



# **Universidad Tecnológica de la Mixteca**

## **Caracterización hidrológica de Tlacolula de Matamoros para la prevención de inundaciones**

Tesis

Para obtener el título de

**INGENIERO CIVIL**

Presenta

**Martin Ramos Castro**

DIRECTOR DE TESIS

**M.C. René Morales Luis**

CODIRECTOR DE TESIS

**Dra. Gabriela Álvarez Olguín**

Hca. Cd de Huajuapán de León, Oaxaca, enero del 2026

# DEDICATORIA

Agradezco enormemente a Dios, por guiarme, darme la fortaleza, sabiduría y mentalidad en los momentos más difíciles y acompañarme cada paso en este camino. Sin su bendición este logro no hubiera sido posible.

Le dedico este trabajo de tesis, primeramente, a mi madre, por su apoyo incondicional, por ser mi pilar y mi brazo fuerte durante toda mi vida universitaria. Gracias por tu amor, por tus sacrificios y por creer en mí.

A mis hermanos Jesús y Yatzareth, quienes junto con mi madre son las personas más importantes en mi vida. Su cariño, comprensión, consejos y alegría me proporcionaron el impulso necesario para seguir adelante, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

A mi querido abuelo Antonio, quien desde pequeño despertó en mí la pasión por la ingeniería civil. Gracias por llevarme a las obras, por enseñarme a observar y aprender, fuiste mi primer maestro y por inspirarme a seguir este camino. También le dedico este logro a mis abuelitas Eleazar y Saula, como a mi padre y a mis tíos, por su apoyo constante y sus palabras de aliento a lo largo de la licenciatura.

A mi querido Team “La Magia de la Amistad” —Hilary, Fernando, Nady, Éder y Cristopher—, gracias por convertir esta etapa universitaria en una de las mejores experiencias de mi vida. Su amistad, risas y compañía hicieron de cada día un recuerdo invaluable. A todos mis compañeros de universidad, y especialmente a mis amigos Adrián, Meyly, Axel y Natalia, por hacer de los momentos en la cafetería de mi amigo chino en espacios de diversión y tranquilidad. A mi amiga Jhoana, quien fue más que una compañera, una verdadera hermana a lo largo de esta etapa. Y a mis amigos Arturo, Gabriel y Habid, que son parte importante de mi vida, gracias por su amistad sincera.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores de tesis, el M.C. René Morales Luis y la Dra. Gabriela Álvarez Olgún, por haber aceptado acompañarme en este proceso, por su paciencia, orientación y, sobre todo, por los valiosos conocimientos y el apoyo que me brindaron a lo largo de mi formación profesional y durante la realización de esta tesis.

Extiendo también mi gratitud al Dr. Fidencio Sustaita Rivera, M.I. Guyelmo García Santiago y M.I.C. Jetzael Gustavo Barragán Chávez, revisores de esta tesis, por su disposición, sus valiosas observaciones y por compartir su experiencia y conocimientos los cuales contribuyeron significativamente al desarrollo de este trabajo.

Agradezco profundamente a todos los profesores que, con dedicación y compromiso, me enseñaron lo que realmente implica la carrera de ingeniería civil, compartiendo no solo sus conocimientos técnicos, si no también sus experiencias profesionales y personales, que enriquecieron mi formación. Asimismo, a todas las personas que me brindaron su apoyo y conocimiento durante mi etapa universitaria, mi más sincero reconocimiento.

De igual manera, expreso mi agradecimiento al ingeniero Jaime R. León Zabaleta por brindarme la oportunidad de integrarme al ámbito laboral, transmitiéndome sus conocimientos y habilidades. A la arquitecta Diana y a la ingeniera Karina, gracias por su amistad, apoyo y por convertirse en guías valiosas durante mi experiencia profesional.

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE .....	iv
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas .....	x
Índice de ecuaciones .....	xi
RESUMEN .....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
JUSTIFICACIÓN .....	4
1.0 MARCO TEÓRICO .....	5
El ciclo del agua .....	5
Hidrología.....	6
Diseño hidrológico .....	6
Relación lluvia escurrimiento.....	6
La precipitación.....	6
Precipitación efectiva.....	7
El escurrimiento .....	7
Cuenca Hidrográfica.....	9
Geomorfología .....	9
Parámetros de forma.....	10
Parámetros de relieve.....	10

Parámetros de red hidrográfica.....	10
Pruebas de homogeneidad e independencia.....	10
Pruebas de homogeneidad.....	11
Análisis de frecuencias .....	11
Precipitación Promedio.....	11
Curvas intensidad-Duración-periodo de retorno .....	12
<b>2.0 METODOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
Descripción general del área de estudio.....	13
Caracterización hidrológica de Tlacolula de Matamoros.....	15
2.1 Recopilación de información de estaciones climatológicas .....	16
2.2 Recopilación de información geográfica.....	17
2.3 Caracterización geomorfológica de cuencas. ....	18
2.3.1 Parámetros de forma de la cuenca.....	18
2.3.2 Parámetros de relieve de la cuenca .....	21
2.3.3 Parámetros de la red hidrográfica .....	25
2.5 Series de lluvia máxima anual en 24 horas .....	29
2.6 Homogeneidad e independencia de las series.....	31
2.6.1 Prueba de homogeneidad.....	31
2.6.2 Prueba de independencia .....	33
2.7 Análisis de frecuencias.....	34
2.8 Precipitación promedio de las cuencas .....	43
2.9 Curvas intensidad duración periodo de retorno .....	46
2.10 Tormentas de diseño .....	48
2.11 Número de curva (CN o N).....	49
2.12 Obtención de los hidrogramas de diseño.....	50
2.13 Determinación de las áreas de inundación para los periodos de retorno indicados .....	52
<b>3.0 Resultados.....</b>	<b>53</b>
3.1 Verificación in situ: Trabajo de Campo en la Cuenca de Tlacolula de Matamoros.....	53
3.2 Parámetros geomorfológicos de la cuenca .....	57
3.2.1 Parámetros de forma de la cuenca.....	57
3.2.2 Parámetros de relieve de la cuenca .....	62
3.2.3 Parámetros de la red hidrográfica .....	69
<b>ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA .....</b>	<b>74</b>

