 de Ha.

2.1.10. Patrón de drenaje

El patrón de drenaje de una cuenca puede definirse como el arreglo que presentan las vías de drenaje, permanentes y transitorias, que contribuyen a evacuar las aguas superficiales de la cuenca. El patrón de drenaje es un elemento compuesto, para cuyo análisis es fundamental tener en cuenta el relieve, la distribución de la vegetación, y las condiciones estructurales de la zona².

2.1.11. Avenida

También denominado crecida de un río, arroyo, etc. Donde existe en aumento inusual de la caudal razón por la cual el lecho donde fluye el agua podría ser insuficiente para contenerlo. Entonces el agua lo desborda y sale fuera del lecho del río natural. Estos acontecimientos podrían ser provocados por el cambio climático, es decir por precipitaciones inesperadas o fuera de lo predicho y causar problemas ya sea en puentes, drenajes y otros.

⁸ SÁNCHEZ, S. F. Una aproximación al proceso de planificación de cuencas hidrográficas. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Agronómica. Ibagué. 1995. 64 p. Citado por LONDOÑO, Carlos Hernando. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales- caracterización-planificación-administración. Trabajo realizado durante el periodo de año sabático. Ibagué. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería forestal, 2001. 70 p.

⁹ ESPAÑA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Citado por LONDOÑO, Carlos Hernando. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales- caracterización-planificación-administración. Trabajo realizado durante el periodo de año sabático. Ibagué. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería forestal, 2001. 74 – 83 p.

2.1.12. Características físicas de la cuenca

Estas características sirven de apoyo para conocer la variación que se va presentar en el régimen hidrológico de la cuenca, una vez que el agua proveniente de la lluvia presentará pérdidas y desviaciones causadas por la morfología de la cuenca, el tipo de suelo, la geología, las prácticas agrícolas, entre otras.

2.1.13. Perímetro

Longitud del límite exterior de la cuenca; el perímetro representa uno de los parámetros más importantes teniendo en cuenta que junto con el área de la cuenca, permite especular acerca de la forma de la cuenca.

2.1.14. Uso y tipo de suelo

El tipo de suelo y su uso afectan la escorrentía: hace que se vea desviada de su curso ocasionando que sea infiltrada a través del suelo. La cobertura vegetal, según la cual las plantas también ejercen una fuerte influencia en la escorrentía directa, no solo en su interpretación hipotética de un coeficiente de escorrentía, sino también en la capacidad de la planta para absorber agua en los periodos húmedos.⁴

La presencia de vegetación, su densidad, estructura, altura, tiempo de instalación y permanencia, son determinantes en el proceso de infiltración. La velocidad de infiltración en suelos forestales es muy superior a la que presentan los suelos agrícolas y urbanos, debido al elevado contenido de materia orgánica de los suelos que soportan vegetación natural (...) a la acción de las raíces las cuales crean innumerables canalillos hasta el subsuelo¹¹.

2.1.15. Longitud del cauce principal

Es la longitud del río principal a donde van a drenar todos los afluentes, va desde la parte más alta de la cuenca hasta la parte más baja. Este parámetro influye en el tiempo de concentración.

Tabla 1: Clases de valores de longitud de cauce principal.

RANGOS DE LONGITUD (KM)	CLASES DE LONGITUD DEL CAUCE
6,9 - 10,9	Corto
11 - 15	Mediano
15,1 - 19,1	Largo

Fuente: valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, citado en el MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE

⁴ LÁVAO PASTRANA, Sergio. Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. Caso de estudio: cuenca del río Murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica. Bogotá DC. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de estudios a distancia. Programa de ingeniería civil, 2014.

⁵ MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE, Volumen 2.1-26p.

2.1.16. Determinación del caudal

2.1.16.1. Método Racional Modificado

El método racional es utilizado para cuencas pequeñas, menores a 25 km², supone que el escurrimiento es proporcional a la lluvia caída, supuesto que se cumple en cuencas impermeables o en la medida que la lluvia crece y el área aportante se satura.⁵

La versión modificada propuesta por J.R. Teméz en 1991, ampliando la aplicación del método racional, toma en cuenta el efecto de la no uniformidad de lluvias mediante un coeficiente de uniformidad.

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6} \times CU$$

Dónde:

Q: Caudal del río (m³/seg)

I: máxima intensidad media de precipitación (mm/h)

A: Superficie de la cuenca (km²)

C: Coeficiente de escorrentía

CU: Coeficiente de uniformidad

2.1.16.2. Área de la cuenca

La delimitación del área de la cuenca se realiza en base a las líneas divisorias del agua, donde todas las aguas de la cuenca desembocaran en el cauce principal de la cuenca.

2.1.16.3. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía, es la fracción de la precipitación que se transforma en caudal, es decir, la relación que existe entre el volumen de escorrentía superficial y la precipitación total.

El Coeficiente de escorrentía no es un factor constante, sino que varía de acuerdo a la magnitud de la lluvia y particularmente con las condiciones fisiográficas de la cuenca hidrográfica (cobertura vegetal, pendientes, tipo de suelo), por esta razón su determinación es un valor aproximado.

³⁴ *Íbid.*, p 17.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de escorrentía es el principal parámetro para la determinación del caudal, se hace necesario saber el uso de suelo del área de la cuenca hidrográfica. La implementación del coeficiente de escorrentías dependerá de la siguiente tabla (Tabla 2) en la cual se relaciona la cobertura vegetal y el tipo de suelo con la pendiente del terreno.

Tabla 2: Coeficiente de escorrentía (c) para T = 10 años.

FACTOR	EXTREMO	ALTO	NORMAL	BAJO
Relieve	0,28-0,35 Escarpado pendientes >30%	0,20-0,28 Montañoso pendientes entre 10 y 30%	0,14-0,20 Con cerros y pendientes entre 5 y 10%	0,08-0,14 Relativamente plano pendientes < al 5%
Infiltración	0,12-0,16 Suelo rocoso, o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08-0,12 Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	0,06-0,08 Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos	0,04-0,06 Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración
Cobertura vegetal	0,12-0,16 Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura	0,08-0,12 Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20% del área con buena cobertura vegetal	0,06-0,08 Regular a buena; 50% del área con praderas o bosques, no más del 50% cultivado	0,04-0,06 Buena a excelente; 90% del área con praderas, bosques o cobertura equivalente
Almacena- miento Superficial	0,10-0,12 Despreciable, pocas depressiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08-0,10 Baja, sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas húmedas	0,06-0,08 Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04-0,06 Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos.

Si T > 10 años Amplificar Resultado por: T = 25: C x 1.10 T = 50: C x 1.20 T = 100: C x 1.25

Fuente: valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, citado en el MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE

2.1.16.4. Pendiente media (Sm)

Es la variación de la inclinación de una cuenca. Su determinación es muy importante porque afecta directamente a la velocidad con la que se da la escorrentía superficial; o el tiempo que lleva el agua de lluvias para concentrarse en el cauce principal.

2.1.16.5. Periodo de retorno

El periodo de retorno es el tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado por lo menos una vez.

Tabla 2: Periodo de retorno para puente y viaductos.

Tipo de estructura	Periodo de retorno (años)	Vida útil supuesta (años)	Riesgo de falla (%)
Puentes y viaductos			
Carretera	200	50	22
camino	100	50	39

Fuente: valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, citado en el MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

Dónde:

R: Riesgo de falla

T: Periodo de retorno (años)

A: número de años

2.1.16.6. Tiempo de concentración⁷:

El tiempo de concentración se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía (agua que cae y se transporta por el lecho del río) de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado a la salida de la cuenca, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante. Este valor ha sido tocado por varios autores, por lo que su cálculo es alejado dependiendo del autor que sea consultado; por lo tanto, este cálculo es atributo del investigador.

