



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CAMPUS I**



---

---

**METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE OBRAS  
HIDRÁULICAS PEQUEÑAS UTILIZANDO  
SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

**TESIS:  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA  
EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN  
HIDRÁULICA.**

**PRESENTA:  
ROSA ALEJANDRA RIOS FLORES C130204**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. MIGUEL ÁNGEL AGUILAR SUÁREZ.**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS; JUNIO 2023**



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
30 de mayo del 2023  
Oficio No. F.I.01.795/2023

**C. ROSA ALEJANDRA RÍOS FLORES**  
**ALUMNA DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA**  
**CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA**  
**PRESENTE.**

Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

**“METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS PEQUEÑAS UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA”.**

**CERTIFICO** el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la impresión de dicho trabajo para que sea sustentado en su Examen Profesional para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con Formación en Hidráulica.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”**

  
**DR. OMAR ANTONIO DE LA CRUZ COURTOIS**  
**ENCARGADO DE DIRECCIÓN**

  
UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
DIRECCIÓN DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ccp. Dr. Humberto Miguel Sansebastián García. Coordinador de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería, Campus I. UNACH.  
Archivo/minutario  
OACC/HMSG/tcpg\*



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

## CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) ROSA ALEJANDRA RIOS FLORES,  
Autor (a) de la tesis bajo el título de "METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE OBRAS  
HIDRÁULICAS PEQUEÑAS UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA,"  
presentada y aprobada en el año 2023 como requisito para obtener el título o grado  
de MAESTRA EN INGENIERÍA CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA, autorizo licencia  
a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH),  
para que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos  
para su consulta, reproducción parcial y/o total, citando la fuente, que contribuya a la  
divulgación del conocimiento humanístico, científico, tecnológico y de innovación que se  
produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 30 días del mes de Junio del año 2023.

  
ROSA ALEJANDRA RIOS FLORES

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

## Agradecimientos:

Primeramente, agradecer a Dios por permitirme culminar esta etapa, que sin su bendición no hubiera sido posible, y al mismo tiempo por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi formación académica y profesional, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidad.

Seguidamente, a mis padres Raúl y Norma por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir y ser mi motivo de experiencia de mejor cada día.

A mi hermano mayor Raúl, por ser una parte importante en mi vida, por confiar siempre en mí y admirarnos mutuamente.

A mi asesor Dr. Miguel Ángel Aguilar Suárez, por enseñarme todo lo que hoy en día puedo practicar, por regalarme parte de su conocimiento, por los valores de la responsabilidad y compromiso, y por su gran dedicación de mi formación.

A el Ing. Eugenio Vázquez, por darme la motivación inicial y la confianza para poder seguir creciendo en lo académico, profesional y personal. Y siempre le estaré agradecida por todo el apoyo y cariño brindado.

Asimismo, a mis amigos por aprender de ellos en cada trabajo, proyecto o tarea realizada, por compartir cada aprendizaje y momentos juntos que me ayudaron a desarrollar este proyecto.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>Objetivo general.....</b>	<b>7</b>
<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Antecedentes.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Ubicación de la zona de estudio.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.1 Climatología.....</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2 Hidrografía.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.4 Edafología.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.5 Fisiografía.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.6 Vegetación y uso del suelo.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4 Propuesta de solución al proyecto de drenaje.....</b>	<b>18</b>
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 ANÁLISIS HIDROGRÁFICO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1 Procedimiento.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1.1. Determinación de la cuenca hidrológica.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 Funciones de distribución de probabilidad y estadística usadas en hidrología.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 Factor de convectividad.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6 Métodos para calcular el gasto hidrológico.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.1 Método racional.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.2 Método de Ven Te Chow.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6.3 Método del hidrograma unitario triangular.....</b>	<b>41</b>
<b>2.7. ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....</b>	<b>42</b>
<b>2.7.1 Aplicación de los métodos para el cálculo del gasto hidrológico.....</b>	<b>44</b>
<b>2.7.1.1 Método racional.....</b>	<b>45</b>

<b>2.7.1.2 Método de Ven Te Chow.</b> .....	<b>46</b>
<b>2.7.1.3 Hidrograma unitario triangular.</b> .....	<b>48</b>
<b>2.7.1.4 Resumen de resultados hidrológicos</b> .....	<b>49</b>
<b>2.8 Aspectos hidráulicos</b> .....	<b>49</b>
<b>2.8.1 ANÁLISIS HIDRÁULICO</b> .....	<b>55</b>
<b>3. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.</b> .....	<b>58</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura No. 1.</b> Obra de drenaje 91+989 durante la lluvia extraordinaria.....	8
<b>Figura No. 2.</b> Obra de drenaje trabajando al 100% de su capacidad hidráulica.....	8
<b>Figura No. 3.</b> Ubicación de la Obra de Drenaje en el Km. 91+989.00 en la autopista. ....	9
<b>Figura No. 4.</b> Ubicación del municipio de Ocozocoautla.....	10
<b>Figura No. 5.</b> Clima del municipio de Ocozocoautla. ....	11
<b>Figura No. 6.</b> Hidrografía del municipio de Ocozocoautla.....	12
<b>Figura No. 7.</b> Geología del municipio de Ocozocoautla.....	13
<b>Figura No. 8.</b> Edafología del municipio de Ocozocoautla. ....	14
<b>Figura No. 9.</b> Fisiografía del municipio de Ocozocoautla.....	15
<b>Figura No. 10.</b> Vegetación y uso del suelo del municipio de Ocozocoautla. ....	16
<b>Figura No. 11.</b> Obra de drenaje en el km 91+989 funcionando a su máxima capacidad hidráulica. ....	17
<b>Figura No. 12.</b> Obra de drenaje en el km 91+989 lado izquierdo.....	17
<b>Figura No. 13.</b> Obra de drenaje en el km 91+989 lado derecho. ....	18
<b>Figura No. 14.</b> Ubicación de la cuenca en estudio. ....	18
<b>Figura No. 15.</b> Ráster del modelo de digitalización de elevación.....	21
<b>Figura No. 16.</b> Ráster de direcciones de flujo.....	22
<b>Figura No. 17.</b> Ráster de acumulación de flujo.....	22
<b>Figura No. 18.</b> Orden de corrientes de la cuenca. ....	23
<b>Figura No. 19.</b> Área y perímetro de la cuenca en estudio.....	24
<b>Figura No. 20.</b> Cauce principal de la cuenca.....	24
<b>Figura No. 21.</b> Longitud del cauce principal de la cuenca. ....	24
<b>Figura No. 22.</b> Pendientes de la cuenca.....	25
<b>Figura No. 23.</b> Perfil del cauce principal.....	26
<b>Figura No. 24.</b> Tipos de suelo de la cuenca. ....	27
<b>Figura No. 25.</b> Edafología de la cuenca. ....	27
<b>Figura No. 26.</b> Tipos de suelo de la cuenca. ....	28
<b>Figura No. 27.</b> Uso de suelo y vegetación de la cuenca.....	28

<b>Figura No. 28.</b> Ubicación de la estación climatológica 7123 cercana a la cuenca en estudio. ...	30
<b>Figura No. 29.</b> Mapa de factores de conectividad.....	33
<b>Figura No. 30.</b> Curvas I-D-T para la zona en estudio. ....	44
<b>Figura No. 31.</b> Coeficiente de escurrimiento, según sus características de la cuenca.....	45
<b>Figura No. 32.</b> Número de escurrimiento, según sus características de la cuenca. ....	47
<b>Figura No. 33.</b> Hidrograma unitario triangular.....	48
<b>Figura No. 34.</b> Parámetros geométricos de una sección circular transversal. ....	50

## **INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad, las obras de drenaje son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento de una vía terrestre, sirven para proteger el camino canalizando los escurrimientos superficiales con la finalidad de evitar situaciones de riesgo para la estructura del camino, así como para los usuarios. Como sabemos una mala localización o un mal diseño ocasionan graves problemas, si las obras de drenaje fallan se ocasiona interrupción al tránsito vehicular, pérdidas económicas, entre otros.

Por otra parte, se tienen pérdidas al suelo, modificaciones al patrón de drenaje, erosión hídrica, cambios en el patrón de circulación, filtración y recarga de acuíferos. También es importante considerar la pérdida de cubierta vegetal, la flora y la fauna.

Por lo tanto, todos los factores comentados anteriormente impactan al medio ambiente, pero debemos considerar que en los proyectos de las vías terrestres las obras de drenaje son necesarias para el buen funcionamiento y preservación del camino debido a la función social y económica que representa para el estado y el país su costo elevado de la misma.

### **Objetivo general.**

Se revisará el área hidráulica de la obra de drenaje existente y/o se propone otra alternativa.

### **Objetivos específicos.**

- Determinar las características geomorfológicas de la cuenca aportadora.
- Calcular el gasto de diseño por los siguientes métodos Racional Americano, el de Chow y el Hidrograma Unitario Triangular.
- Aplicar las normativas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Realizar el análisis comparativo de  $Q_{Tr=100 \text{ años}} \approx Q_{actual}$

## 1. GENERALIDADES.

### 1.1 Antecedentes.

El pasado 23 de junio del 2021, se presentó una lluvia extraordinaria en la autopista Arriaga-Ocozocoautla, la cual tuvo una duración aproximada de 5 horas, afectando a la obra de drenaje ubicada en el km 91+989, la cual trabajó al 100% de su capacidad hidráulica, tal y como se puede observar en las siguientes imágenes.

**Figura No. 1.** Obra de drenaje 91+989 durante la lluvia extraordinaria.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura No. 2.** Obra de drenaje trabajando al 100% de su capacidad hidráulica.

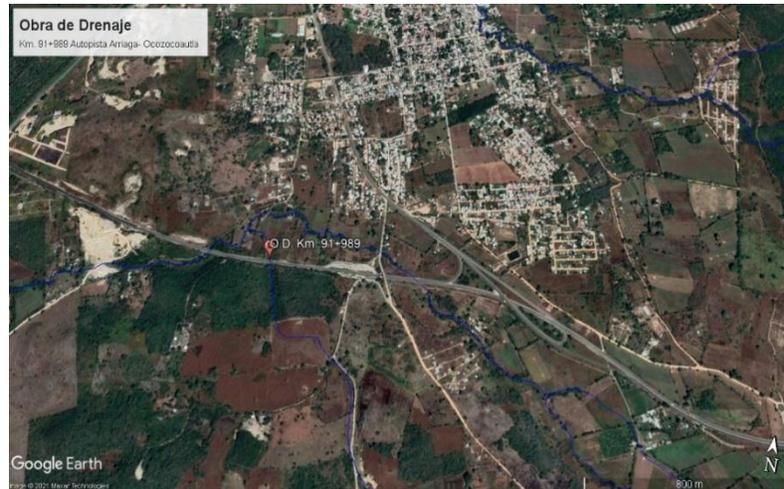


Fuente: Elaboración propia.

El estudio hidrológico e hidráulico presente tiene como finalidad la revisión del área hidráulica actual de la obra de drenaje ubicada en el km 91+989, dicha obra de drenaje deberá permitir que fluyan sin ningún problema los escurrimientos que provienen de la zona y evitar que se presente un tirante de agua sobre la superficie de rodamiento. Debido a que este tipo de estructuras hidráulicas son de suma importancia para la conservación de las carreteras para prevenir los daños que se presentan por un mal diseño de estas obras de drenaje; asimismo, evitar gastos económicos y prolongar la vida útil de estas estructuras. Este estudio revisa si dicha

obra puede funcionar con el área hidráulica actual o podrán proponerse estructuras que puedan dar continuidad a los escurrimientos sin alterar el entorno de estos. (Ver figura No. 3).

**Figura No. 3.** Ubicación de la Obra de Drenaje en el Km. 91+989.00 en la autopista.



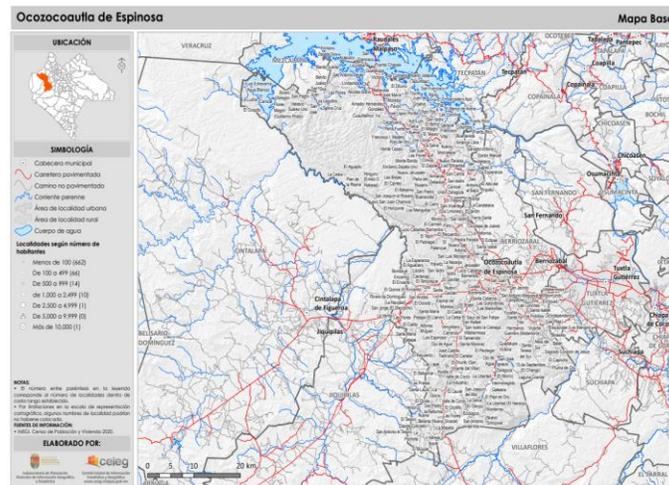
Fuente: Google Earth, elaboración propia.