3.3 Estaciones climatológicas seleccionadas .....	74
3.4 Lluvia máxima de 24 horas .....	76
3.5 Pruebas de homogeneidad e independencia .....	77
3.6 Frecuencias máximas en 24 horas .....	79
3.7 Precipitación promedio .....	82
3.8 Intensidades método de Chen .....	86
3.9 Hietogramas de diseño .....	89
3.10 Curva número .....	91
3.11 Hidrogramas de diseño.....	101
3.12 Mapas de inundación .....	103
4.0 CONCLUSIONES .....	114
5.0 REFERENCIAS.....	116
6.0 ANEXOS .....	119
6.1 Pruebas de independencia y homogeneidad .....	119
6.2 Lluvias máximas a 24 horas .....	130
6.3 Mapa de Isoyetas .....	138
6.4 Hietogramas de diseño .....	141
6.5 Tipos de suelo curva número.....	149

# Índice de figuras

Figura 1 Ciclo hidrológico.....	5
Figura 2 Hidrograma de diseño (Aparicio, 1989).....	8
Figura 3 Ubicación del municipio de Tlacolula de Matamoros .....	13
Figura 4 Distribución espacial de las estaciones climatológicas utilizadas en el estudio de la zona de Tlacolula de Matamoros. ....	17
Figura 5 Relación del factor de forma de una cuenca (Gómez, 2020).....	20
Figura 6 Características de Curva hipsométrica (Aparicio, 1989).....	22
Figura 7 Red de orden de una cuenca (drenaje) .....	25
Figura 8 Método de Thiessen (Aparicio, 1989).....	44
Figura 9 Método de Isoyetas (Aparicio, 1989).....	45
Figura 10 Zona del valle de Tlacolula.....	53
Figura 11 Zona de Yagul Tlacolula (Uso de suelo).....	54
Figura 12 Río seco del municipio de Tlacolula .....	54
Figura 13 Zona de San Luis y su uso de la tierra para uso del mezcal .....	55
Figura 14 Visualización del tipo y uso de suelo .....	55
Figura 15 Parteaguas de la zona de Tlacolula oriente.....	56
Figura 16 Parteaguas de la cuenca zona poniente.....	56
Figura 17 Cuenca de Tlacolula y de San Luis del Río .....	58
Figura 18 Perfil longitudinal de la cuenca de Tlacolula.....	59
Figura 19 Longitud de la cuenca.....	59
Figura 20 Rectángulo equivalente de Tlacolula (1) y de san Luis del rio (2) .....	60
Figura 21 Perfil longitudinal de la cuenca de San Luis.....	61
Figura 22 Longitud de la cuenca (fuente propia).....	62
Figura 23 Curva hipsométrica cuenca de Tlacolula.....	63
Figura 24 Curva hipsométrica Cuenca de San Luis.....	64
Figura 25 Polígono de frecuencias de la cuenca de Tlacolula.....	65
Figura 26 Polígono de frecuencias de la cuenca de San Luis.....	66
Figura 27 Cuenca de Tlacolula y de San Luis .....	68
Figura 28 Ríos de la cuenca de Tlacolula.....	71
Figura 29 Ríos de la cuenca de San Luis.....	73
Figura 30 Gráfica de independencia estación 20165 (Tlacolula) .....	78
Figura 31 Gráfica Tlacolula (20165).....	80
Figura 32 Mapa de Isoyetas del período de T10.....	84
Figura 33 Mapa de Polígonos de Thiessen.....	85
Figura 34 Curvas-Intensidad-Duración-Período de retorno estimadas con la fórmula de Chen para la cuenca de Tlacolula .....	86

Figura 35 Curvas-Intensidad-Duración-Periodo de retorno estimadas con la fórmula de Chen para la cuenca de San Luis .....	88
Figura 36 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 5 años .....	89
Figura 37 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 5 años .....	90
Figura 38 Mapa de tipos de suelo .....	99
Figura 39 Mapa de uso de suelo .....	100
Figura 40 Caudales de diseño de la cuenca de Tlacolula .....	101
Figura 41 Caudales de diseño de la cuenca de San Luis .....	102
Figura 42 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un periodo Tr 5 años .....	105
Figura 43 Zona de inundación 1 .....	106
Figura 44 Zona de inundación 2 .....	107
Figura 45 Zona de inundación 3 .....	108
Figura 46 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un período Tr 10 años .....	109
Figura 47 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un período Tr 25 años .....	110
Figura 48 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un período Tr 50 años .....	111
Figura 49 Edificios e instituciones en riesgo por inundación para un Tr de 50 años .....	112
Figura 50 Sitios con posible riesgo de inundación para un Tr de 50 años .....	113
Figura 51 Gráfica de independencia Cuajimoloyas 20023 .....	120
Figura 52 Gráfica de independencia de Ayutla 20007 .....	121
Figura 53 Gráfica de independencia Totolapan 20170.....	122
Figura 54 Gráfica de independencia Villa de Hidalgo 20179.....	124
Figura 55 Grafica de independencia San jerónimo Taviche 20109 .....	125
Figura 56 Gráfica de independencia Boquilla Número Uno 20009 .....	126
Figura 57 Gráfica de independencia Zoquitlán 20191 .....	128
Figura 58 Gráfica de Independencia San Carlos Yautepec 20184 .....	129
Figura 59 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20007130	
Figura 60 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20009131	
Figura 61 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20023132	
Figura 62 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20109133	
Figura 63 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20170134	
Figura 64 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20179135	
Figura 65 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20184136	
Figura 66 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20191137	
Figura 67 Mapa de Isoyetas Tr25 años.....	138
Figura 68 Mapa de Isoyetas Tr50 años.....	139
Figura 69 Mapa de Isoyetas Tr100 años.....	140
Figura 70 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 10 años .....	141
Figura 71 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 10 años .....	142
Figura 72 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 25 años .....	143
Figura 73 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 25 años .....	144