La determinación del tiempo de concentración se realiza con ayuda de tablas o ecuaciones empíricas, destacando las ecuaciones de Bransby-Williams, SCS-Ranser, Kirpich y V.T. Chow.

⁷ íbid.

$$t = 0,0078 \times \left(3,28 \times \frac{L_c}{S_m^{0,5}} \right)^{0,77}$$

Según Norma Española:

$$t = 0,3 \times \left(\frac{L_c}{S_m^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Dónde:

t: Tiempo de concentración (min)

L: Longitud de cauce (m)

S: Pendiente de cauce principal (m/m)

2.1.16.7. Curva intensidad – duración – frecuencia (IDF)8

Es una herramienta útil para el diseño hidrológico de caudales máximos, cuando se utilizan modelos lluvia-escorrentía como los hidrogramas unitarios o el método racional. Es así como un gran número de proyectos hidrológicos, como el diseño de evacuadores de crecidas, construcción de puentes, construcción de redes de

Drenaje, entre otros, se define en relación con la máxima precipitación que se podría esperar para un determinado período de retorno. A partir de estos eventos extremos, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen los criterios de predicción y de riesgo.

2.1.16.8. Longitud del cauce principal (L)

El cauce principal es la concavidad natural del terreno, por donde fluye el curso principal del agua y recibe los afluentes de toda la cuenca tiene inicio en el punto más alto de la cuenca y su fin en el punto de control o fin de la cuenca.

2.1.16.9. Pendiente del cauce principal (S)

Es la relación entre la altura total del cauce principal y la longitud del mismo.

$$S_m = \frac{h_{\text{sup.}} - h_{\text{min.}}}{L_c} \times 100 \%$$

Dónde:

h sup.: Altura superior (m)

h inf.: Altura inferior (m)

Lc: Longitud de cauce (m)

Sm: Pendiente de cauce principal (m/m)

2.1.16.10. Coeficiente de uniformidad (Cu)

El coeficiente de uniformidad CU corrige el supuesto reparto uniforme de la escorrentía en el intervalo de cálculo de duración igual al tiempo de concentración contemplado en el método racional. El coeficiente de uniformidad varía de un aguacero a otro, su valor medio en una cuenca concreta depende de su tiempo de concentración. Según J. R. Témez, su estimación, en valores medios, puede realizarse según la siguiente expresión:

$$CU = 1 + \frac{t^{1,25}}{t^{1,25} + 14}$$

Dónde:

t: tiempo de concentración (h)

2.1.16.11. Nivel máximo de aguas extraordinarias

Es el nivel máximo que alcanzaran las aguas para un caudal máximo probable, dato que es de vital importancia para calcular la altura máxima de un puente.

Con el caudal calculado y utilizando la fórmula de Manning se obtendrá una nueva altura de agua, que será mayor a la marca de la huella dejada por el agua.

$$Q_{max} = \frac{A^{\frac{5}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{2}{3}} \times n} \rightarrow Q_{max} = \frac{(A_a + \&A)^{\frac{5}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{(1.1P)^{\frac{2}{3}} \times n}$$

$$\&A = \left(\frac{Q_{max} \times n \times (1.1P)^{\frac{2}{3}}}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} - A_a$$

$$\&A = (B_a + \&H) \times H$$

2.1.17. Morfometría de la cuenca⁹

Son las características físicas de la cuenca que tiene una estrecha relación con el comportamiento de los caudales que transitan por ella, los resultados pueden inferir la presencia de avenidas o crecidas que para controlarla se deben realizar obras estructurales de protección.

2.1.17.1. Forma de la cuenca

Representando la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca⁹, este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, desde rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas. Es un parámetro adimensional que denota cuán cuadrada es la cuenca.

⁹ MANUAL DE HIDROLOGÍA Y DRENAJE, Volumen 2.1-27p.

$$F_f = \frac{A}{L_c}$$

Donde:

A: área de la cuenca

Lc: Longitud de cauce

2.1.17.2. Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (kc)

Se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca, obtenida relacionando el perímetro de la cuenca con el área de un círculo igual al de la cuenca (círculo equivalente).

Teniendo en cuenta la relación anterior, el índice de compacidad se define como:

$$K_c = 0,282 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde.

P: perímetro de la cuenca

A: área de la cuenca.

Cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad; a partir de éste se define la forma de la cuenca tomando como criterio los rangos que se muestran a continuación.

- Kc 1.00 – 1.25: Cuenca redonda a oval redonda.
- Kc 1.25 – 1.50: Cuenca de oval redonda a oval oblonga.
- Kc 1.50 – 1.75: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga.¹⁴

2.1.17.3. Relación de elongación de schumm (Re)

Es la relación del diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca, cuyo diámetro sea igual a la longitud de la cuenca.¹⁰

$$R_e = 1,128 \times \frac{\sqrt{A}}{L_c}$$

Donde.

A: área de la cuenca.

Lc: Longitud de cauce

Cuanto más se acerque a la unidad la cuenca es plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales la relación de elongación es de 0,8 a 0,5.

2.1.17.4. Orden de la cuenca

Refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca.

¹⁴ CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. 34 p.

- Corrientes de primer orden: pequeños canales que no tiene tributarios.
- Corrientes de segundo orden: cuando dos corrientes de primer orden se unen.
- Corrientes de tercer orden: cuando dos corrientes de segundo orden se unen.
- Corrientes de orden n+1: Cuando dos corrientes de orden n se unen.

2.1.17.5. Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la hoya y su área total.

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

Lt: Longitud total

A: área de la cuenca

Usualmente toma valores entre 0.5 Km/Km² para hoyas con drenaje pobre, hasta 3.5 Km/Km² para hoyas excepcionalmente bien drenadas¹⁸

2.1.17.6. Pendiente de la cuenca

Es la variación de la inclinación de una cuenca. Su determinación es muy importante pues define el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas de suelo: en zonas de alta pendiente son más ocurrentes los problemas de erosión, mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación²¹.

Esta característica afecta directamente la velocidad con la que se da la escorrentía superficial; es decir el tiempo de formación que lleva el agua de lluvias para concentrarse en el cauce principal.

El método a utilizar para la obtención de la pendiente del terreno de la cuenca, será el de las cuadrículas asociadas a un vector; Este método consiste en determinar la distribución porcentual de las pendientes de los terrenos por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel de un número grande de puntos dentro de la hoya.²²

¹⁸ SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-39.

²¹ CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. P-39.

²² SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-41 .

CAPÍTULO 3

3.1. Estudio de la cuenca rio seco

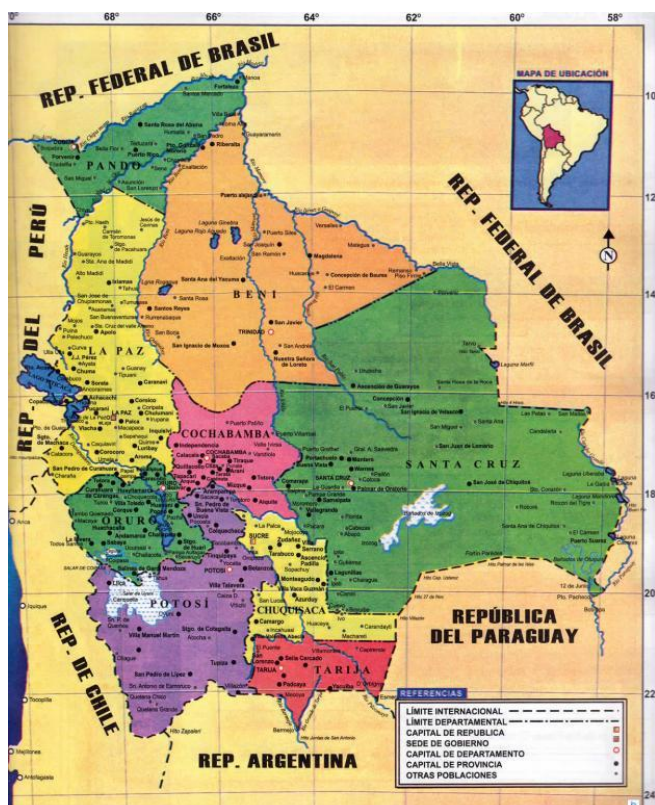
3.2. Ubicación política y geográfica

La cuenca rio Seco, se encuentra situado en el Departamento de La Paz, Provincia Murillo, Municipio Ciudad de El Alto, en la parte noroeste del presente municipio.