## 1.2 Ubicación de la zona de estudio.

Como podemos ver en la Figura No. 4, la ubicación de la zona de estudio.

El municipio de Ocozocoautla de Espinosa se ubica en la Región Socioeconómica II Valles Zoque. Limita al norte con Tecpatán y Mezcalapa, al este con Berriozábal, Tuxtla Gutiérrez y Suchiapa, al sur con Villaflores y al oeste con Cintalapa y Jiquipilas. Las coordenadas de la cabecera municipal son: 16°45'45" de latitud norte y 93°22'30" de longitud oeste y se ubica a una altitud de 824 metros sobre el nivel del mar. Con una superficie territorial de 2093.96 km<sup>2</sup> ocupa el 2.8% del territorio estatal. (Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, [CEIEG], s.f.)

**Figura No. 4.** Ubicación del municipio de Ocozocoautla.



*Nota.* Adaptado de *Mapa Base*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f., ([https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Mapa\\_Base/061.pdf](https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Mapa_Base/061.pdf)).

### 1.2.1 Climatología.

Como podemos ver en la Figura No. 5, la climatología de la zona de estudio.

Los climas existentes en el municipio son: Cálido húmedo con lluvias abundantes de verano (39.77%), Cálido subhúmedo con lluvias de verano, humedad media (30.78%), Cálido subhúmedo con lluvias de verano, menos húmedo (23.22%), Semicálido subhúmedo con lluvias de verano, más húmedo (4.01%), Cálido subhúmedo con lluvias de verano, más húmedo (2.21%), Semicálido subhúmedo con lluvias de verano y humedad media (0.01%).

En los meses de mayo a octubre, las temperaturas mínimas promedio se distribuyen porcentualmente de la siguiente manera: de 15 a 18 °C (24.87%), de 18 a 21 °C (66.61%) y de 21 a 22.5 °C (8.52%).

En tanto que las máximas promedio en este periodo son: de 24 a 27 °C (2.32%), de 27 a 30 °C (29.06%), de 30 a 33 °C (45.86%) y de 33 a 34.5 °C (22.75%).

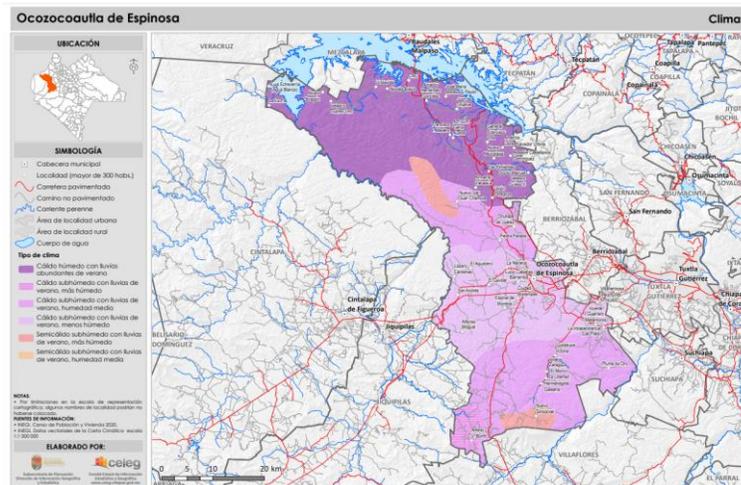
Durante los meses de noviembre a abril, las temperaturas mínimas promedio se distribuyen porcentualmente de la siguiente manera: de 9 a 12 °C (1.49%), de 12 a 15 °C (70.39%), de 15 a 18 °C (23.29%) y de 18 a 19.5 °C (4.83%).

Mientras que las máximas promedio en este mismo periodo son: de 24 a 27 °C (32.27%), de 27 a 30 °C (67.05%) y de 30 a 33 °C (0.68%).

En los meses de mayo a octubre, la precipitación media es: de 900 a 1000 mm (10.75%), de 1000 a 1200 mm (38.2%), de 1200 a 1400 mm (17.5%), de 1400 a 1700 mm (32.64%) y de 1700 a 2000 mm (0.92%).

En los meses de noviembre a abril, la precipitación media es: de 25 a 50 mm (0%), de 50 a 75 mm (7.88%), de 75 a 100 mm (38.54%), de 100 a 125 mm (3.33%), de 125 a 150 mm (1.42%), de 150 a 200 mm (1.26%), de 200 a 250 mm (2.01%), de 250 a 300 mm (3.98%), de 300 a 350 mm (3.17%), de 350 a 400 mm (5.35%), de 400 a 500 mm (7.8%), de 500 a 600 mm (24.76%) y de 600 a 700 mm (0.49%). (CEIEG, s.f.)

**Figura No. 5.** Clima del municipio de Ocozocoautla.



*Nota.* Adaptado de *Climas*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f., (<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Climas/061.pdf>).

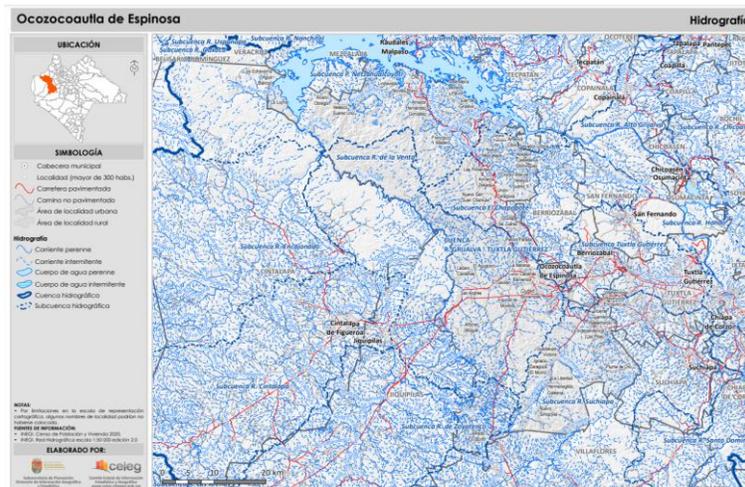
## 1.2.2 Hidrografía.

Como podemos ver en la Figura No. 6, la hidrografía de la zona de estudio.

Las principales corrientes de agua en el municipio son: Río La Venta, Río El Tablén, Río El Cedro, Arroyo Salina Cruz, Arroyo Cacahuano, Río Los Plátanos, Arroyo Corozo, Río La Venta, Arroyo El Corozo y Arroyo La Pigua; y las corrientes intermitentes: Arroyo La Batalla, Arroyo El Otatal, Arroyo Las Pilas, Arroyo Los Manguitos, Arroyo La Majada, Arroyo Tepeguajal, Arroyo El Achicote, Arroyo San Ramón, Arroyo El Zapote y Arroyo El Ojo de Agua.

Los cuerpos de agua en el municipio Presa Nezahualcóyotl (Malpaso). El municipio se ubica dentro de las subcuencas R. de la Venta, P. Netzahualcóyotl, R. Suchiapa, El Chapopote, R. de Zoyatenco y Tuxtla Gutiérrez que forman parte de la cuenca R. Pijijiapan, entre otros. (CEIEG, s.f.)

**Figura No. 6.** Hidrografía del municipio de Ocozocoautla.



*Nota.* Adaptado de *Climas*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f.,

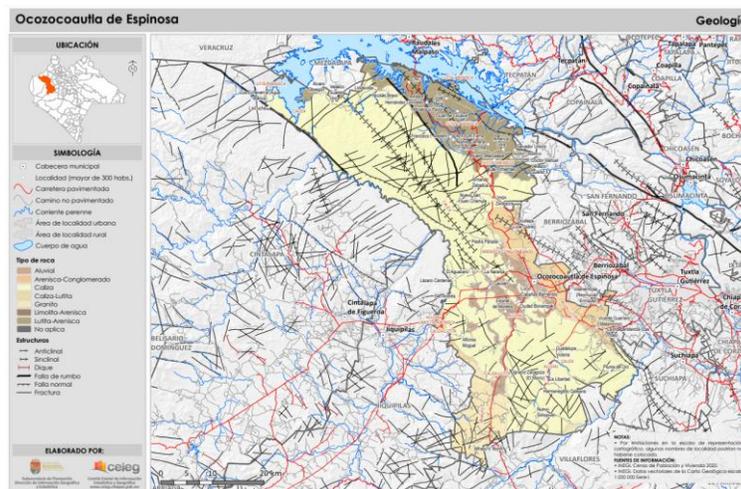
(<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Hidrografia/061.pdf>).

### 1.2.3 Geología.

Como podemos ver en la Figura No. 7, la geología de la zona de estudio.

Los tipos de roca que conforman la corteza terrestre en el municipio son: Caliza (roca sedimentaria) (63.36%), Lutita-Arenisca (roca sedimentaria) (13.35%), Caliza-Lutita (roca sedimentaria) (8.22%), Granito (roca ígnea intrusiva) (6.18%), Aluvial (suelo) (5.11%), No aplica (3.18%), Arenisca-Conglomerado (roca sedimentaria) (0.41%), Limolita-Arenisca (roca sedimentaria) (0.18%). (CEIEG, s.f.)

**Figura No. 7.** Geología del municipio de Ocozocoautla.



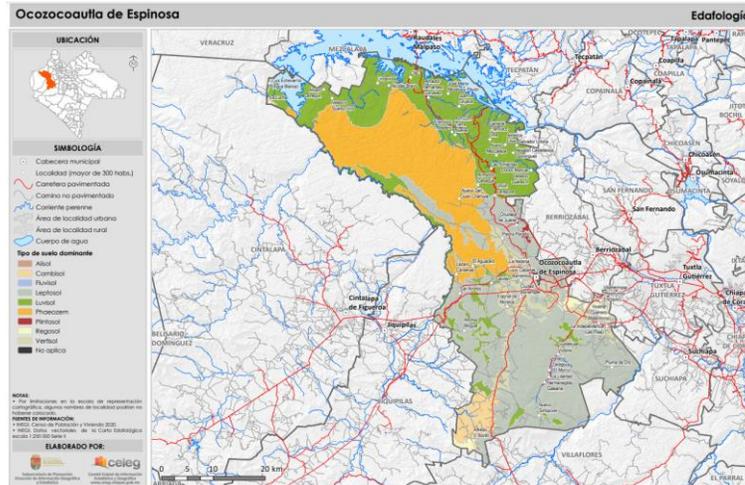
*Nota.* Adaptado de *Geología*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f., (<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Geologia/061.pdf>).

### 1.2.4 Edafología.

Como podemos ver en la Figura No. 8, la edafología de la zona de estudio.

Los tipos de suelos presentes en el municipio son: Leptosol (35.17%), Luvisol (27.36%), Phaeozem (23.44%), Vertisol (6.15%), No aplica (3.08%), Cambisol (3.05%), Regosol (1.48%), Plintisol (0.19%), Fluvisol (0.05%) y Alisol (0.01%). (CEIEG, s.f.)

**Figura No. 8.** Edafología del municipio de Ocozocoautla.



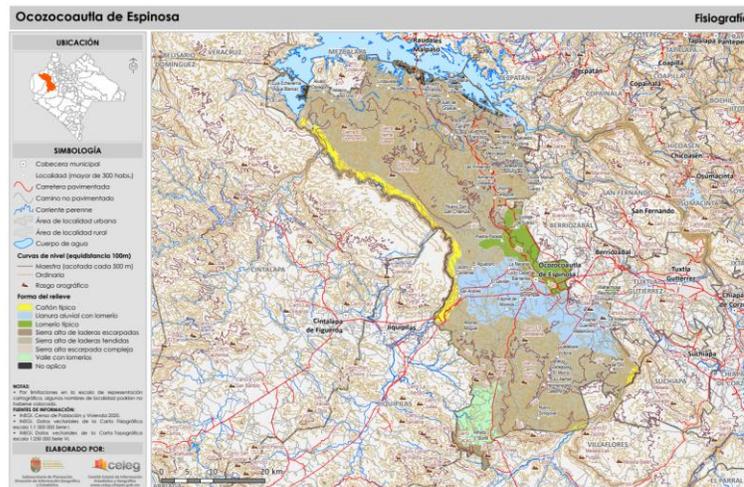
*Nota.* Adaptado de *Edafología*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f., (<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Edafologia/061.pdf>).

### 1.2.5 Fisiografía.

Como podemos ver en la Figura No. 9, la fisiografía de la zona de estudio.

El municipio forma parte de las regiones fisiográficas Montañas del Norte, Depresión Central y Sierra Madre de Chiapas. La altura del relieve varía entre los 200 m y los 1700 msnm. Las formas del relieve presentes en el municipio son: sierra alta de laderas tendidas (67.99%), Llanura aluvial con lomerío (13.23%), Lomerío típico (4.97%), Cañón típico (4.5%), Valle con lomeríos (3.3%), No aplica (3.19%), Sierra alta escarpada compleja (1.97%) y Sierra alta de laderas escarpadas (0.85%). (CEIEG, s.f.)