Figura 74 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 50 años .....	145
Figura 75 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 50 años .....	146
Figura 76 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 100 años .....	147
Figura 77 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 100 años .....	148

# Índice de tablas

Tabla 1 Criterios de clasificación del tamaño de cuencas (Campos, 1984) .....	18
Tabla 2 Forma del coeficiente de compacidad .....	19
Tabla 3 Clasificación de los tipos de drenaje de acuerdo a su densidad Fuente INECC México .	26
Tabla 4 Datos diarios considerados para cada estación.....	29
Tabla 5 Serie de lluvia máxima en 24 horas de la estación de Tlacolula .....	30
Tabla 6 Parámetros de forma de la cuenca de Tlacolula .....	57
Tabla 7 Parámetros de forma de la cuenca de san Luis del Rio .....	61
Tabla 8 Parámetros de relieve de la cuenca Tlacolula .....	67
Tabla 9 Parámetros de relieve de la cuenca de San Luis.....	69
Tabla 10 Parámetros de red hidrográfica de Tlacolula.....	70
Tabla 11 Parámetros de red hidrográfica de San Luis.....	72
Tabla 12 Estaciones ocupadas .....	74
Tabla 13 Período de registro.....	75
Tabla 14 Lluvia máxima de cada estación (mm) .....	76
Tabla 15 Prueba de homogeneidad Estación 20165 (Tlacolula) .....	77
Tabla 16 Resumen de tablas de pruebas de homogeneidad e independencia .....	78
Tabla 17 Precipitaciones Tlacolula (20165) .....	81
Tabla 18 Error estándar de ajuste de las funciones .....	81
Tabla 19 Precipitaciones máximas 24 horas.....	82
Tabla 20 Precipitación promedio cuenca 1 (24 horas máxima).....	82
Tabla 21 Precipitación promedio cuenca 2 (24 horas máxima).....	82
Tabla 22 Parámetros de la fórmula de Chen para la cuenca de Tlacolula.....	87
Tabla 23 Parámetros de la cuenca de San Luis.....	88
Tabla 24 Datos de la curva número para la cuenca de Tlacolula.....	92
Tabla 25 Datos de la curva número para la cuenca de San Luis.....	96
Tabla 26 Altura de elevaciones de inundación para 5 Años .....	103
Tabla 27 Altura de elevaciones de inundación para 10 Años .....	104
Tabla 28 Altura de elevaciones de inundación para 25 Años .....	104
Tabla 29 Altura de elevaciones de inundación para 50 Años .....	104
Tabla 30 Pruebas de homogeneidad Cuajimoloyas 20023 .....	119
Tabla 31 Pruebas de independencia Ayutla 20007.....	120
Tabla 32 Pruebas de homogeneidad Totolapan 20170 .....	121
Tabla 33 Pruebas de homogeneidad villa de hidalgo 20179 .....	123
Tabla 34 Pruebas de homogeneidad San Jerónimo Taviche 20109 .....	124
Tabla 35 Pruebas de homogeneidad Boquilla Número Uno 20009 .....	125
Tabla 36 Pruebas de homogeneidad Zoquitlán 20191 .....	127
Tabla 37 Pruebas de independencia San Carlos Yautepec 20184.....	128

# Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Ancho promedio de la cuenca.....	18
Ecuación 2: Fórmula de coeficiente de compacidad.....	19
Ecuación 3: Fórmula de Factor de forma .....	20
Ecuación 4 Relación de elongación .....	20
Ecuación 5 Radio de circularidad .....	20
Ecuación 6 Rectángulo equivalente mayor y menor.....	21
Ecuación 7 Pendiente media de la cuenca.....	23
Ecuación 8 Coeficiente de masividad .....	23
Ecuación 9 Coeficiente de orografía.....	24
Ecuación 10 Coeficiente de torrencialidad.....	24
Ecuación 11 Pendiente del cauce principal .....	24
Ecuación 12 Densidad de drenaje .....	26
Ecuación 13 Densidad de frecuencia de ríos .....	26
Ecuación 14 Extensión media del escurrimiento superficial.....	27
Ecuación 15 Altura media del río principal .....	27
Ecuación 16 California Highways and Public Works .....	27
Ecuación 17 Kirpich ( $T_c$ ) .....	28
Ecuación 18 Témez.....	28
Ecuación 19 Giandotti.....	28
Ecuación 20 Fórmula del U.S. Corps of Engineers .....	28
Ecuación 21 Serie Helmert (homogeneidad).....	31
Ecuación 22 Serie t de Student (homogeneidad) .....	31
Ecuación 23 Ecuaciones de la serie Cramer (homogeneidad).....	32
Ecuación 24 Coeficiente de autocorrelación serial.....	33
Ecuación 25 límite de confianza.....	34
Ecuación 26 Distribución normal .....	35
Ecuación 27 Estimadores .....	35
Ecuación 28 Distribución Log Normal con dos parámetros .....	35
Ecuación 29 Estimadores .....	35
Ecuación 30 Distribución Log Normal con tres parámetros .....	35
Ecuación 31 estimador por momentos .....	36
Ecuación 32 Estimador por máxima verosimilitud.....	36
Ecuación 33 Distribución Gamma con dos parámetros .....	36
Ecuación 34 Estimador por momentos.....	36
Ecuación 35 Estimador por máxima verosimilitud.....	36
Ecuación 36 Distribución Gamma con tres parámetros .....	37
Ecuación 37 Estimador por momentos.....	37
Ecuación 38 Estimador por máxima verosimilitud.....	37