Según el software Google Earth Pro, El rio Seco tiene una longitud de 18.3 km, misma que se encuentran entre las coordenadas UTM:

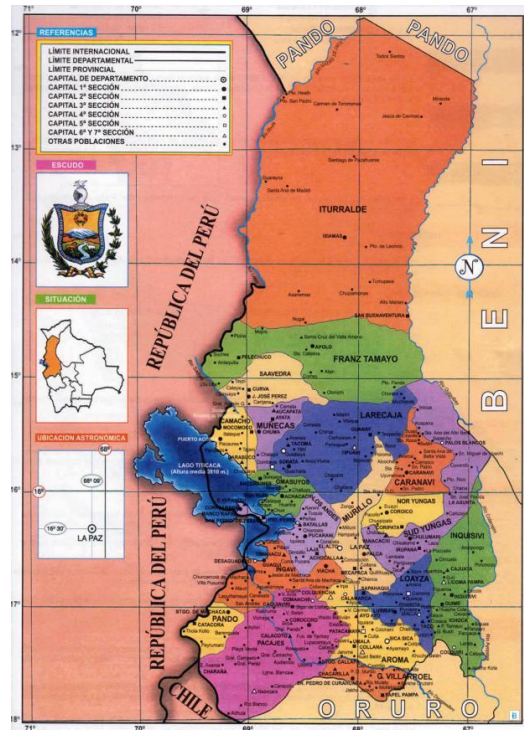
Este: de 590368.00 m a 583443.00 m
Norte de 8189429.00 m a 8173969.00 m

Figura 1. Mapa político de Bolivia.



Fuente: <https://www.educa.com.bo/content/departamento-de-la-paz>

Figura 2. Mapa político de La Paz.



Fuente: <https://www.educa.com.bo/content/departamento-de-la-paz>

Figura 3. Ubicación Puente Bolivia – río Seco.



Nota: La imagen representa la longitud de cauce del río Seco desde el inicio de la cuenca hasta el punto de estudio del río (Puente Bolivia). Tomado desde el software Google Earth.

La construcción de Puente Bolivia se realizó para el transporte vehicular y peatonal, no se logró recolectar información sobre los estudios hidrológicos que se realizó para el diseño del puente.

Figura 4. Ubicación Puente Bolivia – rio Seco.



Nota: La imagen representa la morfología del punto de estudio. Tomado de cámara de celular (2021).

Figura 5. Ubicación Puente Bolivia – rio Seco.



Nota: la imagen representa el rio que pasa por el punto de estudio puente Bolivia. Tomado de cámara de celular (2021).

En relación al estudio hidrológico que se haya realizado o no para el diseño del puente Bolivia, ya que hasta la fecha no se presentó el fenómeno avenida.

CAPITULO 4

4.1. Memoria de cálculo

4.1.1. Calculo de caudal de diseño por el método racional modificado

Se utiliza este método debido a que el tamaño de la cuenca supera los 25 *km*.

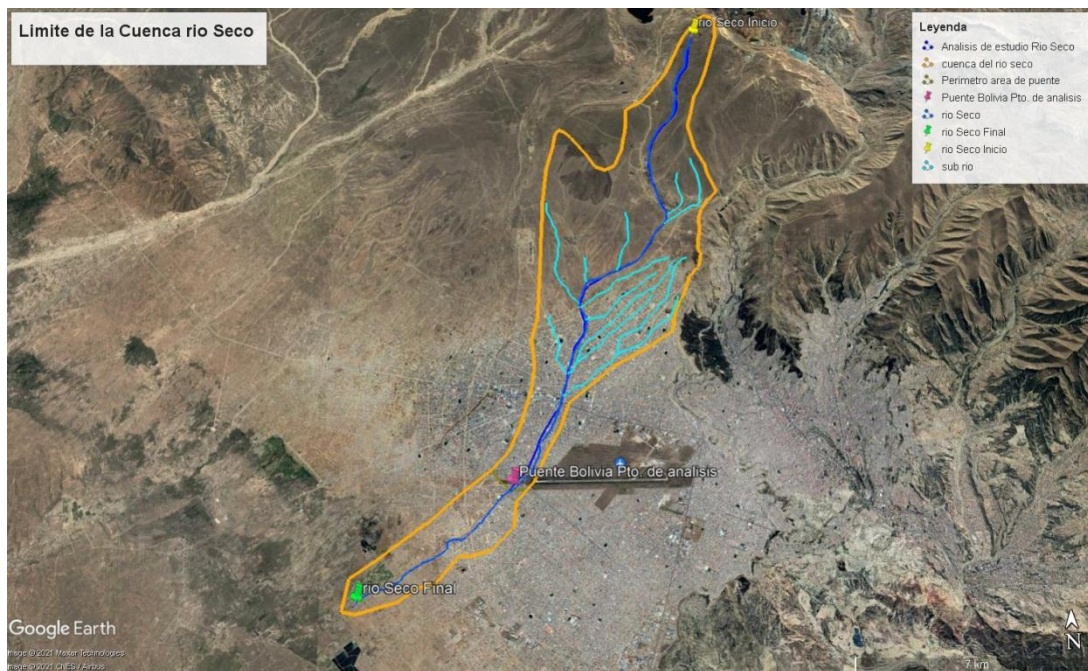
Ecuación:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6} \times CU$$

4.1.2. Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de la cuenca del área de estudio se realizó mediante un software Google Earth, siguiendo la línea de divisoria de aguas, hasta encerrar toda el área cuyas aguas llegan al río principal río Seco.

Figura 6. Límite de la Cuenca rio Seco.



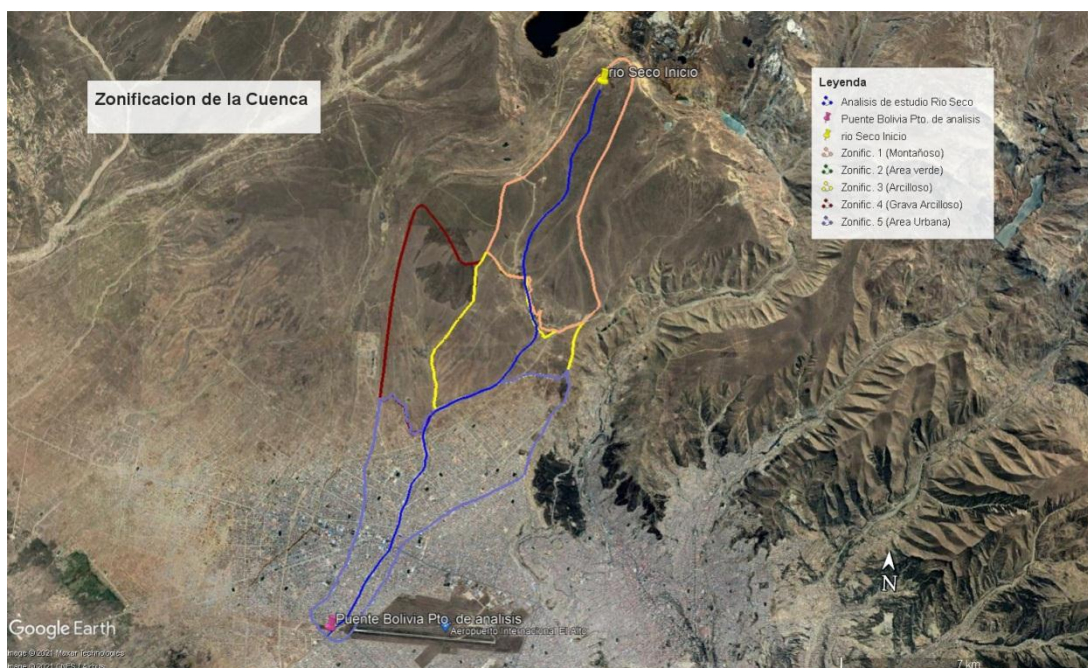
Nota: La imagen representa el límite de la Cuenca de río Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

4.1.3. Calculo del coeficiente de escorrentía

La cuenca de estudio cuenta con distintas características morfológicas, por lo tanto, debemos hallar un coeficiente de escorrentía ponderado en base a sus características principales como ser la vegetación, pendientes, tipo de suelo y otros.