**Figura No. 9.** Fisiografía del municipio de Ocozocoautla.



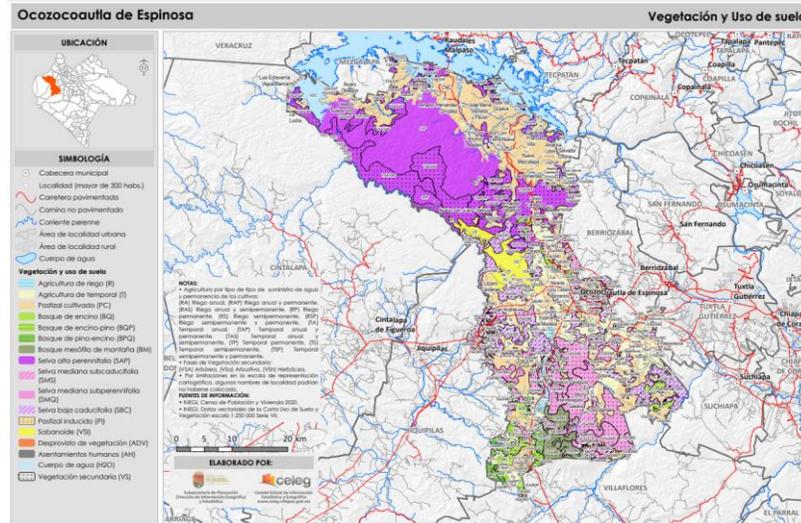
*Nota.* Adaptado de *Fisiografía*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f., (<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Fisiografia/061.pdf>).

### 1.2.6 Vegetación y uso del suelo.

Como podemos ver en la Figura No. 10, la vegetación y uso de suelo de la zona de estudio.

La cobertura vegetal y el aprovechamiento del suelo en el municipio se distribuye de la siguiente manera: Pastizal cultivado (24.42%), Selva alta perennifolia (secundaria) (16.72%), Selva alta perennifolia (12.65%), Agricultura de temporal (10.09%), Selva mediana subcaducifolia (secundaria) (8.98%), Selva baja caducifolia (secundaria) (8.81%), No aplicable (3.5%), Sabanoide (2.9%), Selva mediana subperennifolia (secundaria) (2.85%), Pastizal inducido (2.34%), Bosque mesófilo de montaña (secundaria) (2%), Agricultura de riego (0.97%), Bosque de pino-encino (secundaria) (0.79%), Bosque de encino (0.77%), Bosque de encino-pino (secundaria) (0.63%), Bosque de encino-pino (0.62%), Bosque de encino (secundaria) (0.44%), Bosque de pino-encino (0.41%) y Sin vegetación aparente (0.09%). (CEIEG, s.f.)

**Figura No. 10.** Vegetación y uso del suelo del municipio de Ocozocoautla.



*Nota.* Adaptado de *Vegetación y Uso de suelo*, de Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas, s.f., (<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Vegetacion/061.pdf>).

### 1.3 Funcionamiento actual del drenaje en el lugar de trabajo.

Particularmente, se han presentado lluvias extraordinarias en el lugar de trabajo, haciendo que la obra de alcantarilla trabaje al 100% de su capacidad de conducción del caudal calculado, por lo que se debe de evitar que la estructura trabaje bajo presión y se presente un tirante de agua sobre la superficie de rodamiento (Ver figura No. 11).

**Figura No. 11.** Obra de drenaje en el km 91+989 funcionando a su máxima capacidad hidráulica.



Fuente: Elaboración propia.

La obra de drenaje existente en el sitio de estudio, consiste en alcantarilla circular de 1.2 m de diámetro (Ver figuras No. 12 y 13).

**Figura No. 12.** Obra de drenaje en el km 91+989 lado izquierdo.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura No. 13.** Obra de drenaje en el km 91+989 lado derecho.



Fuente: Elaboración propia.

#### **1.4 Propuesta de solución al proyecto de drenaje.**

Previamente a la realización del estudio hidrológico e hidráulico, se hizo un recorrido físico en la zona de la cuenca, no encontrando árboles caídos o algún material producto del arrastre de la corriente de agua. A continuación, se muestra la figura No. 14 donde se puede apreciar la cuenca de estudio:

**Figura No. 14.** Ubicación de la cuenca en estudio.



Fuente: Google Earth, elaboración propia.

Asimismo, en la visita de campo se obtuvo las coordenadas de la zona de trabajo, con la finalidad de delimitar en gabinete las características geomorfológicas de la cuenca mediante los métodos propuestos en las normas de la S.C.T. para ello se determinará el caudal de diseño.

Para la obra de drenaje del km 91+989, que funciona por medio de un tubo con un diámetro de 1.20 m, se determinará su gasto hidráulico actual y lo compararemos con el gasto de diseño estimado, si el gasto hidrológico calculado es menor al gasto hidráulico actual, significa que la obra desfoga los escurrimientos que fluyen en época de lluvias adecuadamente.

Por lo tanto, si la condición comentada anteriormente es favorable para la obra de drenaje, esta podrá prolongarse hacia aguas arriba con la misma dimensión y adecuaciones constructivas sin alterar su entorno. Si el caso fuera desfavorable en cuanto a la dimensión del diámetro de la obra existente, se tendrá que incrementar su capacidad hidráulica para el buen funcionamiento de esta.

## **2. METODOLOGÍA.**

La metodología se propone en los capítulos 8 y 9 del libro "Fundamentos de Hidrología de Superficie, de Francisco J. Aparicio Mijares, Limusa, 1992" y a los métodos que se describe en los manuales de proyecto de carreteras de la SCT y los manuales de agua potable de la Comisión Nacional del Agua.

### **2.1 ANÁLISIS HIDROGRÁFICO.**

#### **2.1.1 Procedimiento.**

Para la delimitación de cuencas y de la red hídrica se necesita la interpretación de los mapas cartográficos que permita la identificación de rasgos morfológicos para la definición de los límites naturales conocidas como parteaguas. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporcionan una forma más simple y rápida para el análisis y delimitación de una cuenca, sin embargo, para su aplicación se necesita entender una serie de procesos. (Castillo, 2022, p.14).

En el análisis e interpretación de rasgos morfológicos se efectuó con la ayuda del programa ArcMap 10.5 utilizando los siguientes datos:

- Modelo Digital de Elevación (DEM) con pixeles de 15 m, INEGI.
- Curvas de nivel, conjunto de datos topográficos escala 1:50000 INEGI.
- Cartografía de Uso de Suelo y Vegetación serie VI, escala 1:250000 INEGI.
- Cartografía de Edafología serie II, escala 1:250000 INEGI.

##### **2.1.1.1. Determinación de la cuenca hidrológica.**

El proceso para la delimitación se ejecutó de la siguiente manera:

La definición de la cuenca hidrológica se efectuó a través del método semiautomático, bajo la plataforma de ArcMap 10.5 en su módulo hidrológico.

El primer paso se refiere a la importación del DEM (Ver Figura No. 15). Posteriormente, se procede a la corrección con el fin de eliminar sumideros que no correspondan al terreno y que propicien imperfecciones en los datos. (Castillo, 2022, p.14).

**Figura No. 15.** Ráster del modelo de digitalización de elevación.

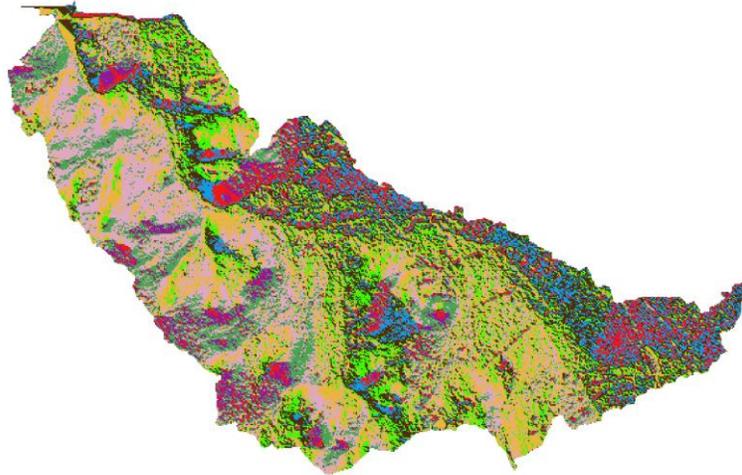


Fuente: Elaboración propia.

Luego, se obtienen las direcciones y las acumulaciones de flujo creando un archivo ráster para cada uno. Estos indican en el primer caso, las direcciones que toman los escurrimientos de acuerdo a la orientación de las laderas (Ver figura No. 16); en el segundo caso, los valores de los pixeles indican las zonas que dan origen a la red hídrica. (Castillo, 2022, p.14). Como se puede observar en la Figura No. 17.

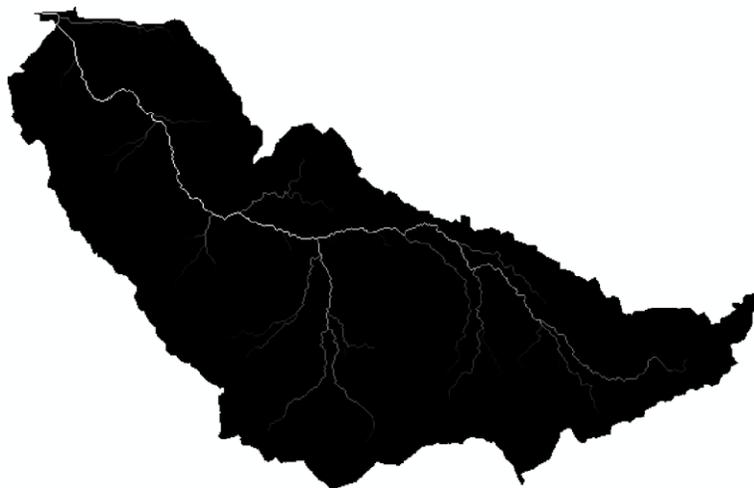
Los procesos mencionados se extrajo la red hídrica de la zona de trabajo.

**Figura No. 16.** Ráster de direcciones de flujo.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura No. 17.** Ráster de acumulación de flujo.



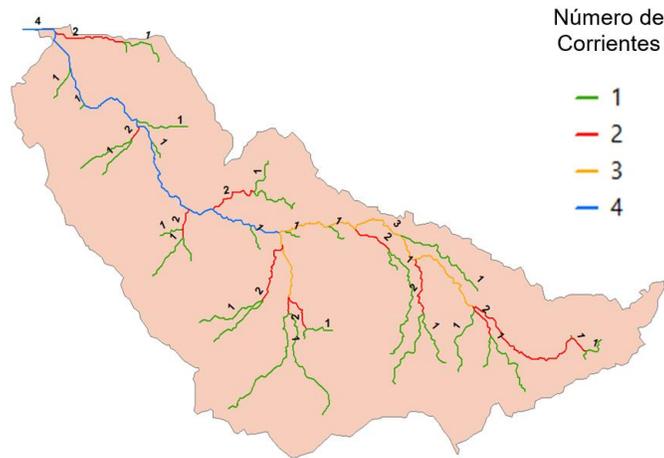
Fuente: Elaboración propia.

La delimitación de la cuenca se realiza mediante el algoritmo de obtención de cuencas. El algoritmo calcula una captación para cada corriente que se encuentre en el mapa de salida de la operación de orden de red de drenaje. La operación utiliza un mapa de dirección de flujo para determinar la ruta de flujo de cada uno. Como salida se produce

un mapa ráster, y una tabla de atributos para conocer sus características geométricas. (Castillo, 2022, p.16).

Se determina el orden de corrientes de la cuenca como se muestra en la Figura No. 18.

**Figura No. 18.** Orden de corrientes de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

Referente a las características geométricas, se calcularon los valores de perímetro que está definida por el parteaguas, el área en  $\text{km}^2$ , se determinó la longitud del cauce principal en km, con base al número de orden hasta la salida de la cuenca de trabajo, que corresponde a la ubicación de la obra de drenaje; la pendiente media del cauce principal fue obtenida a partir de la construcción del ráster de pendientes mediante un análisis de estadística zonal de la cuenca (Ver figura No. 22).