Ecuación 39 Distribución Log Pearson tipo III .....	37
Ecuación 40 Estimadores por momentos (método directo).....	38
Ecuación 41 Estimadores por momentos (método indirecto).....	38
Ecuación 42 Estimador por máxima verosimilitud.....	38
Ecuación 43 Distribución de valores extremos tipo I .....	38
Ecuación 44 Estimador por momentos.....	39
Ecuación 45 Estimador por máxima verosimilitud.....	39
Ecuación 46 Distribución GVE .....	39
Ecuación 47 Estimador por momentos.....	40
Ecuación 48 coeficiente de asimetría sesgado.....	40
Ecuación 49 Varianza sesgada .....	40
Ecuación 50 Media.....	40
Ecuación 51 Estimador por máxima verosimilitud (variable reducida).....	41
Ecuación 52 Momentos L.....	42
Ecuación 53 Distribución Gumbel Mixta.....	42
Ecuación 54 Estimador por máxima verosimilitud.....	42
Ecuación 55 Lluvia media (Thiessen).....	44
Ecuación 56 Precipitación media (Isoyetas).....	45
Ecuación 57 Precipitación SCT isoyetas.....	46
Ecuación 58 Cocientes lluvia-duración.....	46
Ecuación 59 Lluvia-frecuencia .....	46
Ecuación 60 Parámetros a, b, c. ....	47
Ecuación 61 Parámetro alfa ( $Tr$ ).....	47
Ecuación 62 Fórmula de Chen.....	47
Ecuación 63 Factor de reducción de área.....	48
Ecuación 64 Sumatoria de curvas número .....	50
Ecuación 65 Curva número .....	50
Ecuación 66 Tiempo de retraso.....	51

# RESUMEN

La caracterización hidrológica es fundamental para la creación de estrategias orientadas a la prevención de riesgos, la planificación territorial, la proyección de infraestructura hidráulica y la gestión de los recursos hídricos. El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar las cuencas que abarcan al municipio de Tlacolula, con el fin de que la información generada sea una herramienta para autoridades locales y organizaciones no gubernamentales cuenten con bases técnicas para la gestión de riesgos, así como la planificación territorial.

Para lograr el objetivo planteado, se procesaron los datos de lluvia registradas en las estaciones cercanas a Tlacolula, se llevó a cabo la caracterización hidrológica de las cuencas, se aplicó análisis de frecuencias a series de lluvia máxima para predecir eventos asociados a diferentes periodos de retorno, a partir de los cuales se construyeron Curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (I-D-T). Con estas, se obtuvieron tormentas e hidrogramas de diseño para los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años que sirvieron como información de entrada para la obtención de mapas de inundación en la zona centro del valle de Tlacolula. En estos mapas se identificaron que las zonas susceptibles a inundaciones son la zona centro de Tlacolula mencionando algunas calles de mayor afectación son Calle Moctezuma, Calle Bugambilias, Calle 2 de abril, Avenida ferrocarril, Calle Genaros, Calle Margaritas, Calle 8 de diciembre y Calle Aurora.

# INTRODUCCIÓN

La hidrología es una disciplina fundamental en la ingeniería civil, ya que proporciona las herramientas necesarias para comprender y gestionar los recursos hídricos. El agua es sin duda la sustancia más abundante en la tierra, es la fuente principal de todos los seres vivos y es una fuerza importante que en los últimos tiempos está cambiando la superficie de la tierra (Chow, 1994).

El agua es la sustancia que permite la vida y el recurso primordial de muchas actividades económicas y civiles; cuya forma en la naturaleza surge como escurrimiento en ríos y lluvia, no es ni remotamente constante, por ello las obras hidráulicas son indispensables para su aprovechamiento y brindar protección contra sus excesos (Campos, 2010); así como para diseñar infraestructuras resilientes ante eventos extremos. En particular, el estudio de los caudales máximos en una cuenca hidrográfica es esencial para la planificación urbana, la prevención de inundaciones y el diseño de obras hidráulicas eficientes y resilientes, tales como alcantarillas, puentes y presas. Se hace particularmente a partir de métodos de análisis de frecuencias, que radican en estudiar eventos pasados para estimar las probabilidades de ocurrencias futuras (Alvarez, Licon, & Martínez, 2007). La urbanización, es una consecuencia física del desarrollo y acelerado crecimiento poblacional, esto origina mayor escurrimiento de la lluvia, donde los gastos generados deben ser recolectados y transportados a través de los sistemas de drenaje inicial y mayor, respectivamente, para evitar inundaciones, daños a propiedades y suspensión de las actividades cotidianas (Campos, 2010).

Es también notorio que el municipio de Tlacolula de Matamoros presenta características geográficas y climáticas que lo hacen vulnerable a eventos hidrológicos extremos, como lluvias intensas y crecidas repentinas. Eventos reportados como *“La fuerte lluvia registrada este viernes en varias regiones de la entidad oaxaqueña, dejó inundaciones en calles de Tlacolula de Matamoros”* (RÍO, 2021) y *“Deja inundaciones en Tlacolula Onda Tropical número 31”* (MVM Noticias, 2023) hacen ver que es de suma importancia el análisis de los escurrimientos en esta población, debido a la probabilidad de inundación. Además, el agua es un recurso fundamental para el desarrollo del municipio, ya que sustenta actividades económicas, agrícolas, industriales y domésticas. Sin embargo, su gestión inadecuada puede generar problemas como escasez, contaminación o, por el contrario, excesos que derivan en inundaciones.