4.1.4. Zonificación de la cuenca

Figura 7. Zonificación de la Cuenca rio Seco.



Nota: La imagen representa la zonificación de la cuenca de rio Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

Tabla 3: Resumen del área zonificada:

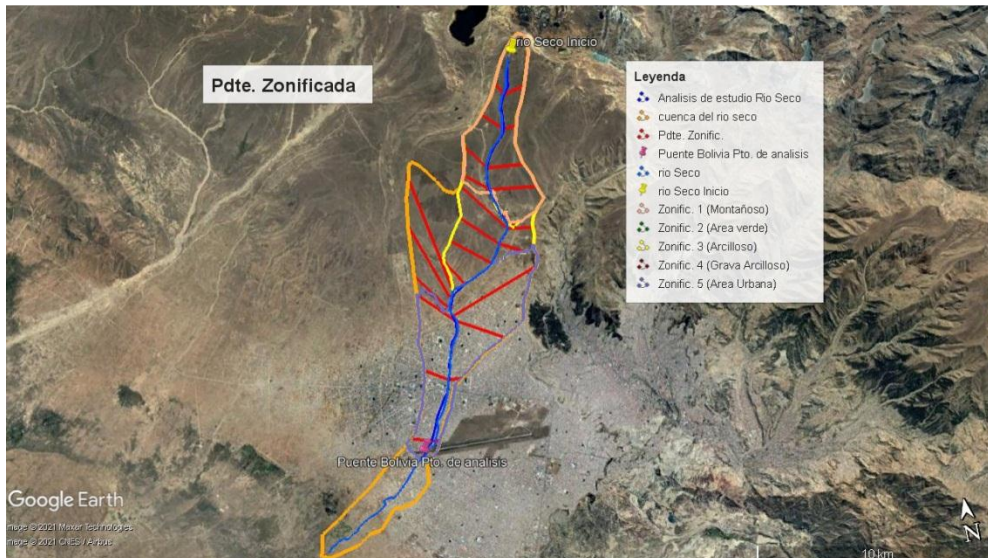
N	ZONA	AREA (Km ²)
1	Montañoso con Pdte.	12,90
2	Espacios de Vegetación escasa	0,22
3	Arcilloso	8,86
4	Grava arcilloso	9
5	Área urbana	19,4
TOTAL		50,38

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5. Pendiente media de la cuenca (sm)

Obtenemos la pendiente media de todas las zonas delimitadas tomando valores de altura máxima y mínima de cada zona delimitada.

Figura 8. Zonificación de la Cuenca río Seco con pendientes.



Nota: La imagen representa la pendiente de la cuenca de río Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

Tabla 4: Resumen de la pendiente media zonificada.

N	ZONA	AREA (Km ²)	PDTE. MEDIA (%)	AREA x PDTE. MEDIA
1	Montañoso	12,90	6,33	81,66
2	Área verde	0,22	15,96	3,51
3	Arcilloso	8,86	1,01	8,95
4	Grava arcilloso	9,00	3,21	28,89
5	Área urbana	19,40	1,14	22,12
Σ =		50,38		145,13

Fuente: Elaboración Propia. (Ver anexo 1).

La pendiente media de la cuenca (S_m):

$$S_m = \frac{\sum(A_i \times S_i)}{\sum A_i} \rightarrow S_m = \frac{145,13}{50,38}$$

$$S_m = 2,88 \%$$

Tabla 4: Resumen de coeficiente de escorrentía.

N	ZONA	AREA (A _i) (Km ²)	COEFIC. DE ESCORRENTIA (C _i)	(A _i) x (C _i)
1	Espacios de Vegetación escasa	12,90	0,25	3,23
2	Suelos arcillosos	0,22	0,15	0,03
3	Suelos arenosos	8,86	0,15	1,33
4	Grava arcilloso	9,00	0,08	0,72
5	Area urbana	19,40	0,70	13,58
Σ =		50,38		18,89

Fuente: Elaboración Propia. (Ver anexo 1).

Finalmente determinamos el Coeficiente de Escorrentía ponderada (C_{ponderada})
(Ver anexo 1)

Ecuación:

$$C_{ponderada} = \frac{\sum(A_i \times C_i)}{\sum A_i} \rightarrow C_{ponderada} = \frac{18.89}{50,13}$$

$$C_{ponderada} = 0,37$$

4.1.6. Calculo de la intensidad

Para calcular la intensidad primeramente se debe obtener los valores de periodo de retorno y el tiempo de concentración.

4.1.7. Periodo de retorno

Definido a partir del tiempo de utilidad del puente y el riesgo.

Tabla 5: Periodo de retorno para años.

Tipo de Obra	Tipo de Ruta	Periodo de retorno en años (T)
Puente	Camino	100

Fuente: valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, citado en el MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE.

4.1.8. Tiempo de concentración

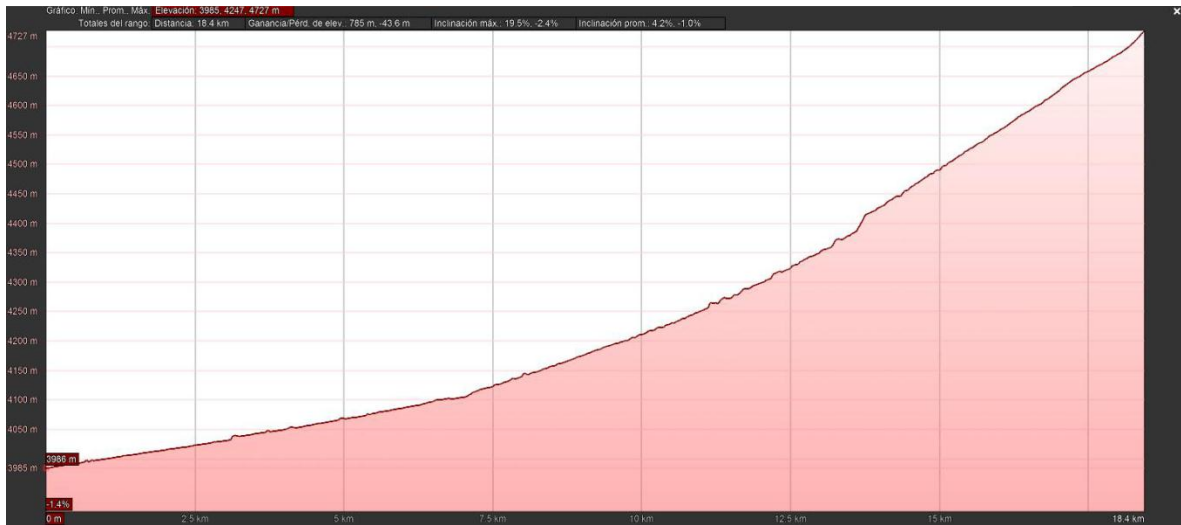
Para el cálculo del tiempo de concentración debemos obtener los valores de la longitud del cauce y la pendiente media de la cuenca.