El área y el perímetro de la cuenca, se obtuvo de la siguiente Figura No. 19 de atributos, obtenida del programa ArcMap 10.5:

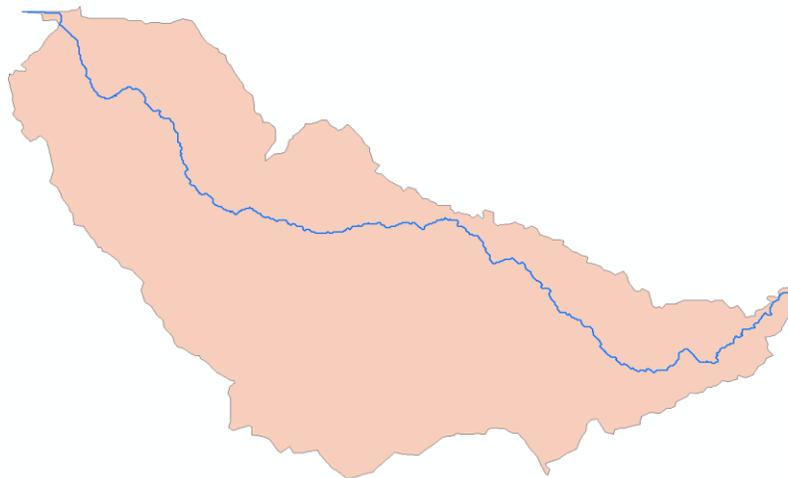
**Figura No. 19.** Área y perímetro de la cuenca en estudio.

FID	Shape *	Id	gridcode	HydroID	AREAKM2	PERIMETROKM
0	Polygon	3	3	0	2.857001	10.306908

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se obtuvo el cauce principal de la cuenca (Ver figura No. 20).

**Figura No. 20.** Cauce principal de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

Para conocer la longitud del cauce principal de la cuenca, se observa en la siguiente Figura No. 21 de atributos obtenida del programa ArcMap 10.5:

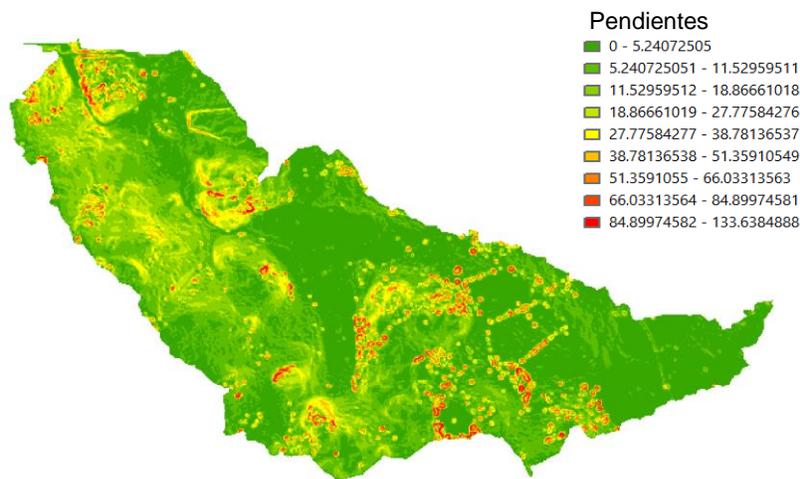
**Figura No. 21.** Longitud del cauce principal de la cuenca.

FID	Shape *	Shape_Leng	HydroID	DrainID	LongitudKM
0	Polyline ZM	4936.503243	6	0	4.936503

Fuente: Elaboración propia.

La respuesta hidrológica de una cuenca a una precipitación, es la pendiente del cauce principal. Como esta pendiente varía a lo largo del cauce, para determinar la pendiente media; se calculó con el método de Taylor y Schwarz:

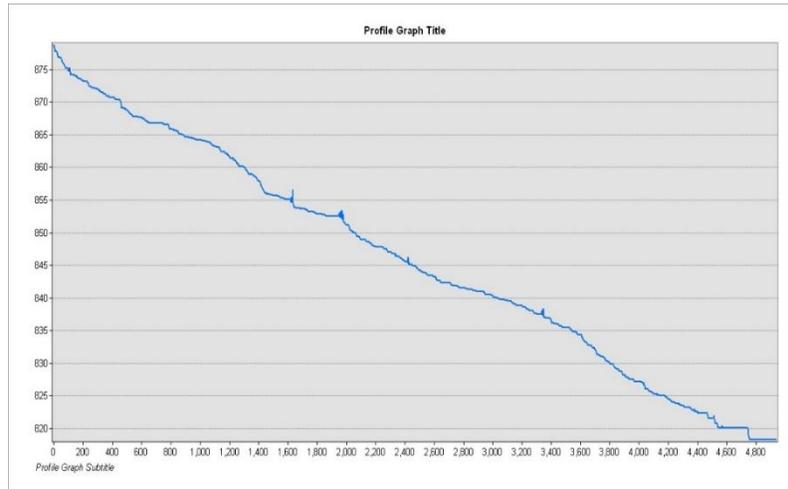
**Figura No. 22.** Pendientes de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo el perfil del cauce principal con la ayuda de la extensión “ArcHydriTools” del programa ArcMap 10.5 (Ver figura No. 21).

**Figura No. 23.** Perfil del cauce principal.



Fuente: Elaboración propia.

La pendiente media del cauce principal por el método de Taylor- Schwarz:

$$S = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

**Tabla No. 1.** Cálculo de la pendiente media de la cuenca.

Progresiva	Long. (m)	Long Acum (m)	Cota	Desnivel	Pendiente (S)	1/√S
0+000	0	0	878.79			
0+617	617	617	867.45	11.34	0.0184	7.3763
1+234	617	1234	861.14	6.31	0.0102	9.8884
1+851	617	1851	852.70	8.44	0.0137	8.5501
2+468	617	2468	844.86	7.84	0.0127	8.8712
3+085	617	3085	839.57	5.29	0.0086	10.7998
3+702	617	3702	832.00	7.57	0.0123	9.0281
4+319	617	4319	823.27	8.73	0.0141	8.4069
4+937	617.5	4936.5	818.30	4.97	0.0080	11.1465
						74.0673
				<b>S =</b>	<b>0.0117</b>	
				<b>S =</b>	<b>1.17%</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Con la cartografía, topografía y visitas de campo a la zona de trabajo, se ubicó la alcantarilla.

Según la cartografía de edafológica serie II, se obtuvo que la microcuenca tiene dos tipos de suelo: rendzina y vertisol pelico, de textura fina (Ver figura No. 25).

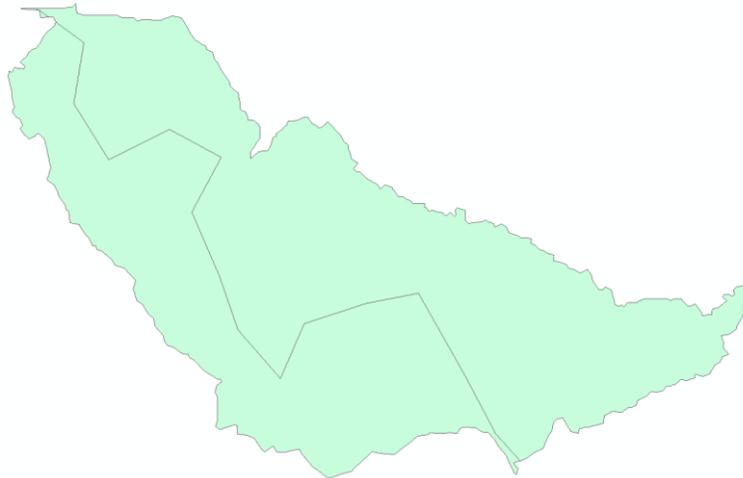
Se observa en la siguiente Figura No. 24 de atributos sobre los tipos de suelo obtenida del programa ArcMap 10.5:

**Figura No. 24.** Tipos de suelo de la cuenca.

FID *	Shape *	AREA	PERIMETER	COV_	COV_ID	SUE1	TEX	FASFI	FASQUIM	OBSERVACIO	DESCRIPCIO	DESC_TEX	DESC_FASFI	DESC_FAQUI	Shape_Length	Shape_Area	CLASS
1	Polygon	0.000892	0.195665	22945	191	E	3	6	0		RENDZINA	FINA	LITICA	ND	8232.464039	1115000.590876	20
2	Polygon	0.000677	0.210485	22955	201	Vp	3	6	0		VERTISOL PELICO	FINA	LITICA	ND	9984.76969	1742000.666154	20

Fuente: Elaboración propia.

**Figura No. 25.** Edafología de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

Los usos de suelo y vegetación (USV) serie VI, en la microcuenca de trabajo se obtuvieron dos tipos de USV: agricultura de temporal anual y vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia (Ver figura No. 27).

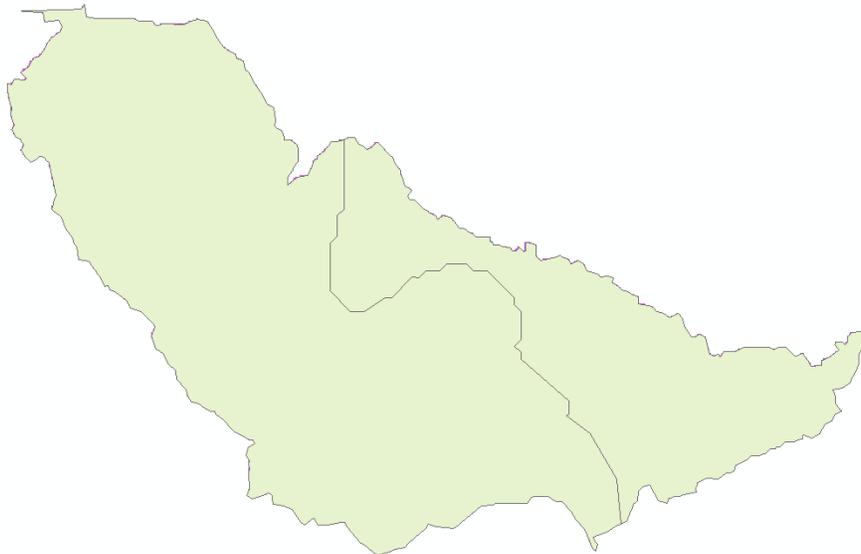
Se observa en la siguiente Figura No. 26 de atributos sobre el uso de suelo y vegetación obtenida del programa ArcMap 10.5:

**Figura No. 26.** Tipos de suelo de la cuenca.

FID	Shape *	OBJECTID	CVE_UNION	DESCRIPCIO	AREA	COV	COV_ID	USV_SVI	CLASS
0	Polygon	81847	TA	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	101697508.177	78421	78422	10101040104	200
1	Polygon	130500	VSa/SBC	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	11133172.171	124102	124103	20602020600	300

Fuente: Elaboración propia.

**Figura No. 27.** Uso de suelo y vegetación de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Periodo de retorno.

El periodo de retorno se define como la frecuencia con la que ocurre un evento.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de su Subdirección General Técnica y en reunión de trabajo con los equipos técnicos de la Subsecretaría de Infraestructura dependiente de la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) acordó homogeneizar los criterios de diseño y normatividad de ambas Dependencias

relativas al Diseño de Puentes principalmente en lo que se refiere a los períodos de retorno empleados por ambas para el diseño de estructuras viales que crucen cauces o zonas federales acordes al tipo de corriente, de vialidad y localización geográfica, las cuales se transcriben en la Tabla No. 2. (Arroyo, 2022, p. 31).

**Tabla No. 2.** Definición de periodos de retorno para la determinación del gasto de diseño en alcantarillas.

Estructura	Tipo de vialidad	Localización geográfica	Periodo de retorno Tr (años)
En caminos locales que comunican poblados de menos de 100,000 habitantes.	Carreta Estatal o municipal	1	10
		2	25
En caminos regionales que comunican poblados de más de 100,000 habitantes y hasta 500,000 habitantes.	Jurisdicción federal ET, C, D	1	25
		2	50
En caminos primarios que comunican poblados de más de 500,000 habitantes.	Jurisdicción federal ET, A, B	1	50
		2	100

Fuente: Arroyo (2022, p. 32).

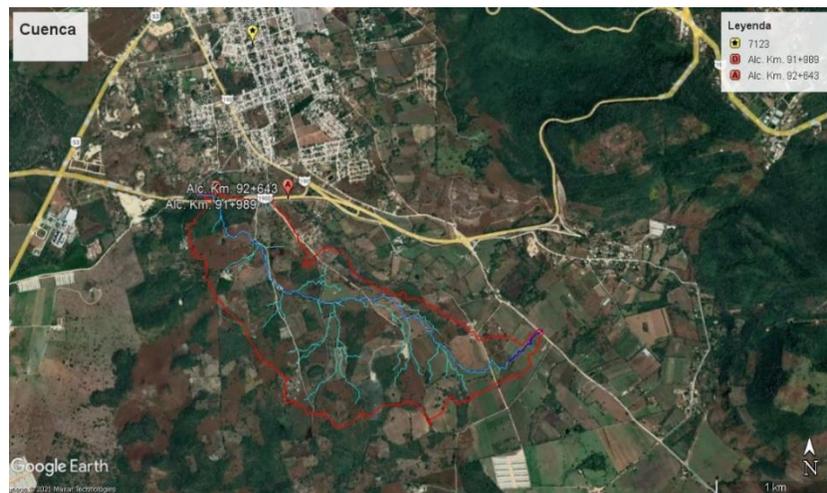
Sin embargo, se presentarán los resultados obtenidos para los **periodos de retorno de 2, 5, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años** para la obra de drenaje transversal (alcantarilla).