Estas anomalías pueden tener impactos importantes en la infraestructura, la economía y la seguridad de la población. Por ello es de vital importancia contar con estudios hidrológicos actualizados que permitan estimar los caudales máximos bajo diferentes escenarios, considerando diferentes periodos de retorno, para proporcionar información valiosa que contribuya a la toma de decisiones en materia de gestión hídrica y desarrollo sostenible. Por lo anterior el objetivo de esta tesis fue analizar la relación lluvia escurrimiento para la prevención de inundaciones en Tlacolula de Matamoros a partir de la caracterización hidrológica de cuencas y la generación de mapas de inundaciones. Se considera que este estudio ayudará a entender el comportamiento de los procesos hidrológicos de la zona y contribuirá en la creación de medidas de mitigación y adaptación ante posibles desastres naturales.

En el capítulo 1.0 se presentan la información necesaria en el contexto de la relación lluvia escurrimiento de la misma manera las definiciones claras sobre aspectos de la hidrología; posteriormente se describe la metodología en el capítulo 2.0 en que se basó esta información, donde se muestra la forma en que se emplearon las teorías y método para la caracterización del municipio. En el capítulo 3.0 se muestran los resultados obtenidos, así como de la explicación de los parámetros que se obtuvieron y en el capítulo 4.0 se dan las conclusiones basadas en la información que se obtuvieron de los resultados finales de las inundaciones y caudales para diferentes periodos de diseño.

Se emplearon métodos hidrológicos ampliamente reconocidos y también se hizo uso de software especializado; con el fin de proporcionar datos confiables que sirvan de base para el diseño de infraestructuras hidráulicas y la planificación territorial. Esta investigación, brinda herramientas prácticas para la gestión del riesgo y la planificación urbana en el municipio de Tlacolula de Matamoros los cual es de gran utilidad para ingenieros, planificadores y autoridades locales.

## OBJETIVO

Analizar la relación lluvia escurrimiento para la prevención de inundaciones en Tlacolula de Matamoros a partir de la caracterización hidrológica de cuencas y la generación de mapas de inundaciones.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Delimitar las cuencas que abarcan el municipio de Tlacolula y cuantificar los parámetros fisiográficos y geomorfológicos.
- Recopilar información climatológica y geográfica de la zona de estudio.
- Obtener las series de lluvia acumulada y lluvia máxima en 24 horas.
- Realizar el análisis de frecuencias de lluvias máximas.
- Construir las curvas intensidad-duración-periodo de retorno.
- Elaborar tormentas de diseño e hidrogramas de diseño asociados distintos periodos de retorno
- Generar mapas de inundación en la zona metropolitana del municipio de Tlacolula de Matamoros.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de Tlacolula de Matamoros los eventos de lluvias intensas se han elevado en frecuencia y magnitud debido al cambio climático, provocando inundaciones periódicas que afectan a la población, la infraestructura y las actividades económicas. Sin embargo, también enfrenta periodos de escasez de agua, lo que refleja una gestión ineficiente del recurso hídrico. Actualmente, no se cuenta con estudios actualizados que concierne a las lluvias máximas en 24 horas con los escurrimientos máximos calculados para los diferentes periodos de retorno. Esta falta de información limita la capacidad para diseñar obras hidráulicas adecuadas, planificar el desarrollo urbano y gestionar los riesgos de inundaciones y sequías. Por ello, es necesario establecer los caudales máximos asociados a lluvias extremas, utilizando métodos hidrológicos confiables, que permitan tomar decisiones informadas para garantizar la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible del municipio.

## JUSTIFICACIÓN

El estudio del escurrimiento máximo es primordial para la prevención de desastres naturales, como inundaciones. En el actual contexto donde el cambio climático ha incrementado la frecuencia e intensidad de eventos hidrológicos extremos, contar con datos precisos sobre los caudales máximos permite diseñar infraestructuras hidráulicas resilientes, como alcantarillas, puentes, sistemas de drenaje y sistemas de captación de agua de lluvia, que protejan a la población y sus bienes, así como las actividades de importancia en los aspectos agrícolas y turísticos.

Además, este análisis es esencial para la planificación urbana y territorial, ya que proporciona información valiosa para la toma de decisiones en materia de desarrollo sostenible. Conocer el escurrimiento máximo en diferentes periodos de retorno ayuda a prever escenarios futuros y a implementar medidas de mitigación y adaptación ante posibles riesgos.

## 1.0 MARCO TEÓRICO

### El ciclo del agua

El ciclo del agua es fundamental para la vida en la tierra ya que los seres vivos dependen de ella para subsistir, además los patrones de circulación del agua y la precipitación afectan los ecosistemas y el adecuado uso y gestión del agua. El agua es la sustancia más predominante en la tierra, es el principal integrante de todos los seres vivos y es una fuerza trascendental que constantemente está cambiando la superficie de la tierra. La hidrología cubre todas las fases del agua en la tierra, es una materia de gran importancia para el ser humano y el medio ambiente (Chow, 1994).