4.1.9. Longitud del cauce principal (Lc)

5. La longitud del cauce principal de estudio es de **18,40 km**.

5.1.1. Pendiente del cauce (Sm)

Figura 8. Pendiente del río Seco.



Nota: La imagen representa la pendiente de la cuenca de río Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

De la ecuación

$$S_m = \frac{h_{\text{sup.}} - h_{\text{min.}}}{L_c} \times 100 \% \quad \rightarrow \quad S_m = \frac{4726 - 3986}{18400} \times 100 \%$$

$$S_m = 4.02 \%$$

Tabla 5: Clasificación de pendiente según longitud de cauce.

PENDIENTE (%)	TIPO DE TERRENO:
5	Suave

Fuente: valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, citado en el MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE.

Finalmente, el **tiempo de concentración (t)** es:

Ecuación:

$$t = 0,0078 \times k^{0,77}$$

Ecuación.

$$k = 3,28 \times \frac{L_c}{S_m^{0,5}} \rightarrow k = 3,28 \times \frac{18400}{0,0402^{0,5}} \rightarrow k = 301008,42$$

$$t = 0,0078 \times 301008,42^{0,77}$$

$$t = 129 \text{ min}$$

Según Norma Española:

$$t = 0,3 \times \left(\frac{L_c}{S_m^{0,25}} \right)^{0,76} \rightarrow t_c = 0,3 \times \left(\frac{18400}{0,0402^{0,25}} \right)^{0,76} \rightarrow t_c = 5,05 \text{ hr} \approx t_c = 303,00 \text{ min}$$

El tiempo que tarda en llegar la gota más alejada de la Cuenca al punto de control es **216 (min)**.

Entonces la máxima intensidad media para el periodo de retorno es:

Ecuación:

Finalmente determinamos la Intensidad de la precipitación (I) de la cuenca de rio Seco es:

Ecuación: **(Ver anexo 2 de cálculos)**

$$I = \frac{138,1298 \times T^{0,195649}}{t^{0,61639}} \rightarrow I = \frac{138,1298 \times 100^{0,195649}}{129^{0,61639}}$$

$$I = 40,26 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$$

La intensidad máxima media para un periodo de retorno (T) igual a 100 años y según la clasificación de intensidad media en una hora es:

Tabla 6: Clasificación de intensidad media en una hora.

Clase	Intensidad media en una hora (mm/hr)
Muy Fuertes	> 30 y ≤ 60

Fuente: valores recomendados por el Estado de California en su última versión de 1995, citado en el MANUAL DE HIDROLOGIA Y DRENAJE.

5.1.2. Calculo del coeficiente de uniformidad

Ecuación:

$$CU = 1 + \frac{t^{1,25}}{t^{1,25} + 14} \rightarrow CU = 1 + \frac{3,60^{1,25}}{3,60^{1,25} + 14}$$

$$CU = 1,26$$

Finalmente, el caudal máximo modificado para un periodo de retorno T = 100 años es:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6} \times CU \rightarrow Q = \frac{50,38 \times 0,37 \times 40,26}{3.6} \times CU$$

$$Q = 262,66 \frac{m^3}{s}$$

5.1.3. Cálculo del tirante máximo en función al caudal de máxima avenida

Con el caudal máximo calculado se ingresara a la fórmula de Manning y se hallara el nuevo valor de la altura: (Ver anexo 3)

Tabla 7: Resumen de sección transversal del río Seco (Puente Bolivia).

Cota de N.A.M.E dejada por las huellas (m.s.n.m.) (*1)	3986.50
Aa: Área de la sección del río en la avenida (m2)	50,38
P: perímetro mojado de la avenida (m)	42,60
S: pendiente de la superficie del fondo de cauce(m/m)	0,0420
n: rugosidad del cauce del río. (*2)	0,69

Fuente: Elaboración propia.

Ecuación:

$$Q_{max} = \frac{A^{\frac{5}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{2}{3}} \times n} \rightarrow Q_{max} = \frac{(A_a + \&A)^{\frac{5}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{(1.1P)^{\frac{2}{3}} \times n}$$

$$\&A = \left(\frac{Q_{max} \times n \times (1.1P)^{\frac{2}{3}}}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{5}} - A_a \rightarrow \&A = 10,45 m^2$$

$$\&A = (B_a + \&H) \times H = 10,45 m^2$$

$$\&H = 0,51 m$$

NUEVA COTA N.A.M.E. = 3987,01 m.s.n.m.

La altura que alcanza el agua supera a la altura por donde se conduce el agua (0,08 (m)).

5.2. Morfometría de la cuenca

Figura 9. La Morfometría de la cuenca.



Nota: La imagen representa la morfometría de la cuenca de rio Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

Tabla 8: Datos de la Cuenca de rio Seco.

Descripción	Und.	Medidas
Área de la cuenca	km ²	54,8
Perímetro de la cuenca	Km	54,4
Longitud del cauce	Km	24,8

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. Clasificación de la cuenca

Luego de delimitar la cuenca se realiza la clasificación de la cuenca

5.2.2. Factor de forma

$$F_f = \frac{A}{L_c} \rightarrow F_f = \frac{54.8}{24.8} \rightarrow F_f = 0.09$$

Se encuentra en los rangos de

5.2.3. Índice de compacidad

Ecuación:

$$F_f = 0,282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \rightarrow F_f = 0,282 \times \frac{54,4}{\sqrt{54,8}}$$

$$F_f = 2,07$$

El resultado nos indica que la cuenca es rectangular y existe la posibilidad de que no se cubra por completo la cuenca de lluvia.

5.2.4. Pendiente del cauce principal

Figura 9. Pdte. De la cuenca rio Seco.



Nota: La imagen representa la pendiente de la cuenca de río Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

$$S_m = \frac{h_{\text{sup.}} - h_{\text{min.}}}{L_c} \times 100 \% \quad \rightarrow \quad S_m = \frac{4727 - 3920}{24800} \times 100 \%$$

$$S_m = 1,29 \% \text{ Pdte. De la cuenca rio Seco}$$

El resultado nos indica que la cuenca.....

5.2.5. Relación de elongación de Schumm (Re)

$$F_f = 1,128 \times \frac{\sqrt{A}}{L_c} \rightarrow F_f = 1,128 \times \frac{\sqrt{A}}{L_c}$$

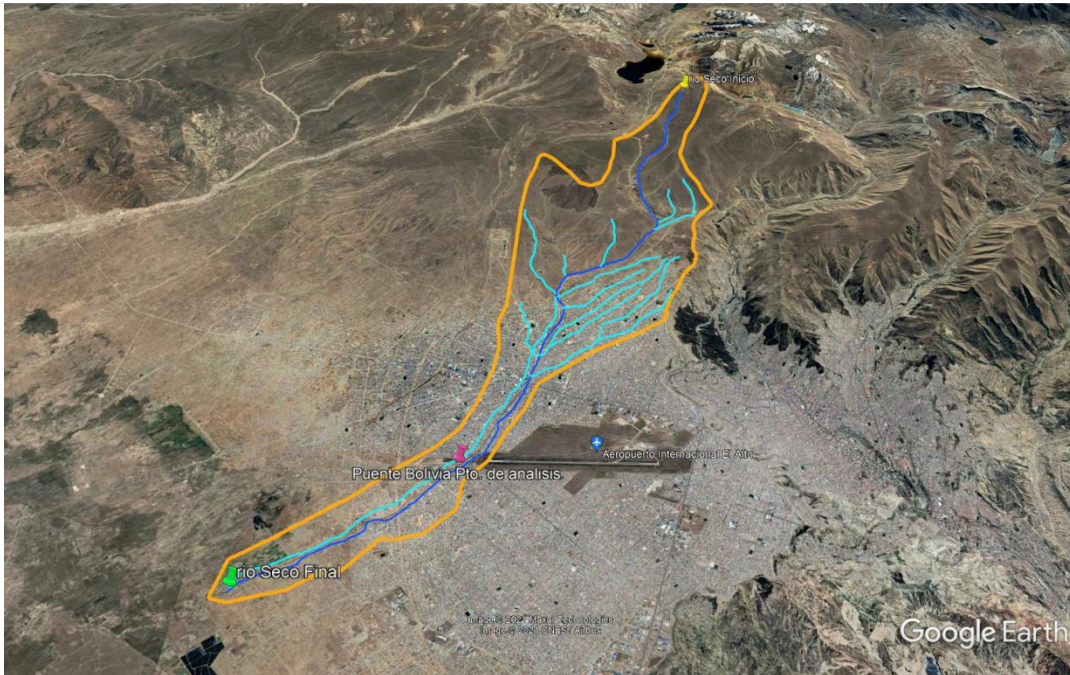
$$F_f = 0,21$$

Cuanto más se acerque a la unidad la cuenca es plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales la relación de elongación es de 0,8 a 0,5.