### 2.3 Recopilación de información hidrométrica.

Las fuentes para obtener los datos históricos de precipitaciones o aforos de caudales históricos son: el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), el cual registra los aforos efectuados en los principales ríos de la República Mexicana; así como las bases de datos denominadas (Extractor Rápido de Información Climatológica) ERIC o CLICOM (Climate Computing) para el caso de registros históricos de lluvia.

Por lo tanto, para fines de este estudio se obtuvieron los registros históricos de precipitación en 24 horas, los cuales fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN); utilizando los valores máximos anuales de 24 horas, los cuales corresponden a la estación climatológica 7123 “Ocozocoautla”, por ser la más cercana al sitio de cruce y con influencia en la cuenca en estudio, como se observa en la siguiente figura No. 28.

**Figura No. 28.** Ubicación de la estación climatológica 7123 cercana a la cuenca en estudio.



Fuente: Google Earth, elaboración propia.

Los datos históricos de la estación climatológica se indican en la siguiente Tabla No. 3.

**Tabla No. 3.** Datos históricos de la estación climatológica 7123 Ocozocoautla.

Año	Precipitación	Año	Precipitación
1954	58.0	1985	53.5
1955	78.5	1986	106.9
1956	8.5	1987	46.3
1957	45.0	1988	80.0
1958	63.0	1989	93.2
1959	76.0	1990	96.0
1960	67.0	1991	71.6
1961	88.0	1992	68.0
1962	49.0	1993	153.4
1963	81.0	1994	54.5
1964	72.5	1995	61.7
1965	81.0	1996	89.6
1966	113.0	1997	60.7
1967	93.5	1998	86.2
1968	58.0	1999	82.3
1969	63.0	2000	120.0
1970	57.5	2001	68.0
1971	75.0	2002	53.5
1972	80.0	2003	120.0
1973	98.0	2004	52.5
1974	97.0	2005	64.4
1975	53.0	2006	88.8
1976	51.5	2007	76.2
1977	60.5	2008	68.5
1978	68.0	2009	75.2
1979	91.5	2010	84.1
1980	83.0	2011	53.0
1981	52.7	2012	65.0
1982	52.7	2013	84.0
1983	46.0	2014	83.0
1984	80.0		

Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Funciones de distribución de probabilidad y estadística usadas en hidrología.

El diseño y la planeación de obras hidráulicas están siempre relacionadas con eventos hidrológicos futuros; por ejemplo, la avenida de diseño para una alcantarilla es un evento que tal vez no se ha presentado jamás, o al menos no en el periodo de datos disponible, pero que es necesario conocer para determinar las dimensiones de la obra. La complejidad de los procesos físicos que tienen lugar en la generación de esta avenida, hace en la mayoría de los casos imposible una estimación confiable de la misma por métodos basados en las leyes de la mecánica o la física, sea porque estos métodos son insuficientes, sea porque el modelo matemático resultante sería exageradamente grande, complicado y difícil de manejar.

Por ello, y como sucede en la mayoría de las ciencias, con mucha frecuencia el estadístico es el camino obligado en la solución de los problemas. En particular, la probabilidad y la estadística juegan un papel importante en el análisis hidrológico. (Aparicio, 1992, p. 239)

De acuerdo con la información hidrométrica obtenida, es necesario interpolar los valores de precipitación asociados a un periodo de retorno, para obtener las curvas I–D–Tr; para este estudio, se aplicaron las siguientes funciones de distribución de probabilidad:

- a) Normal.
- b) Lognormal 2 parámetros.
- c) Lognormal 3 parámetros.
- d) Gamma 2 parámetros.
- e) Gamma 3 parámetros.
- f) LogPearson Tipo III.
- g) Gumbel.
- h) LogGumbel.

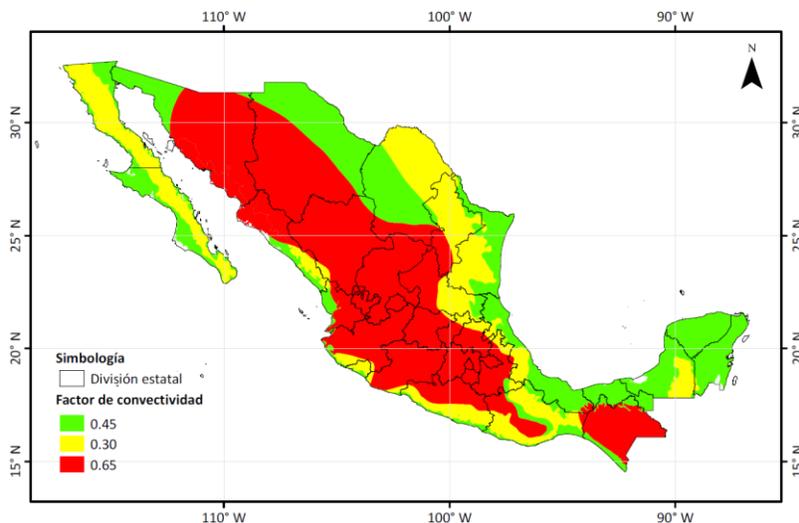
Por lo tanto, es necesario elegir una de estas funciones, la que sea más adecuada para el problema analizado.

## 2.5 Factor de convectividad.

El factor de convectividad se puede definir como la concentración de lluvia durante una hora en una lluvia con duración de 24 horas. Para este estudio, se ha determinado que la cuenca donde se ubica la obra de drenaje se localiza en una zona alta de montañas donde se presentan lluvias convectivas o con características orográficas y la concentración de vapor de agua en la atmósfera no es constante en poco tiempo. Para la depresión central del estado de Chiapas, que es donde se ubica la zona de estudio, el factor de convectividad es igual a 0.65. (IHS, 2017, p. 31).

En la Figura No. 29 se muestran los valores del factor de convectividad aplicado por regiones en la República Mexicana.

**Figura No. 29.** Mapa de factores de convectividad.



Fuente: Adaptado de “Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana”, (p. 15), por R. Domínguez et al., 2018, Tecnología y ciencias del agua, 9 (1).

## 2.6 Métodos para calcular el gasto hidrológico.

### 2.6.1 Método racional.

Se utiliza este método para determinar el gasto máximo correspondiente a un periodo de retorno, en el que se estima el tiempo de concentración ( $t_c$ ), que es el tiempo transcurrido del agua, desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto donde se construirá la obra de drenaje, mediante la longitud del cauce principal ( $L$ ) y la pendiente media del cauce principal ( $S_c$ ), tal como indica la fórmula de Kirpich:

$$t_c = 0.0662 \left( \frac{L^{0.77}}{S_c^{0.385}} \right)$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración, en horas

$L$  = Longitud del cauce principal, en (km)

$S_c$  = Pendiente media del cauce principal, adimensional.

Con el tiempo de concentración en horas o en minutos, según se requiera, para usar la gráfica del portal de la Dirección General de Servicios Técnicos de la S.C.T, se deben seguir verticalmente en las curvas (i-d-Tr) intensidad-duración-periodo de retorno, hasta la curva correspondiente al periodo de retorno definido y se determina horizontalmente la intensidad de lluvia en milímetros por hora.

El gasto máximo posible que puede producirse con una lluvia de intensidad correspondiente a un periodo de retorno, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Tr} = 0.278 C I A$$

Donde:

$Q_{Tr}$  = Gasto máximo para el periodo de retorno  $Tr$  establecido ( $m^3/s$ ).

$C$  = Coeficiente de escurrimiento de la cuenca en estudio, adimensional.

$I$  = Intensidad de lluvia para una duración de tormenta igual al tiempo de concentración  $t_c$  para el periodo de retorno  $Tr$  establecido, ( $mm/h$ ).

$A$  = Área de la cuenca, en  $km^2$ .

De acuerdo con la Tabla No. 4 de la fracción C.3 del manual M-PRY-CAR-1.06.003, se determina el coeficiente de escurrimiento ( $C$ ) de la cuenca, conforme a las condiciones de su superficie.

**Tabla No. 4.** Valores del coeficiente de escurrimiento ( $C$ ).

Tipo de superficie por drenar	Pendiente (%)	Coeficiente de escurrimiento	
		Mínimo	Máximo
A) Praderas:			
1. Suelo arenoso	< 2	0.05	0.1
2. Suelo arenoso medio	2 a 7	0.1	0.15
3. Suelo arenoso empinado	> 7	0.15	0.2
4. Suelo arcilloso plano	< 2	0.13	0.17
5. Suelo arcilloso medio	2 a 7	0.18	0.22
6. Suelo arcilloso empinado	> 7	0.25	0.35
B) Zonas pavimentadas			
1. Pavimento asfáltico		0.7	0.95
2. Pavimento de concreto		0.8	0.95
3. Pavimento adoquinado		0.7	0.85
4. Estacionamientos		0.75	0.85
5. Patios de ferrocarril		0.2	0.4
C) Zonas residenciales			
1. Unifamiliares		0.3	0.5
2. Multifamiliares, espaciados		0.4	0.6
3. Multifamiliares, juntos		0.6	0.75
4. Suburbanas		0.25	0.4
5. Casas habitación		0.5	0.7
D) Zonas comerciales			
1. Zona comercial (áreas céntricas)		0.7	0.95

2. Áreas vecinas	0.5	0.7
E) Zonas industriales		
1. Construcciones espaciadas	0.5	0.8
2. Construcciones juntas	0.6	0.9
F) Campos cultivados	0.2	0.4
G) Zonas forestadas	0.1	0.3
H) Parques y cementerios	0.1	0.25
I) Áreas de recreo y campos de juego	0.2	0.35
J) Azoteas y techados	0.75	0.95

Fuente: SCT (2003, p. 3).

### 2.6.2 Método de Ven Te Chow.

De acuerdo a la fracción E.3 del manual M-PRY-CAR-1.06.004 para calcular con este método el gasto máximo correspondiente a un periodo de retorno, las características del suelo de la cuenca en estudio, se clasifica dentro de alguno de los siguientes tipos:

- Tipo A: suelos con potencial de escurrimiento mínimo. Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezclas de ambas.
- Tipo B: suelos con infiltración media inferior a la del tipo A. Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.
- Tipo C: suelos con infiltración media inferior a la del tipo B. Comprende arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.
- Tipo D: suelos con potencial de escurrimiento máximo. Incluye principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

En la Tabla No. 5 se determina el número de escurrimiento ( $N$ ), según el tipo de suelo, y de acuerdo con las características de la superficie de la cuenca.

**Tabla No. 5.** Selección del número de escurrimiento (*N*).

USO DE LA TIERRA O COBERTURA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosques sembrados y cultivados	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	De superficie dura	72	84	90	92
	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
Bosques naturales	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso o alta transpiración muy espeso o alta transpiración	26	52	62	69
Descanso (sin cultivo)		15	44	54	61
	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivo de surcos	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembradas con maquinaria al voleo) o potrero de rotación	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	83
Potreo (permanente)	Curvas de nivel, bueno	6	35	70	79
	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100

Fuente: SCT (2004, p. 9).

Si existen varias zonas con suelos de tipos diferentes, para cada una de ellas se determina su número de escurrimiento ( $N_i$ ), así como su área ( $A_i$ ) y se obtiene el número de escurrimiento de toda la cuenca aplicando la siguiente formula:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^k N_i A_i}{A}$$

Donde:

$N$  = Número de escurrimiento de la cuenca en estudio, adimensional.

$N_i$  = Número de escurrimiento de la zona  $i$ , adimensional.

$A_i$  = Área de la zona  $i$ , ( $km^2$ ).

$A$  = Área total de la cuenca, ( $km^2$ ).

$k$  = Número de zonas identificadas.

Los resultados que se obtienen mediante el método de Chow, son muy sensibles a la variación del número de escurrimiento, por lo que su determinación ha de hacerse cuidadosamente.

Con una duración de la tormenta ( $t$ ), seleccionada arbitrariamente, en minutos o en horas, se entra verticalmente en las curvas de I-d-Tr, hasta la curva correspondiente al periodo de retorno establecido y se determina horizontalmente la intensidad de lluvia en mm/hora. Se calcula la altura de precipitación ( $P$ ) correspondiente a la intensidad de lluvia determinada como se indica en el inciso anterior, multiplicando ésta por la duración de la tormenta seleccionada y se transforma a centímetros.

Con el número de escurrimiento ( $N$ ) y la altura de precipitación ( $P$ ), se determina la precipitación en exceso ( $P_e$ ) con la siguiente formula:

$$P_e = \frac{\left[ P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

Donde:

$P_e$  = Precipitación en exceso para la duración de tormenta seleccionada y el periodo de retorno establecido, (cm).

$P$  = Altura de precipitación para la duración de tormenta seleccionada y el periodo de retorno establecido, (cm).

$N$  = Número de escurrimiento de la cuenca en estudio, adimensional.