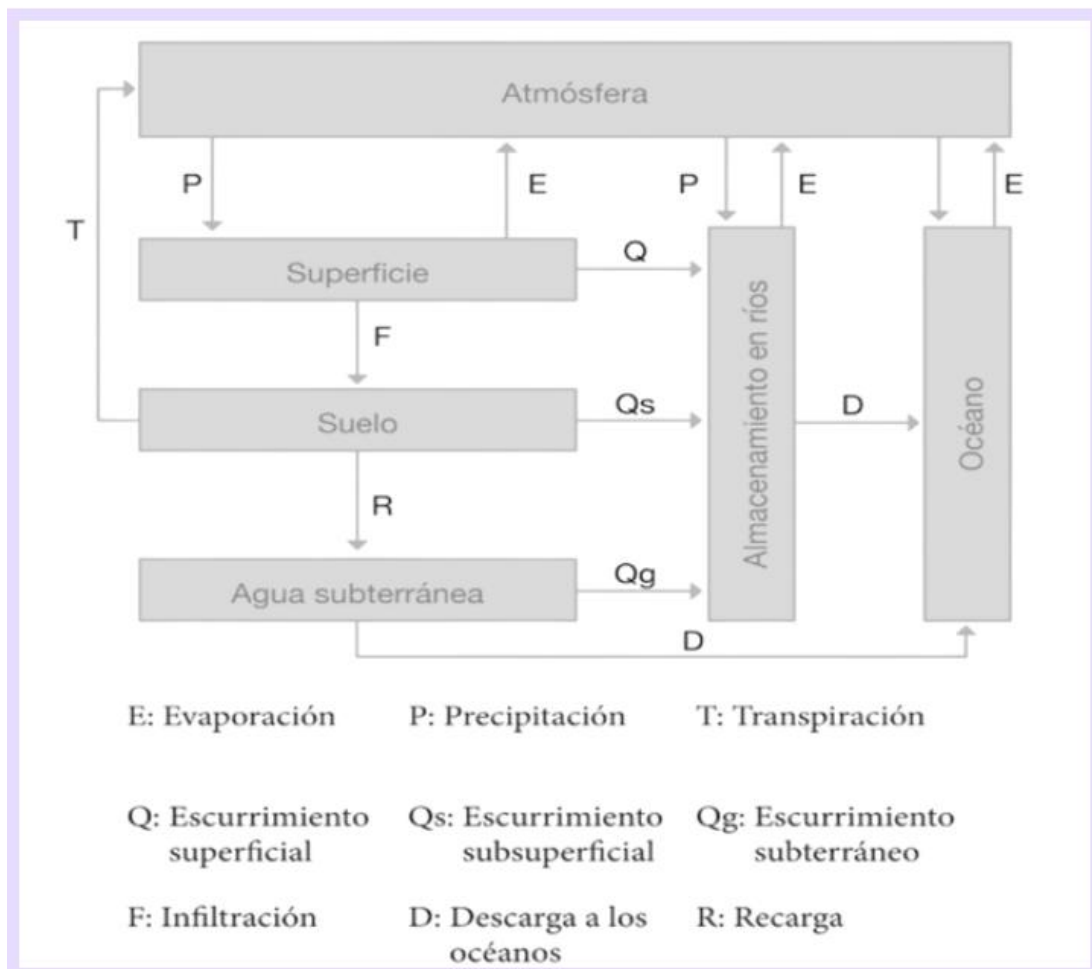


Figura 1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un modelo conceptual sobre el almacenamiento y circulación del agua entre la atmósfera, litósfera e hidrósfera. El agua se almacena en los océanos, lagos, atmósfera, ríos, suelos, glaciares, nevados y acuíferos. La circulación entre estos depósitos o almacenamientos se produce por procesos como: evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración, percolación y escurrimiento, los cuales son denominados componentes del ciclo hidrológico (Campos, 2010).

### Hidrología

Como menciona (Campos, 2010). “la hidrología es la ciencia que rige y enfoca el agotamiento y recuperación de los recursos hídricos, en las áreas continentales de la Tierra y en las diversas fases del ciclo hidrológico”.

### Diseño hidrológico

El diseño hidrológico radica en la estimación de ciertas variables como lluvias, escurrimientos o crecientes, que son necesarias para el dimensionamiento (redimensionamiento) de diversas obras hidráulicas y/o el estudio de ciertas medidas no estructurales, como son la demarcación de planicies de inundación, la zonificación de áreas con riesgo, el pronóstico de niveles o gastos a tiempo real (Campos, 2010).

### Relación lluvia escurrimiento

Los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación, a los cuales se conoce como modelación lluvia-escurrimiento. Las características de la cuenca se conocen por medio de planos topográficos y de uso de suelo, y la precipitación a través de mediciones directas en el caso de predicción de avenidas frecuentes (Aparicio, 1989)

Los siguientes factores están relacionados con la modelación del proceso lluvia-escurrimiento.

### La precipitación

Es la caída de agua que ocurre como lluvia, granizo o nieve y está sujeta a las pérdidas hidrológicas que incluyen: intercepción, almacenamiento en depresiones y evapotranspiración. Una de esta

parte de infiltra en el terreno favoreciendo a la humedad del suelo y a la recarga de las aguas subterráneas, otra fracción se convierte en escurrimiento superficial y es conducida por los sistemas de drenaje artificial y natural a las afueras del área urbana, a cauces o cuerpos de agua receptores (Campos, 2010).

### Precipitación efectiva

Es la altura de lluvia en exceso que también es llamada lluvia neta o lluvia excedentaria que es la porción de la precipitación total que llega a la salida de la cuenca como escurrimiento superficial directo. (Campos, 1984).

### El escurrimiento

Se define como el agua derivada de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para posteriormente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1989). El escurrimiento superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar), la forma más común de representar el escurrimiento es a través del hidrograma, que es una representación gráfica de la Figura 2 que se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo que pasa de manera continua durante todo un año por una determinada sección transversal de un río.