5.2.6. Orden de cauces

El sistema de drenaje de la cuenca mayormente es de orden 2 por lo tanto la reacción a una tormenta será inmediata, evacuando el agua en menor tiempo.

Figura 10. Ordenes de cauce.



Nota: La imagen representa los ríos de la cuenca de río Seco. Tomado captura de Google Earth (2021).

5.2.7. Densidad de drenaje (Dd)

$$D_d = \frac{L_t}{A} \rightarrow D_d = \frac{39,36}{54,80}$$

$$D_d = 0,72 \frac{km}{km^2}$$

El resultado indica que la cuenca tiene drenaje pobre porque es menor a 0,5 (km/km²)

CAPITULO 5

5.1. Conclusiones

En conclusión, de acuerdo a los cálculos matemáticos y estadísticos Hidrológicos realizados para verificar el caudal máximo de avenida según el método Racional Modificado, se observó que para un periodo de retorno $T=100$ años el caudal máximo que puede producirse en el puente de Bolivia es igual a $Q = 262.66 \text{ m}^3/\text{seg}$, dato que posterior nos ayuda a calcular el N.A.M.E. y con la fórmula de Mannig, nos calcula el nuevo nivel que puede producir el río, $H = 0.08\text{m}$, lo que indica que no se producirá el efecto avenida en el puente Bolivia.

Por otra parte desde el factor de forma y el índice de compacidad indican que la cuenca no tiende a que se presenten avenidas, debido a que tiene una forma relativamente alargada, pero existen otros indicadores que se muestran en la siguiente tabla, dando una probabilidad que puede o no presentarse el fenómeno avenida en el cauce de la cuenca de río Seco, para evitar la inestabilidad del puente Bolivia.

Tabla 8: Resumen de resultados.

Indicador	Resultados	Interpretación
Relación de elongación	0,21	Indicador de que existen sitios con porciones accidentales por lo tanto BAJA SUCEPTIBILIDAD A LAS AVENIDAS
Orden de cauces	2	Indicador de que las aguas se evacuaran con mayor rapidez al tener varias vertientes.
Densidad de drenaje	0,72	Indicador de que las aguas se escurren menor rapidez.
Intensidad	40,26 (mm/h)	Indicador de que las precipitaciones que se Presentarían son fuertes.
N.A.M.E.	3787,01 m.s.n.m.	Indicador de la altura que alcanza el agua, el cual Sobrepasa la altura del cauce (3786,00) por lo tanto el PUEDE QUE SE PRESENTE EL FENOMENO AVENIDA.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Bibliografía

MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Bogotá, Colombia: Editorial Escuela colombiana de Ingeniería, 1995. 360p.

VEN TE, Chow. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw- Hill, 1994. 598 p.

Como calcular la pendiente media de una cuenca hidrográfica. Disponible en: <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/como-calcular-la-pendiente-media-de-una-cuenca-hidrografica/>

MANUAL DE DRENAJE VIAL , Volumen 2, Revisado por la ABC.

MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 182 p y 37 p.

ESPAÑA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Citado por LONDOÑO, Carlos Hernando. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales- caracterización-planificación-administración. Trabajo realizado durante el periodo de año sabático. Ibagué. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería forestal, 2001. 74 – 83 p.

SÁNCHEZ, S. F. Una aproximación al proceso de planificación de cuencas hidrográficas. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Agronómica. Ibagué. 1995. 64 p. Citado por LONDOÑO, Carlos Hernando. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales- caracterización-planificación- administración. Trabajo realizado durante el periodo de año sabático. Ibagué. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería forestal, 2001. 70 p y 86 p.

CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, BARROSO, Fabián Ulises, REYES TRUJILLO, Aldemar. Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas Universidad Del Valle, 2010. 34p - 35 p

SAENZ M. GERMAN. Hidrología en la Ingeniería, escuela colombiana de ingenieros, Cuencas hidrográficas. P-39.

Revista ciencia unemi nº 2, diciembre 2014, pp. 100 - 110 issn: 1390 – 427 frank miller gonzalez espinosa. Cálculo del caudal de la cuenca hidrológica de la quebrada guaguaqui, del departamento de boyacá, por el método racional

Silva medina, gustavo. hidrología en cuencas pequeñas con información escasa. <http://revistas.unal.edu.co/mwgninternal/de5fs23hu73ds/progress?id=v170p9wzgaun2ubodcxe117uv95ectkit8hvuom9nu,&dl>. citado el día 24 de agosto de 2016

ANEXOS

ANEXO1.

Tabla 9: Cálculo de la pendiente mínima de la cuenca de estudio.

ZONA	LADO IZQUIERDA		LADO DERECHA	
	ALTURA SUPERIOR (m)	ALTURA INFERIOR (m)	ALTURA INFERIOR (m)	ALTURA MAYOR (m)
	Z1	4524	4620	4620
4592		4528	4528	4548
4488		4404	4404	4429
4379		4274	4274	4404
Z2	4368	4335		
	4306	4302	4302	4307
	4313	4277		
	4283	4269		
Z3	4376	4275	4275	4280
	4294	4290	4290	4294
	4227	4207		
	4167	4141		
Z4	4287	4127		
	4223	4124		
	4193	4122		
Z5	4265	4100		
	4165	4096	4096	4134
	4061	4049	4049	4060
	3999	4006	4006	4008

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Cálculo de la pendiente mínima de la cuenca de estudio.

ZONA	DISTANCIA	DISTANCIA	PENDIENTE	PENDIENTE	PDTE. MEDIA (%)
	LADO IZQUIERDA (m)	LADO DERECHA (m)	LADO IZQUIERDA (%)	LADO DERECHA (%)	
Z1	590,15	868,43	16,27	1,5	6,33
	1079,28	547,3	5,93	3,65	
	1297,27	1483,94	6,48	1,68	
	1249,51	1934,21	8,4	6,72	
Z2	236,31		13,96		15,96
	43,88	23,66	9,12	21,13	
	212,02		16,98		
	446,72		3,13		
Z3	2584,65	1036,64	3,91	0,48	1,01
	1928,53	1157,13	0,21	0,35	
	1942,98		1,03		
	1228,57		2,12		
Z4	5117,25		3,13		3,21
	3533,74		2,8		
	1924,11		3,69		
Z5	4086,61		4,04		1,17
	1875,53	2170,68	3,68	1,75	
	1086,56	518,78	1,1	2,12	
	895,26	323,19	0,78	0,62	

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 2

CALCULO DE LA ECUACION DE LA INTENSIDAD (GUMBEL)