Con base en la precipitación en exceso ( $P_e$ ) y la duración de la tormenta ( $t$ ) seleccionada, se determina el factor de escurrimiento ( $X$ ), en centímetros por hora, con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{P_e}{t}$$

Donde:

$X$  = Factor de escurrimiento (cm/h)

$P_e$  = Precipitación en exceso para la duración de tormenta seleccionada y el periodo de retorno establecido, (cm)

$t$  = Duración de la tormenta seleccionada, (h)

Con la longitud del cauce principal ( $L$ ) convertida a metros y su pendiente media ( $S_c$ ) expresada en por ciento, se calcula el tiempo de retraso ( $t_r$ ), mediante la siguiente formula:

$$t_r = 0.00505 \left( \frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^{0.64}$$

Donde:

$t_r$  = Tiempo de retraso, (h)

$L$  = Longitud del cauce principal, (m)

$S_c$  = Pendiente media del cauce principal (%)

Se calcula la relación entre la duración de la tormenta seleccionada y el tiempo de retraso ( $t/t_r$ ), se determina el factor de reducción del pico ( $Z$ ), adimensional.

El gasto que producirá la precipitación con la duración de la tormenta seleccionada, para el periodo de retorno establecido, se calcula con la siguiente formula:

$$Q = 2.78 A X Z$$

Donde:

$Q$ = Gasto para la duración de la tormenta seleccionada y el periodo de retorno establecido, ( $m^3/s$ ).

$A$  = Área de la cuenca, ( $km^2$ )

$X$  = Factor de escurrimiento, (cm/h)

$Z$  = Factor de reducción del pico, adimensional.

Se repite el procedimiento indicado para otras duraciones de tormenta con el periodo de retorno establecido ( $T_r$ ) y se selecciona como gasto máximo ( $Q_{T_r}$ ) para ese periodo de retorno, el gasto que resulte mayor.

### **2.6.3 Método del hidrograma unitario triangular.**

Las características de un hidrograma parte de la base generada de una precipitación, esta puede dividirse en precipitación en exceso e infiltración, que se traducen en los componentes del escurrimiento: superficial, subsuperficial y subterráneo, o escurrimiento directo y de base.

El análisis de hidrogramas implica separar el caudal directo y el caudal base para su consideración en el análisis del hidrograma unitario.

El concepto de hidrograma unitario, se basa en considerar que el hidrograma de salida de una cuenca pequeña es la suma de los hidrogramas elementales de todas las subáreas de la cuenca, modificados por el viaje por la cuenca y el almacenamiento en los cauces. Como las características físicas de la cuenca: tamaño, forma, pendiente; son constantes, se consideran similares a las formas de los hidrogramas resultantes de tormentas con características similares. Esto es lo que se considera la esencia del hidrograma unitario.

Si bien las características de la cuenca son constantes, las características de la cuenca no, por lo que no será suficiente un hidrograma unitario típico para la cuenca, ya que será cambiante según la variabilidad de las tormentas.

En este método se requiere conocer las características fisiográficas de la cuenca. Además, ha sido desarrollado para cuencas pequeñas y su forma es triangular. Para obtener el gasto pico se determina por la ecuación siguiente:

$$q_p = 0.208 \frac{A}{t_p}$$

Donde

$A$  = Área de la cuenca, en  $km^2$

$t_p$  = Tiempo pico, en horas.

$q_p$  = Gasto pico, en  $m^3/s/mm$

$$t_r = 1.67t_p$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c$$

## 2.7. ANÁLISIS HIDROLÓGICO.

Las precipitaciones de lluvia medidos en una estación son de tipo puntual, en el que algunas ocasiones, nos permiten conocer la variación de la misma con respecto al tiempo. Con la información histórica de las precipitaciones ocurridas en la estación, al realizar el análisis de la información también se puede determinar el periodo de retorno que tiene cada una de las lluvias registradas.

De acuerdo a la información hidrométrica, se obtuvo como resultado que la distribución Lognormal de 3 parámetros es la que mejor se ajusta a los datos de la estación.

En la Tabla No. 6, se define los resultados de las precipitaciones máximas para los diferentes periodos de retorno.

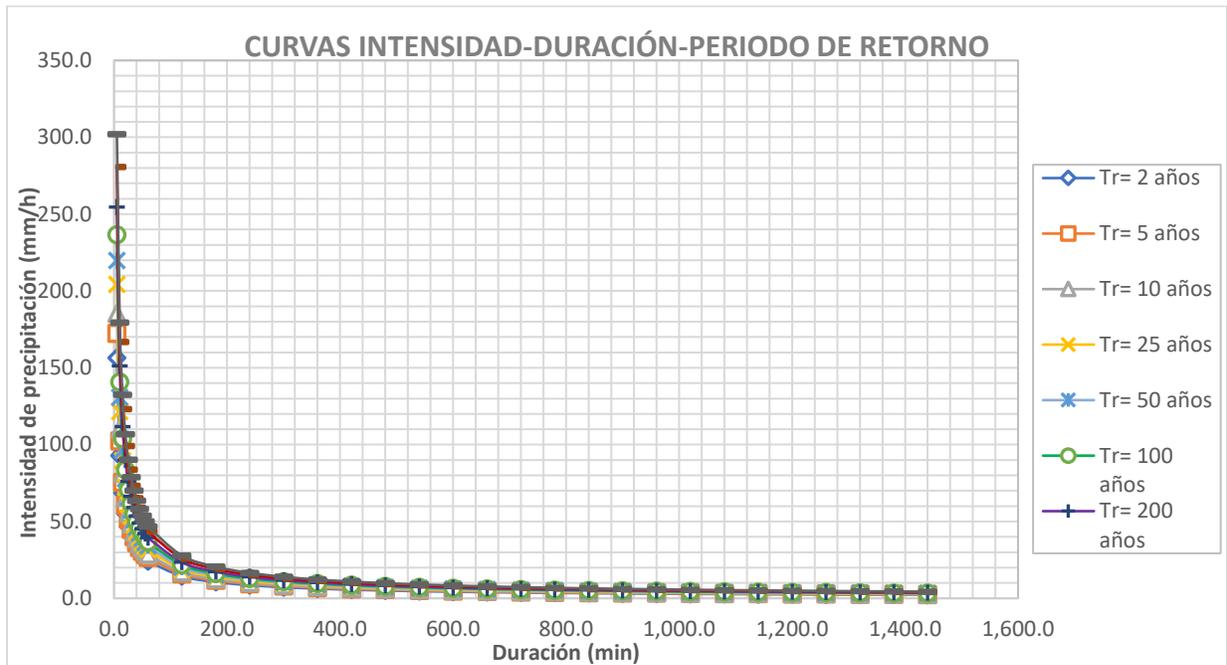
**Tabla No. 6.** Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno por la distribución Lognormal 3 parámetros.

T (años)	Pmáx
2	73
5	92.11
10	102.59
25	114.12
50	121.78
100	128.81
200	135.36
500	143.47
1000	149.26

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente, se determinan las curvas Intensidad–Duración–Periodo de retorno (i-d-T), que relacionan la intensidad de la precipitación con el intervalo de tiempo entre su duración y el periodo medio transcurrido entre precipitaciones de igual o mayor intensidad. (Ver figura No. 30).

**Figura No. 30.** Curvas I-D-T para la zona en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

### 2.7.1 Aplicación de los métodos para el cálculo del gasto hidrológico.

Para el presente estudio, se aplicaron 3 métodos hidrológicos para lograr una comparativa de los valores obtenidos para el gasto hidrológico, los cuales son los siguientes:

1. Método Racional Americano
2. Método de Ven Te Chow
3. Hidrograma Unitario Triangular

Para la obtención de los gastos de diferentes periodos de retorno, los datos hidrológicos de la cuenca en estudio son los siguientes:

- Obra de drenaje localizada en el km 91 + 989 de la autopista Arriaga- Ocozocoautla
- Área= 285.7 ha. = 2.857  $km^2$
- Pendiente ( $S_c$ )= 0.011666126= 1.166126%
- Longitud del cauce = 4936.503 m = 4.936503 km

- Tiempo de concentración:

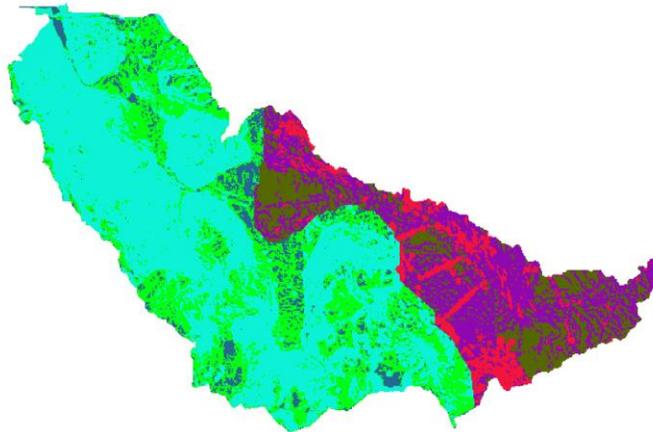
$$t_c = 0.0662 \left( \frac{4.936503^{0.77}}{0.011666126^{0.385}} \right) = 1.26 \text{ h} = 75.4 \text{ min}$$

### 2.7.1.1 Método racional.

Este método considera el área de la cuenca, la forma y tipo de la cuenca y la altura de precipitación mediante el tiempo o intensidad de lluvia. Actualmente, es el método más utilizado, especialmente en el diseño de obras de drenajes.

El coeficiente de escurrimiento  $C$ , está determinado para algunas condiciones según el tipo de suelo dentro de la cuenca, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno, entre otros factores. Para la justificación de este valor, se encuentra con base a la información de las cartas topográficas del INEGI y se estima tomando como guía la Tabla No. 3 (Ver figura No. 31).

**Figura No. 31.** Coeficiente de escurrimiento, según sus características de la cuenca.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla No. 7, se muestran los gastos estimados para diferentes periodos de retorno por el método racional.

**Tabla No. 7.** Resultados de los gastos obtenidos a diferentes periodos de retorno por el método racional.

Tr (años)	Q (m <sup>3</sup> /s)
2	5.17
5	5.7
10	6.13
25	6.76
50	7.27
100	7.82
200	8.42
500	9.28
1000	9.99

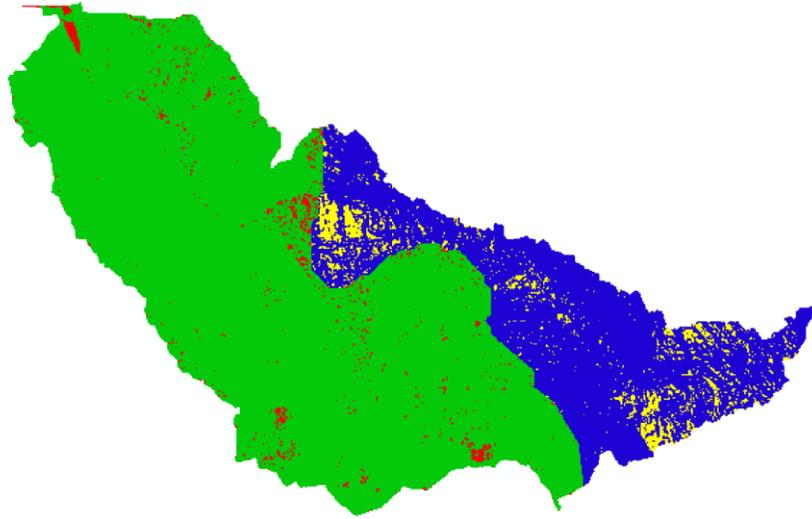
Fuente: Elaboración Propia.

### 2.7.1.2 Método de Ven Te Chow.

Chow desarrolló un método para el cálculo del gasto de pico de hidrograma para diseño de alcantarillas y otras estructuras de drenaje pequeñas. Este método solo proporciona el gasto de pico y es aplicable a cuencas no urbanas con una superficie menor de 25 km<sup>2</sup>. (Aparicio, 1992, p. 228).

A continuación, se presenta el cálculo realizado para obtener el gasto de diseño para la cuenca en estudio. Para la aplicación de este método es importante conocer el valor del número de escurrimiento  $N$ , que depende del tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la precipitación antecedente. Como justificación de este valor, se encuentra con base a la información de las cartas topográficas del INEGI y se estima tomando como guía la Tabla No. 5 (Ver figura No. 32).

**Figura No. 32.** Número de escurrimiento, según sus características de la cuenca.



Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla No. 8, se muestran los gastos estimados para diferentes periodos de retorno por el método de Chow.