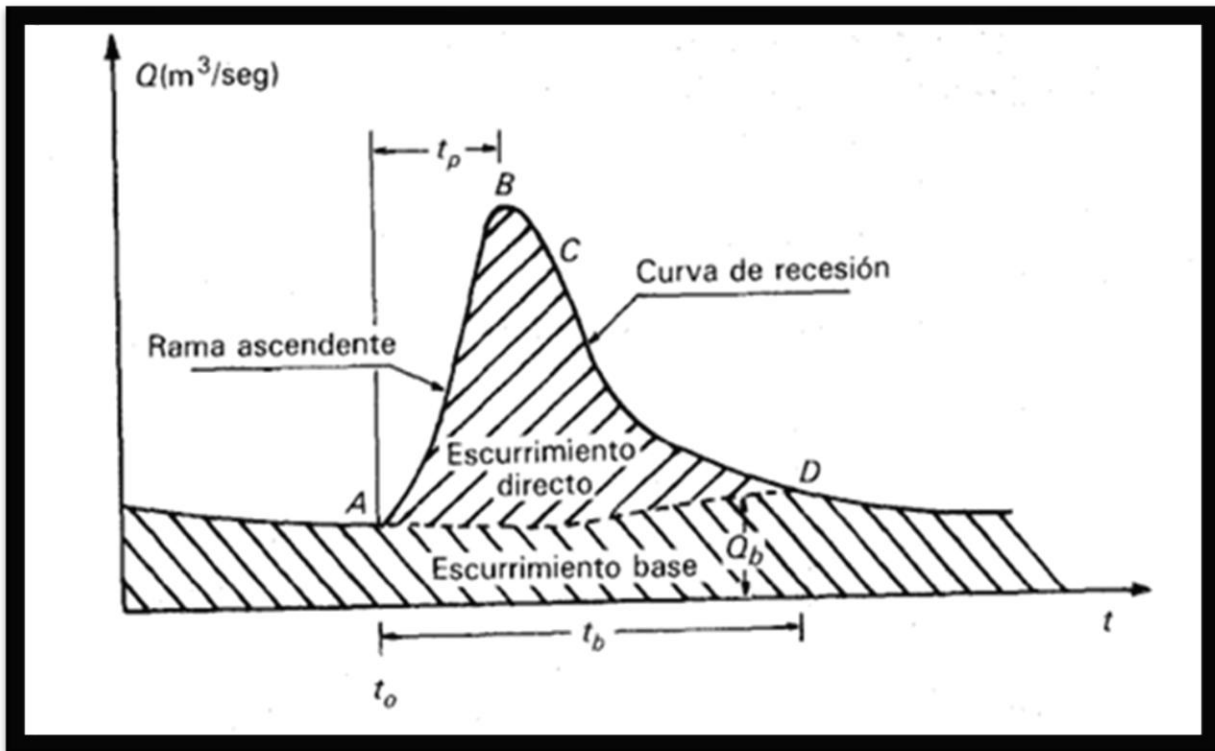


Figura 2 Hidrograma de diseño (Aparicio, 1989)

Sus componentes principales son:

A: Punto de levantamiento. En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover, dependiendo de varios factores, entre los que se pueden mencionar el tamaño de la cuenca, su sistema de drenaje y suelo, la intensidad y duración de la lluvia, etc.

B: Pico. Es el gasto máximo que se produce por la tormenta.

C: Punto de inflexión. En este punto es aproximadamente cuando termina el flujo sobre el terreno, y, de aquí en adelante, lo que queda de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.

D: Final del escurrimiento directo. De este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue de fácil manera

*T<sub>p</sub>*: (tiempo de pico) es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma

*T<sub>b</sub>*: (tiempo base) es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es, entonces, el tiempo que dura el escurrimiento directo.

Rama ascendente es la parte del hidrograma que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.

Rama descendente o curva de recesión es la parte del hidrograma que va desde el pico hasta el final del escurrimiento directo. Tomada a partir del punto de inflexión en forma de curva.

## Cuenca Hidrográfica

La cuenca es una porción de terreno a la superficie terrestre en donde (si esta fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. (Aparicio, 1989). Esta zona está delimitada por una línea imaginaria, el parteaguas que se extiende por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas (Aparicio, 1989).

Desde el punto de vista de la salida de la cuenca, existen principalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas, la primera mencionada, el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca lo que ordinariamente es un lago, así la segunda mencionada, el punto de salida está dentro de los límites de la salida, se encuentran en los límites de la cuenca y está hacia otra corriente o en el mar (Aparicio, 1989).

## Geomorfología

La geomorfología es la rama de la geografía-física que estudia de forma explicativa y descriptiva el relieve de la tierra cuyo resultado es el balance dinámico en el que evoluciona con el paso del tiempo por procesos constructivos del ser humano y naturales.

La morfología de una cuenca está definida por su forma; sobre el estudio de cuencas se establecen parámetros de forma, relieve y de la red hidrográfica, usualmente, todas estas características juegan un papel fundamental en la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica (Hídricos, 2010).

### Parámetros de forma

El contorno de una cuenca define y caracteriza la forma y superficie de la misma, la cual tiene influencia en el tiempo de respuesta del caudal a evacuar durante o después de una tormenta en la cuenca, si la cuenca es muy alargada prolonga el tiempo de concentración del caudal y viceversa si es más corta tiende a tener un tiempo menor de concentración por esto es de suma importancia obtener estos parámetros de la cuenca en función de su morfología.

### Parámetros de relieve

El relieve de la cuenca tiene influencia en la escorrentía, un ejemplo claro es que una cuenca con pendientes muy pronunciadas corresponda a un tiempo de concentración menor de las aguas hacia a la red de drenaje y ríos del cauce principal, y viceversa una pendiente menor tendrá un tiempo de concentración mayor en la respuesta de escurrimiento hacia la cuenca.