Tabla 10: Precipitación máxima diaria en la estación rio Seco.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1986	****	****	****	****	****	0,1	2,2	20,3	14,5	15,2	8,6	24,7	24,7
1987	23,8	4,4	25,6	5,4	5,3	0,2	1,5	2,5	9,5	17	9	31,1	31,1
1988	18	14,5	23,8	20,5	9,4	0	0	0	8,7	5,2	5,3	31,9	31,9
1989	26,5	15,7	5,8	12,5	10,7	4,6	3	9	4	7,5	13,2	15	26,5
1990	45,5	14,9	9,5	5,7	9,5	19	3	2	9,5	6	23	25	45,5
1991	****	****	20,1	5,7	7,8	17,2	0,5	0	11,3	7,6	11,3	11	20,1
1992	47,8	14,2	9,1	13,4	0	7,9	6,7	15,1	5,3	15,8	25,5	15,1	47,8
1993	32,2	8,7	10,9	26	4,5	9,3	2,9	21,5	11,8	11,9	19,3	20	32,2
1994	17,4	16,2	25,2	21	1,8	13,1	2,4	2	9,1	7,2	11,1	14,3	25,2
1995	21,5	40	18,6	11,5	2,3	0	0	7,2	6,1	13,3	13,7	31	40,0
1996	57,2	14,8	12,4	31,6	8	0	6,2	7,2	14	6,5	14,1	15,4	57,2
1997	22,2	20,3	24,2	13,8	5,6	0	0	2,9	19,7	10	19,5	9,6	24,2
1998	23,5	17,8	27,7	59,2	0,4	8,8	0	2,2	3	18,4	24,8	19,4	59,2
1999	34,4	11,6	21	8,8	19,4	2,5	3	2,9	26,7	12,9	9,2	22,5	34,4
2000	31,5	11,7	17,4	4,7	8,4	5,6	0,2	7,9	1,1	14,5	6,8	32,5	32,5
2001	23,4	19,3	13,8	8,3	8,4	3,3	5,4	15,7	4,6	18,2	16,8	26,5	26,5
2002	22,5	34,7	35,7	8,8	3,4	11,5	8,2	3,7	9,1	25,4	13,5	14,2	35,7
MAX	35,4	75,0	20,8	17,4	8,9	4,0	8,3	13,4	11,0	15,0	20,0	41,3	57,2

Fuente: SENHAMI.

Tabla 11: Registros pluviométricos Estación Bolívar - Método Gumbel.

No	Año	Mes	Precipitación (mm)	
		Max. Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1986	DIC	24,7	105,73
2	1987	ENE	31,1	15,07
3	1988	FEB	31,9	9,50
4	1989	FEB	26,5	71,95
5	1990	DIC	45,5	110,62
6	1991	MAR	20,1	221,48
7	1992	FEB	47,8	164,29
8	1993	DIC	32,2	7,74
9	1994	FEB	25,2	95,69
10	1995	DIC	40,0	25,18
11	1996	ENE	57,2	493,62
12	1997	FEB	24,2	116,26
13	1998	MAR	59,2	586,49
14	1999	ABR	34,4	0,34
15	2000	MAY	32,5	6,16
16	2001	JUN	26,5	71,95
17	2002	JUL	35,7	0,52
Suma			594,7	2102,60

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 34,98 \text{ mm}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 14,50 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s =$$

11,31 mm

$$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha = 28,46 \text{ mm}$$

Para el modelo de probabilidad:

$$F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}}$$

Según el estudio de miles de estaciones - año de datos de lluvia, realizado por L. L. Welss, los resultados de un análisis probabilístico llevado a cabo con lluvias máximas anuales tomadas en un único y fijo intervalo de observación, al ser incrementados en un 13% conducían a magnitudes más aproximadas a las obtenidas en el análisis basado en lluvias máximas verdaderas. Por tanto el valor representativo adoptado para la cuenca será multiplicado por 1.13 para ajustarlo por intervalo fijo y único de observación.

Tabla 12: Registros pluviométricos Estación Bolívar - Método Gumbel.

Periodo	Variable	Precip.	Prob. de	Corrección
Retorno	Reducida	(mm)	ocurrencia	intervalo fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0,3665	32,6003	0,5000	36,8384
5	1,4999	45,4147	0,8000	51,3187
10	2,2504	53,8990	0,9000	60,9059
25	3,1985	64,6189	0,9600	73,0193
50	3,9019	72,5715	0,9800	82,0058
75	4,3108	77,1938	0,9867	87,2290
100	4,6001	80,4654	0,9900	90,9259
500	6,2136	98,7069	0,9980	111,5388

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

ECUACIÓN DE INTENSIDAD

Las relaciones o cocientes a la lluvia de 24 horas se emplean para duraciones de varias horas.

D. F. Campos A. propone los siguientes cocientes:

Valores concluidos para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas

Fuente: D. F. Campos A., 1978

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Estos datos serán obtenidos como un porcentaje de los resultados de la *precipitación máxima probable* para 24 horas, para cada período de retorno, diferentes porcentajes de este valor según los tiempos de duración de lluvia adoptados.

Tabla 13: Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.

Tiempo de Duración	Cociente	P.M.P. (mm) para diferentes tiempos de duración Sg. Periodo de Retorno							
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	500 años
24 hr	X24	36,8384	51,3187	60,9059	73,0193	82,0058	87,2290	90,9259	111,5388
18 hr	X18 = 91%	33,5229	46,7000	55,4243	66,4476	74,6252	79,3784	82,7425	101,5003
12 hr	X12 = 80%	29,4707	41,0549	48,7247	58,4154	65,6046	69,7832	72,7407	89,2311
8 hr	X8 = 68%	25,0501	34,8967	41,4160	49,6531	55,7639	59,3157	61,8296	75,8464
6 hr	X6 = 61%	22,4714	31,3044	37,1526	44,5418	50,0235	53,2097	55,4648	68,0387
5 hr	X5 = 57%	20,9979	29,2516	34,7163	41,6210	46,7433	49,7205	51,8277	63,5771
4 hr	X4 = 52%	19,1560	26,6857	31,6710	37,9700	42,6430	45,3591	47,2814	58,0002
3 hr	X3 = 46%	16,9457	23,6066	28,0167	33,5889	37,7226	40,1254	41,8259	51,3079
2 hr	X2 = 39%	14,3670	20,0143	23,7533	28,4775	31,9822	34,0193	35,4611	43,5001
1 hr	X1 = 30%	11,0515	15,3956	18,2718	21,9058	24,6017	26,1687	27,2778	33,4616

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

Basándose en los resultados de la anterior tabla, y los tiempos de duración adoptados, calculamos la intensidad equivalente para cada caso, según:

$$I = \frac{P [mm]}{t_{duración} [hr]}$$

Tabla 14: Intensidades de lluvia para diferentes tiempos de duración.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno							
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	500 años
24 hr	1440	1,5349	2,1383	2,5377	3,0425	3,4169	3,6345	3,7886	4,6475
18 hr	1080	1,8624	2,5944	3,0791	3,6915	4,1458	4,4099	4,5968	5,6389
12 hr	720	2,4559	3,4212	4,0604	4,8680	5,4671	5,8153	6,0617	7,4359
8 hr	480	3,1313	4,3621	5,1770	6,2066	6,9705	7,4145	7,7287	9,4808
6 hr	360	3,7452	5,2174	6,1921	7,4236	8,3373	8,8683	9,2441	11,3398
5 hr	300	4,1996	5,8503	6,9433	8,3242	9,3487	9,9441	10,3655	12,7154
4 hr	240	4,7890	6,6714	7,9178	9,4925	10,6607	11,3398	11,8204	14,5000
3 hr	180	5,6486	7,8689	9,3389	11,1963	12,5742	13,3751	13,9420	17,1026
2 hr	120	7,1835	10,0071	11,8766	14,2388	15,9911	17,0097	17,7305	21,7501
1 hr	60	11,0515	15,3956	18,2718	21,9058	24,6017	26,1687	27,2778	33,4616

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

La representación matemática de las curvas Intensidad - Duración - Período de retorno, Sg. Bernard es:

$$I = \frac{a * T^b}{t^c}$$

en la cual:

- I = Intensidad (mm/hr)
- t = Duración de la lluvia (min)
- T = Período de retorno (años)
- a,b,c = Parámetros de ajuste

Tabla 15: Resumen de aplicación de regresión potencial.