**Tabla No. 8.** Resultados de los gastos obtenidos a diferentes periodos de retorno por el método de Ven Te Chow.

Tr (años)	Q (m <sup>3</sup> /s)
2	1.49
5	1.94
10	2.34
25	3.01
50	3.62
100	4.31
200	5.1
500	6.3
1000	7.34

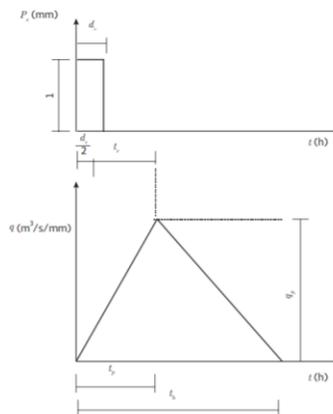
Fuente: Elaboración Propia

### 2.7.1.3 Hidrograma unitario triangular.

Este método tiene en cuenta la precipitación constante y es adecuado para cuencas hidrográficas con pocas hectáreas (pequeñas).

Mockus fundó un hidrograma unitario de forma triangular, como se muestra en la figura No. 33 (Aparicio, 1992, p. 234).

**Figura No. 33.** Hidrograma unitario triangular.



Fuente: Adaptada de *Fundamentos de hidrología de superficie* (p. 234) por F.J. Aparicio 1992, Limusa Noriega Editores.

En la Tabla No. 9, se muestran los gastos estimados para diferentes periodos de retorno por el método del hidrograma unitario triangular.

**Tabla No. 9.** Resultados de los gastos obtenidos a diferentes periodos de retorno por el método del hidrograma unitario triangular.

Tr (años)	Q (m <sup>3</sup> /s)
2	8.64
5	9.52
10	10.25
25	11.29
50	12.15
100	13.08
200	14.07
500	15.51
1000	16.69

Fuente: Elaboración propia

#### 2.7.1.4 Resumen de resultados hidrológicos

De acuerdo con los lineamientos de CONAGUA, el periodo de retorno de **diseño para la obra de drenaje es  $Tr = 100$  años**, por lo tanto, el gasto de diseño es el obtenido para ese periodo de retorno.

Con base a los resultados en los métodos hidrológicos, se presenta la siguiente Tabla No. 10 indicando el resumen de los gastos calculados por los tres métodos.

**Tabla No. 10.** Resumen de gastos estimados por tres métodos en diferentes periodos de retorno.

Tr (años)	Q (m <sup>3</sup> /s)		
	Racional	VenTeChow	HUT
2	5.17	1.49	8.64
5	5.70	1.94	9.52
10	6.13	2.34	10.25
25	6.76	3.01	11.29
50	7.27	3.62	12.15
<b>100</b>	<b>7.82</b>	<b>4.31</b>	<b>13.08</b>
200	8.42	5.10	14.07
500	9.28	6.30	15.51
1000	9.99	7.34	16.69

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla anterior, se observa que los valores obtenidos con el método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT) son los más desfavorables; por lo tanto, estos valores estimados son los que se utilizarán para la revisión de su capacidad hidráulica de la obra de drenaje.

#### 2.8 Aspectos hidráulicos

La eficiencia hidráulica de una red de alcantarillado que transporta aguas residuales, pluviales o ambas depende de sus características físicas. Mediante el uso de algunos principios hidráulicos, se analizan y dimensionan.

Los conceptos fundamentales de Hidráulica, útiles para el diseño y estudio de redes de alcantarillado, incluyendo los tipos de flujo, ecuaciones fundamentales para la conservación de masa o de continuidad, cantidades de movimiento y energía, conceptos de energía específica,

pérdidas de cargas por fricción y cargas locales, secciones hidráulicas, saltos hidráulicos, estructuras hidráulicas especiales y métodos de tránsito de avenidas.

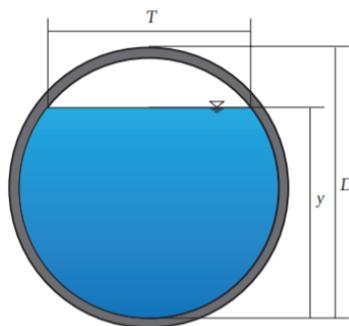
En una red de drenaje, se sugiere que los canales estén diseñados con capacidad suficiente para trabajar con una superficie libre en caso de un gasto máximo. Sin embargo, algunas veces trabajan a presión por obstáculos, hundimientos, cruces o en lugares donde las condiciones características de la ubicación forzaron esta operación.

Cuando en un conducto cerrado el flujo se realiza a superficie libre, se dice que funciona parcialmente lleno. Se sugiere en este tipo de funcionamiento hidráulico en redes de drenaje, para evitar que los conductos funcionen bajo presión porque el agua puede crecer hasta las calles.

Por lo que es necesario diseñar los conductos de una red de drenaje trabajen en superficie libre entre el 80 y el 90% de su sección transversal, mientras se conduce un gasto de diseño.

En una sección circular los parámetros hidráulicos con sección parcialmente llena, tales como el área hidráulica, el perímetro mojado y el ancho de la superficie libre pueden calcularse con las siguientes ecuaciones y que están referidas a la figura No. 34:

**Figura No. 34.** Parámetros geométricos de una sección circular transversal.



Fuente: CONAGUA (2019, p. 219).

a) Tirante ( $y$ ): Se le denomina tirante a la distancia vertical medida desde el punto más bajo de la sección de la conducción hasta la superficie libre del agua (m).

$$0 \leq \frac{y}{D} \leq 1$$

b) Área hidráulica ( $A$ ): Se le llama así al área que ocupa el agua en un corte transversal normal a la dirección del flujo ( $m^2$ ). Su cálculo se hace con base en la geometría del conducto.

$$A = \frac{2y - D}{2} \sqrt{Dy - y^2} + \frac{D^2}{4} \arcsen\left(\frac{2y - D}{D}\right) + \frac{\pi D^2}{8}$$

c) Ancho de superficie libre ( $T$ ): Es la distancia medida transversalmente al flujo a nivel de la superficie libre (m).

$$T = 2\sqrt{y(D - y)}$$

d) Perímetro mojado ( $P$ ): Es la longitud del contorno de la sección transversal en la que el agua tienen contacto con las paredes y el fondo de la conducción (m).

$$P = \left[ \arcsen\left(\frac{2y - D}{D}\right) + \frac{\pi}{2} \right] D$$

e) Radio hidráulico ( $R_h$ ): Es la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado (m):

$$R_h = \frac{A}{P}$$

Para simplificar los cálculos se han obtenido relaciones entre las diferentes variables hidráulicas de interés en una tubería de sección circular, teniendo como base las calculadas a sección llena con la fórmula de Manning, con respecto a las correspondientes a un tirante determinado.

Por otra parte, también se dispone de la siguiente tabla No. 11 de diferentes parámetros hidráulicos.

**Tabla No. 11.** Elementos hidráulicos en tuberías de sección circular.

$\frac{y}{D}$	$\frac{A}{D^2}$	$\frac{nQ}{D^{8/3}S^{1/2}}$	$\frac{Q_C}{D^{5/2}}$	$\frac{y}{D}$	$\frac{A}{D^2}$	$\frac{nQ}{D^{8/3}S^{1/2}}$	$\frac{Q_C}{D^{5/2}}$
0.01	0.0013	0.00005	0.00034	0.51	0.0403	0.16115	0.80048
0.02	0.0037	0.00021	0.00136	0.52	0.4127	0.16648	0.83071
0.03	0.0069	0.00050	0.00305	0.53	0.4227	0.17182	0.86148
0.04	0.0105	0.00093	0.00541	0.54	0.4327	0.17719	0.89278
0.05	0.0147	0.00150	0.00844	0.55	0.4426	0.18256	0.92463
0.06	0.0192	0.00221	0.01213	0.56	0.4526	0.18794	0.95701
0.07	0.0242	0.00306	0.01647	0.57	0.4625	0.19331	0.98994
0.08	0.0294	0.00407	0.02147	0.58	0.4724	0.19869	1.02342
0.09	0.0350	0.00521	0.02712	0.59	0.4822	0.20405	1.05746
0.10	0.0409	0.00651	0.03342	0.60	0.4920	0.20940	1.09207
0.11	0.0470	0.00795	0.04035	0.61	0.5018	0.21473	1.12726
0.12	0.0534	0.00953	0.04792	0.62	0.5115	0.22004	1.16303
0.13	0.0600	0.01126	0.05613	0.63	0.5212	0.22532	1.19940
0.14	0.0668	0.01314	0.06496	0.64	0.5308	0.23056	1.23638
0.15	0.0739	0.01515	0.07442	0.65	0.5404	0.23576	1.27400
0.16	0.0811	0.01731	0.08450	0.66	0.5499	0.24092	1.31226
0.17	0.0885	0.01960	0.09520	0.67	0.5594	0.24602	1.35118
0.18	0.0961	0.02203	0.10650	0.68	0.5687	0.25106	1.39080
0.19	0.1039	0.02460	0.11842	0.69	0.5780	0.25604	1.43114
0.20	0.0118	0.02729	0.13095	0.70	0.5872	0.26095	1.47223
0.21	0.1199	0.03012	0.14407	0.71	0.5964	0.26579	1.51411
0.22	0.1281	0.03308	0.15779	0.72	0.6054	0.27054	1.55682

0.23	0.1365	0.03616	0.17211	0.73	0.6143	0.27520	1.60040
0.24	0.1449	0.03937	0.18701	0.74	0.6231	0.27976	1.64491
0.25	0.1535	0.04270	0.20250	0.75	0.6319	0.28422	1.69041
0.26	0.1623	0.04614	0.21857	0.76	0.6405	0.28856	1.73698
0.27	0.1711	0.04970	0.23522	0.77	0.6489	0.29279	1.78470
0.28	0.1800	0.05337	0.25245	0.78	0.6573	0.29689	1.83367
0.29	0.1890	0.05715	0.27025	0.79	0.6655	0.30085	1.88400
0.30	0.1982	0.06104	0.28861	0.80	0.6736	0.30466	1.93583
0.31	0.2074	0.06503	0.30754	0.81	0.6815	0.30832	1.98933
0.32	0.2167	0.06912	0.32703	0.82	0.6893	0.31181	2.04468
0.33	0.2260	0.07330	0.24708	0.83	0.6969	0.31513	2.10212
0.34	0.2355	0.07758	0.36769	0.84	0.7043	0.31825	2.16194
0.35	0.2150	0.08195	0.38884	0.85	0.7115	0.32117	2.22447
0.36	0.2546	0.08641	0.41054	0.86	0.7186	0.32388	2.29014
0.37	0.2642	0.09095	0.43279	0.87	0.7254	0.32635	2.35950
0.38	0.2739	0.09557	0.45559	0.88	0.7320	0.32858	2.43322
0.39	0.2836	0.10027	0.47892	0.89	0.7384	0.33053	2.51220
0.40	0.2934	0.10503	0.50279	0.90	0.7445	0.33219	2.59762
0.41	0.3032	0.10987	0.52720	0.91	0.7504	0.33354	2.69108
0.42	0.3130	0.11477	0.55215	0.92	0.7560	0.33453	2.79480
0.43	0.3229	0.11973	0.57762	0.93	0.7612	0.33512	2.91204
0.44	0.3328	0.12475	0.60363	0.94	0.7662	0.33527	3.04774
0.45	0.3428	0.12983	0.63016	0.95	0.7707	0.33491	3.20988
0.46	0.3527	0.13495	0.65723	0.96	0.7749	0.33393	3.41249
0.47	0.3627	0.14011	0.68482	0.97	0.7785	0.33218	3.68351

0.48	0.3727	0.11532	0.71294	0.98	0.7817	0.32936	4.09047
0.49	0.3827	0.15057	0.74159	0.99	0.7841	0.32476	4.87463
0.50	0.3927	0.15584	0.77077	1.00	0.7854	0.31169	-

Fuente: CONAGUA (2019, p. 221,221).

La fórmula de Manning es la más empleada por su sencillez y porque se dispone de gran cantidad de datos para estimar el coeficiente de rugosidad “*n*”. Además, es recomendada en el cálculo de flujos con superficie libre y en conductos cerrados con sección parcialmente llena, se define como:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

*V* = Velocidad media del flujo (*m/s*)

*n* = Coeficiente de rugosidad

*R<sub>h</sub>* = Radio hidráulico (*m*)

*S* = Pendiente del gradiente hidráulico de la obra de drenaje

La ecuación de Manning tiene la ventaja para conductos de sección constante, que el coeficiente de rugosidad depende exclusivamente del material del tubo. La determinación de los valores del factor de fricción es totalmente empírica y su principal dificultad radica en alcanzar en campo o en laboratorio un flujo uniforme completamente desarrollado. La Tabla No. 12 muestra los valores del coeficiente *n* para algunos materiales.

**Tabla No. 12.** Valores del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning.

<b>Materia</b>	<b>Coeficiente <math>n</math> de Manning</b>	<b>Referencia</b>
Concreto	0.012 - 0.014	Ven Te Chow (1994)
Policloruro de vinilo (PVC), pared sólida	0.009	UTAH, Department of Transportation (2004)
Fibrocemento	0.011 - 0.015	ASCE/EWRI (2006)
Acero soldado con recubrimiento interior (pinturas)	0.011	Manual de CONAGUA (2009)

Fuente: CONAGUA (2019, p. 210).

El gasto puede ser evaluado en una sección transversal de un flujo si se conocen la velocidad media del flujo y el área hidráulica, pues su producto es precisamente igual al gasto.

$$Q = A \cdot V$$

La aplicación de esta ecuación de continuidad, para el diseño de redes de drenaje, consiste en el flujo en una tubería o en un cauce, donde pueden seleccionarse dos secciones transversales (sean éstas las secciones 1 y 2, respectivamente), separadas entre sí cierta distancia en la cual no existan aportaciones o extracciones de agua. Si se considera flujo permanente, es decir, que el gasto no varía con el tiempo, entonces la cantidad de agua por unidad de tiempo que ingresa al volumen de control será igual a aquella que lo abandona.

### **2.8.1 ANÁLISIS HIDRÁULICO.**

La obra de drenaje ubicada en el kilómetro 91+989 de la autopista Arriaga-Ocozocoautla, es una tubería de concreto con un diámetro de 1.20 m. Como antes se mencionó, dicha obra ha trabajado al 100% de su capacidad hidráulica, por lo que consideraremos tomar en cuenta con

un tirante igual a su diámetro y obtener su gasto actual. La pendiente de la obra de drenaje es del 2%.

Se considera que:

$$D = y$$

$$D = 1.2 \text{ m} = y$$

Calculamos el área:

$$A = \frac{2(1.2) - (1.2)}{2} \sqrt{(1.2)(1.2) - (1.2)^2} + \frac{(1.2)^2}{4} \arcsen\left(\frac{2(1.2) - 1.2}{1.2}\right) + \frac{\pi(1.2)^2}{8}$$

$$A = 1.13 \text{ m}^2$$

El ancho de superficie libre se considera que trabajando al 100% de su capacidad hidráulica es igual a cero.

Se obtiene el perímetro mojado:

$$P = \left[ \arcsen\left(\frac{2(1.2) - (1.2)}{1.2}\right) + \frac{\pi}{2} \right] 1.2$$

$$P = 3.77 \text{ m}$$

Después, se calcula el radio hidráulico:

$$R_h = \frac{1.13}{3.77}$$

$$R_h = 0.3 \text{ m}$$

La obra de drenaje consta de una tubería de concreto, en el que se considera según la Tabla No. 11, el coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0.013$ . Con la ayuda de la ecuación de Manning, se obtiene la velocidad media del flujo:

$$V = \frac{1}{0.013} (0.3)^{\frac{2}{3}} (0.02)^{\frac{1}{2}}$$

$$V = 4.88 \text{ m/s}$$

De acuerdo a la normatividad de la S.C.T. para velocidades mayores a 4.5 m/s y a criterio del proyectista y con autorización de la Secretaría, podrá incluirse en el proyecto la construcción de alguna obra disipadora de energía, tal como se trata con detalle en la fracción F.8. del manual M.PRY.CAR:4.02.002.

Finalmente, con la ecuación de continuidad se obtiene el gasto:

$$Q = (1.13)(4.88)$$

$$Q = 5.51 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, se comprueba que no cuenta con la capacidad hidráulica para transitar el gasto de diseño asociado al  $T_r = 100$  años.

$$Q_{Tr=100 \text{ años}} > Q_{\text{actual}}$$

$$13.08 \text{ m}^3/\text{s} > 5.51 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN.

Se considera que la obra de drenaje transversal en condiciones actuales, no cuenta con suficiente capacidad hidráulica para transitar el gasto hidrológico obtenido con el método del hidrograma unitario triangular (condición más desfavorable), por lo tanto, es necesario que la alcantarilla tenga modificaciones en su área hidráulica. Se propone colocar un hincado, que consta de una tubería de acero al carbón con aplicación de pintura en el exterior e interior con anticorrosivo, con la cual encontraremos la dimensión del diámetro óptimo, para evitar que se presente un tirante de agua sobre la superficie de rodamiento.

Dada la geometría de la sección circular, se sabe que el aural máximo que puede conducir la tubería se da con un tirante cercano al 95 por ciento del diámetro de la tubería.

Primero, se propone un diámetro con 1.2 m.

Se obtiene sus parámetros geométricos:

$$D = 1.2 \text{ m}$$

Para calcular el gasto máximo, el tirante se encontrará trabajando al 95% del diámetro.

Por lo que:

$$y = \frac{1.2}{100}(95) = 1.14 \text{ m}$$

Calculamos el área:

$$A = \frac{2(1.14) - (1.2)}{2} \sqrt{(1.2)(1.14) - (1.14)^2} + \frac{(1.2)^2}{4} \arcsen\left(\frac{2(1.14) - 1.2}{1.2}\right) + \frac{\pi(1.2)^2}{8}$$

$$A = 1.11 \text{ m}^2$$

El ancho de superficie libre se calcula:

$$T = 2\sqrt{(1.14)(1.2 - 1.14)}$$

$$T = 0.52 \text{ m}$$

Se obtiene el perímetro mojado:

$$P = \left[ \arcsen \left( \frac{2(1.14) - (1.2)}{1.2} \right) + \frac{\pi}{2} \right] 1.2$$

$$P = 3.23 \text{ m}$$

Después, se calcula el radio hidráulico:

$$R_h = \frac{1.11}{3.23}$$

$$R_h = 0.34 \text{ m}$$

La obra de drenaje consta de una tubería de acero al carbón, en la cual se considera un coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0.011$ , según la Tabla No. 11. Con la ayuda de la ecuación de Manning, se obtiene la velocidad media del flujo:

$$V = \frac{1}{0.011} (0.34)^{\frac{2}{3}} (0.02)^{\frac{1}{2}}$$

$$V = 6.31 \text{ m/s}$$

Finalmente, con la ecuación de continuidad se obtiene el gasto máximo con un diámetro de 1.2 m:

$$Q = (1.11)(6.31)$$

$$Q = 7.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

Entonces, se suma el gasto de la obra de drenaje actual con el gasto calculado con un diámetro de 1.2 m y se obtiene:

$$Q_{Total} = 5.51 + 7.00 = 12.51 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, se comprueba que con un diámetro de 1.2 m no se cuenta con la capacidad hidráulica para transitar el gasto de diseño asociado al  $Tr = 100$  años.

$$Q_{Tr=100 \text{ años}} > Q_{actual} + Q_{D=1.2 \text{ m}}$$

$$13.08 \text{ m}^3/\text{s} > 12.51 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ahora, se propone un diámetro de 1.5 m.

Se obtiene sus parámetros geométricos:

$$D = 1.5 \text{ m}$$

Para calcular el gasto máximo, el tirante se encontrará trabajando al 95% del diámetro.

Por lo que:

$$y = \frac{1.5}{100}(95) = 1.425 \text{ m}$$

Calculamos el área:

$$A = \frac{2(1.425) - (1.5)}{2} \sqrt{(1.5)(1.425) - (1.425)^2} + \frac{(1.5)^2}{4} \arcsen\left(\frac{2(1.425) - 1.5}{1.5}\right) + \frac{\pi(1.5)^2}{8}$$

$$A = 1.73 \text{ m}^2$$

El ancho de superficie libre se calcula:

$$T = 2\sqrt{(1.425)(1.5 - 1.425)}$$

$$T = 0.65 \text{ m}$$

Se obtiene el perímetro mojado:

$$P = \left[ \arcsen\left(\frac{2(1.425) - (1.5)}{1.5}\right) + \frac{\pi}{2} \right] 1.5$$

$$P = 4.04 \text{ m}$$

Después, se calcula el radio hidráulico:

$$R_h = \frac{1.73}{3.23}$$

$$R_h = 0.43 \text{ m}$$

La obra de drenaje consta de una tubería de acero al carbón, en la cual se considera un coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0.011$ , según la Tabla No. 11. Con la ayuda de la ecuación de Manning, se obtiene la velocidad media del flujo:

$$V = \frac{1}{0.011} (0.43)^{\frac{2}{3}} (0.02)^{\frac{1}{2}}$$

$$V = 7.32 \text{ m/s}$$

Finalmente, con la ecuación de continuidad se obtiene el gasto máximo con un diámetro de 1.5 m:

$$Q = (1.73)(7.32)$$

$$Q = 12.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

Entonces, se suma el gasto de la obra de drenaje actual con el gasto calculado con un diámetro de 1.5 m y se obtiene:

$$Q_{Total} = 5.51 + 12.69 = 18.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, se comprueba que con un diámetro de 1.5 m si se cuenta con la capacidad hidráulica para transitar el gasto de diseño asociado al  $Tr= 100$  años.

$$Q_{Tr=100 \text{ años}} < Q_{actual} + Q_{D=1.5 \text{ m}}$$

$$13.08 \text{ m}^3/\text{s} < 18.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 4. CONCLUSIONES.

Después de haber concluido el Estudio Hidrológico e Hidráulico, se determina que la actual obra de drenaje de 1.2 m de diámetro, ubicada en el km 91+989 de la autopista Arriaga-Ocozocoautla, no cuenta con la capacidad hidráulica adecuada, por lo que debe ser reforzada con una tubería adicional de acero al carbón de 1.5 m de diámetro.

Por otro lado, de acuerdo con los lineamientos establecidos por CONAGUA, el periodo de retorno de diseño para obras de drenaje es  $T_r=100$  años. Con base en lo antes mencionado, si se suma el gasto de la tubería actual más el gasto de la tubería de diseño de 1.5 m, el gasto obtenido es mayor que el gasto con un periodo de retorno de 100 años, por lo que las obras de drenaje ubicadas en el km 91+989 cumplirían de manera adecuada con su funcionamiento hidráulico.

$$Q_{T_r=100 \text{ años}} < Q_{\text{actual}} + Q_{D=1.5 \text{ m}}$$

$$13.08 \text{ m}^3/\text{s} < 18.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

## REFERENCIAS

Castillo Figueroa E. y López Escobar C. F. “Estudio hidrológico e hidráulico para revisión de estructuras menores ubicadas en el km 4+000 de la autopista Chiapa de corzo-San Cristóbal de las Casas”, UNICACH 2022.  
<https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/4270/Erick%20Carlos.pdf?isAllowed=y&sequence=>, fecha de consulta diciembre 2022.

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Ubicación.  
[https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Mapa\\_Base/061.pdf](https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Mapa_Base/061.pdf)

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Climas.  
<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Climas/061.pdf>

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Hidrografía.  
<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Hidrografia/061.pdf>

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Geología.  
<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Geologia/061.pdf>

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Edafología.  
<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Edafologia/061.pdf>

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Fisiografía.  
<https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Fisiografia/061.pdf>

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (s.f.) Vegetación y Uso de Suelo. <https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/PERFILES/Vegetacion/061.pdf>

CONAGUA, “Servicio Meteorológico Nacional” <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>, fecha de consulta octubre 2020.

CLICOM, “Base de datos meteorológicos de la CONAGUA” <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>, fecha de consulta agosto, 2022.

Baeza Ramírez C., “Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia” Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2007. [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/4JIF3VPTYCA7YMTRL6TLEYUVVC4UULCIH5FN64JFXVJCJKN4U4-14020?func=full-set-set&set\\_number=503033&set\\_entry=000075&format=999](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/4JIF3VPTYCA7YMTRL6TLEYUVVC4UULCIH5FN64JFXVJCJKN4U4-14020?func=full-set-set&set_number=503033&set_entry=000075&format=999), consultado diciembre 2022.

Domínguez, M.R. (1981). Análisis Regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan. México. Tesis M.I., Universidad Autónoma de México, Fac. de Ingeniería, Posgrado. DEPMI.

Domínguez, R., Carriosa, E., Fuentes, G., Arganis, M., Osnaya, J. y Galván-Torres, A. (2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. *Tecnología y ciencias del agua*, Vol. 9 (1), pp. 5-29.

[https://www.researchgate.net/publication/322964614\\_Analisis\\_regional\\_para\\_estimar\\_precipitaciones\\_de\\_diseno\\_en\\_la\\_republica\\_mexicana](https://www.researchgate.net/publication/322964614_Analisis_regional_para_estimar_precipitaciones_de_diseno_en_la_republica_mexicana)

Aparicio Mijares, Francisco Javier. (1992), Fundamentos de hidrología de superficie, Primera reimpresión. Editorial Limusa Noriega Editores.

Chow, V. (1994) Hidráulica de canales abiertos. Traducido por Juan G. Saldarriaga, McGraw Hill, Segunda edición, Colombia.

Sotelo, G. (2002). Hidráulica General, Fundamentos. México, D.F.: Editorial Limusa. Vol. 1.

CONAGUA (s.f.) Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Drenaje pluvial, México D.F.

CONAGUA (s.f.) Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Alcantarillado pluvial. México DF.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Servicios Técnicos. Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.