Periodo de Retorno (años)	Término ctte. de regresión (d)	Coef. de regresión [c]
2	139,26847932623	-0,6163860881
5	194,01149672382	-0,6163860881
10	230,25613758814	-0,6163860881

25	276,05133740290	-0,6163860881
50	310,02483271079	-0,6163860881
75	329,77152343700	-0,6163860881
100	343,74747306216	-0,6163860881
500	421,67534689055	-0,6163860881
Promedio =	280,60082839270	-0,6163860881

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

En función del cambio de variable realizado, se realiza otra regresión de potencia entre las columnas del periodo de retorno (T) y el término constante de regresión (d), para obtener valores de la ecuación:

$$d = a * T^b$$

Tabla 16: Regresión potencial.

Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	139,2685	0,6931	4,9364	3,4217	0,4805
2	5	194,0115	1,6094	5,2679	8,4784	2,5903
3	10	230,2561	2,3026	5,4392	12,5242	5,3019
4	25	276,0513	3,2189	5,6206	18,0920	10,3612
5	50	310,0248	3,9120	5,7367	22,4419	15,3039
6	75	329,7715	4,3175	5,7984	25,0345	18,6407
7	100	343,7475	4,6052	5,8399	26,8938	21,2076
8	500	421,6753	6,2146	6,0442	37,5626	38,6214
8	767	2244,8066	26,8733	44,6833	154,4490	112,5074

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

$$\ln(A) = 4,9282 \quad A = 138,1298 \quad B = 0,1956$$

Termino constante de
regresión (a) = 138,1298

Coef. de regresión
(b) = 0,195649

Finalmente se tiene la ecuación de intensidad válida para la cuenca:

$$I = \frac{0,195649 \cdot 138,1298 \cdot T}{0,61639 \cdot t}$$

Dónde:

I = intensidad de precipitación (mm/hr)

T = Periodo de Retorno (años)

t = Tiempo de duración de precipitación (min)

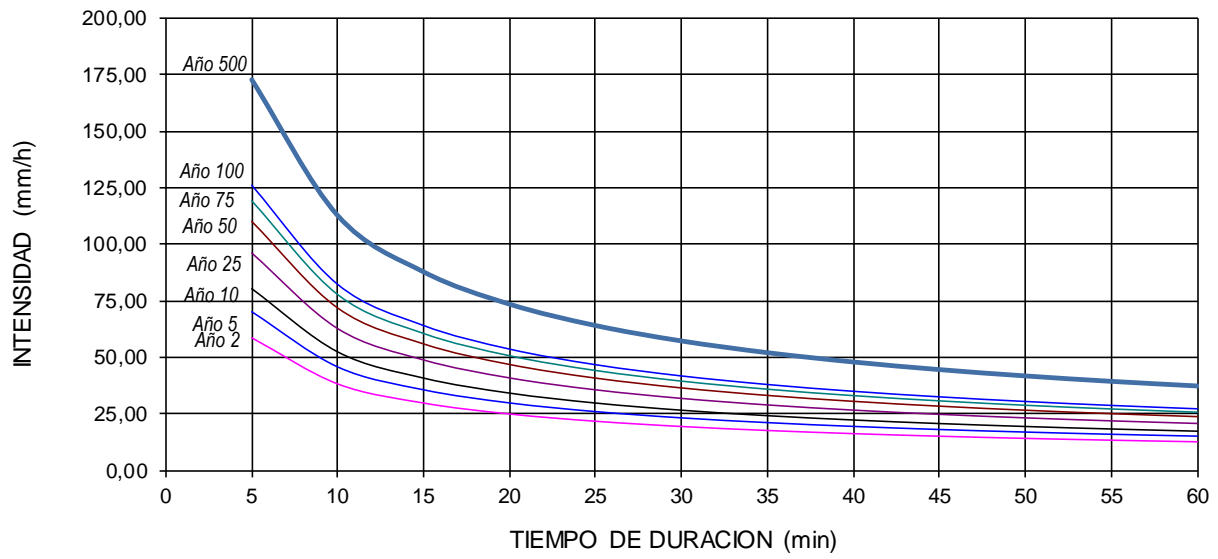
Tabla 17: Intensidad - Tiempo de duración - Período de retorno.

Frecuencia años	Duración en minutos					
	5	10	15	20	25	30
2	58,66	38,26	29,80	24,96	21,75	19,44
5	70,18	45,78	35,65	29,86	26,02	23,26
10	80,37	52,43	40,83	34,20	29,80	26,64
25	96,15	62,72	48,85	40,91	35,66	31,87
50	110,12	71,83	55,95	46,85	40,83	36,49
75	119,21	77,76	60,56	50,72	44,20	39,51
100	126,11	82,26	64,07	53,66	46,76	41,79
500	172,78	112,71	87,78	73,52	64,07	57,26

Frecuencia años	Duración en minutos					
	35	40	45	50	55	60
2	17,68	16,28	15,14	14,19	13,38	12,68
5	21,15	19,48	18,11	16,98	16,01	15,17
10	24,22	22,31	20,75	19,44	18,33	17,37
25	28,98	26,69	24,82	23,26	21,93	20,79
50	33,19	30,56	28,42	26,64	25,12	23,80
75	35,93	33,09	30,77	28,84	27,19	25,77
100	38,01	35,00	32,55	30,50	28,76	27,26
500	52,07	47,96	44,60	41,79	39,41	37,35

Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

Gráfico: Intensidad - Tiempo de duración - Período de retorno.



Fuente: CURVAS IDF EXCEL, CIVILGECKS.

ANEXO 3.

SEGUN COWAN:

Condiciones del río:

material del		
cauce:	A	terroso
	B	rocoso
	C	gravoso fino
		gravoso
	D	grueso

material del cauce adoptado: **C** = 0,024

Grado de		
irregularidad:	A	ninguna
	B	leve
	C	regular
	D	severo

Grado de irregularidad adoptado: **C** = 0,01

Secciones	A	leve
Variables	B	regular
	C	severo

variación de la sección adoptada: **B** = 0,005

Efecto de las obstrucciones:	A	despreciables
	B	menor
	C	apreciable
	D	severo

Efecto de las obstrucciones adoptado: **D** = 0,04

vegetación:	A	ninguna
	B	poco

C regular
D alta

vegetación adoptada: **B** = 0,01

grado de sinuosidad: A Insignificante
B regular
C considerable

grado de sinuosidad adoptado: **A** = 1

valor de " n " adoptado según COWAM n = **0,089**

SEGUN SCOBIEY:

Condiciones del río:

n = 0.025

Cauce de tierra natural limpios con buen alineamiento con o sin algo de vegetación en los taludes y gravillas dispersas en los taludes

n = 0.030

Cauce de piedra fragmentada y erosionada de sección variable con algo de vegetación en los bordes y considerable pendiente (típico de los ríos de entrada de ceja de selva)

n = 0.035

Cauce de grava y gravilla con variación considerable de la sección transversal con algo de vegetación en los taludes y baja pendiente.(típico de los ríos de entrada de ceja de selva)

n = 0.040-0.050

Cauce con gran cantidad de canto rodado suelto y limpio, de sección transversal variable con o sin vegetación en los taludes (típicos de los ríos de la sierra y ceja

de selva)

n = 0.060-0.075

Cauce con gran crecimiento de maleza, de sección obstruida por la vegetación externa y acuática de lineamiento y sección

Irregular. (típico de los ríos de la selva)

valor de " n " adoptado según
SCOBNEY n = 0,03