### Parámetros de red hidrográfica

Se denomina red de drenaje en una cuenca a un sistema de cauces en el que fluyen los escurrimientos superficiales, subterráneos y subsuperficiales de manera temporal o permanente (Campos, 1984). Estos parámetros están relacionados con las condiciones física y geológicas del sitio en toda la superficie de la cuenca.

Entre las principales características de la red de drenaje son las siguientes: tipo de corrientes, el orden de las corrientes, densidad de drenaje y la frecuencia de las corrientes.

### Pruebas de homogeneidad e independencia

En hidrología, las pruebas de homogeneidad e independencia son decisivos para asegurar la eficacia y fiabilidad de los datos hidrológicos utilizados en análisis y modelado. La homogeneidad verifica que los datos procedan de una distribución estadística sólida a lo largo del tiempo, de igual forma la prueba de independencia asegura que las observaciones no estén correlacionadas entre sí. Estas pruebas permiten asemejar y corregir posibles problemas de datos, como cambios en los materiales de medición, errores en la compilación de datos o influencia de factores externos que perturben la serie temporal.

### Pruebas de homogeneidad

Las características estadísticas de las series hidrológicas básicas son: media, desviación estándar y los coeficientes de correlación, las cuales son afectadas cuando una serie presenta tendencia en la media o en la varianza o también cuando ocurren saltos negativos o positivos; dichas anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad y la inconsistencia. (Escalante & Reyes, 2002).

Prácticamente, la falta de homogeneidad de los datos es afectada por actividades humanas como cambio de uso de suelo, deforestación, apertura de camino y de áreas de cultivo, la construcción de embalses y reforestación. De igual forma es producto de los procesos naturales súbitos como ejemplo son incendios forestales, terremotos, deslizamiento de laderas y erupciones volcánicas y actualmente del cambio climático. (Escalante & Reyes, 2002).

### Análisis de frecuencias

El análisis de frecuencias se utiliza para evaluar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, como lluvias intensas o crecidas de ríos (inundaciones). Este análisis puede ser estacionario o no estacionario, y la diferencia clave entre ambos tiene que ver con si las características estadísticas del fenómeno cambian o no a lo largo del tiempo.

### Precipitación Promedio

La precipitación promedio es fundamental para el análisis de intensidades de una cuenca y cómo estas influyen en el escurrimiento e inundaciones. Para el estudio existen métodos altamente utilizados en el área de la hidrología ejemplo método aritmético, Thiessen e Isoyetas; en este estudio se hizo el análisis por medio de los últimos dos métodos Thiessen e Isoyetas. Para aplicar dicha información en aplicaciones ingenieriles (pronósticos, balances hídricos, extrapolación de variables, proceso lluvia-escurrimiento, diseño de obras hidráulicas, etc.), usualmente se necesita obtener un valor medio que sea representativo de la zona de estudio (cuencas o subcuencas hidrológicas) (Hernandez, 2019),

## Curvas intensidad-Duración-periodo de retorno

El cambio actual del clima, implica tener que hacer estudios confiables y eficientes para la estimación de intensidades por ello la aplicación de métodos o estimaciones de las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno I-D-T también conocidas como Intensidad-duración-Frecuencia representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la cuenca (Campos, 2010).

Intensidad es la cantidad de lluvia que cae en una fracción de tiempo determinado usualmente se mide en mm/h.

La duración es el tiempo que dura la intensidad de la lluvia y se mide en minutos (5,10,30,60).

El periodo de retorno o la frecuencia es la probabilidad de ocurrencia de que ese suceso ocurra en un determinado tiempo y se mide en años. (entre mayor es el año mayor es la intensidad de la lluvia).

Toda esta información sirve para el diseño de obras hidráulicas, algún estudio de inundaciones y la planificación de recursos hídricos.

De manera general el diseño hidrológico consiste en la estimación de ciertas variables como lluvias, escurrimientos o crecientes, que son necesarias para el dimensionamiento de diversas obras hidráulicas y/o el estudio de ciertas medidas no estructurales, como son la demarcación de planicies de inundación, la zonificación de áreas con riesgo, el pronóstico de niveles o gastos a tiempo real, etc. (Campos, 2010). Por ello es necesario elaborar y estimar cómo se comporta la precipitación en eventos extremos.

La tormenta de diseño (hietograma de diseño) es el evento incierto que está en función de las curvas I-D-T, es una forma de suponer que la lluvia más intensa que se prevé ocurra en un lugar específica durante un período de tiempo determinado, son el punto de partida de las estimaciones hidrológicas de crecientes, con el fin que las estructuras hidráulicas puedan ser seguras para la comunidad (Campos, 2010).

## 2.0 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente estudio se realizaron las actividades de gabinete y de campo descritas en los siguientes apartados.

### Descripción general del área de estudio

Su nombre correcto es Tlacolullan, que significa: “entre lo muy lleno de varas o entre el varejonal”. Se acomoda de Tlacoltl, “vara”, Lotl, “desinencia” que dice a lo que se une algo, y Lan, variante de Tlan, sufijo que denota exuberancia (INEGI, 2020).

La zona de Tlacolula de Matamoros se sitúa en la Región de los Valles Centrales, a una distancia de 38 kilómetros (40 min aprox.) de la ciudad de Oaxaca, corresponde al Distrito de Tlacolula. Se ubica en las coordenadas geográficas 16° 57' de latitud norte y 96° 28' de longitud oeste, a una altitud media de 1,600 metros sobre el nivel del mar. (INEGI, 2020).

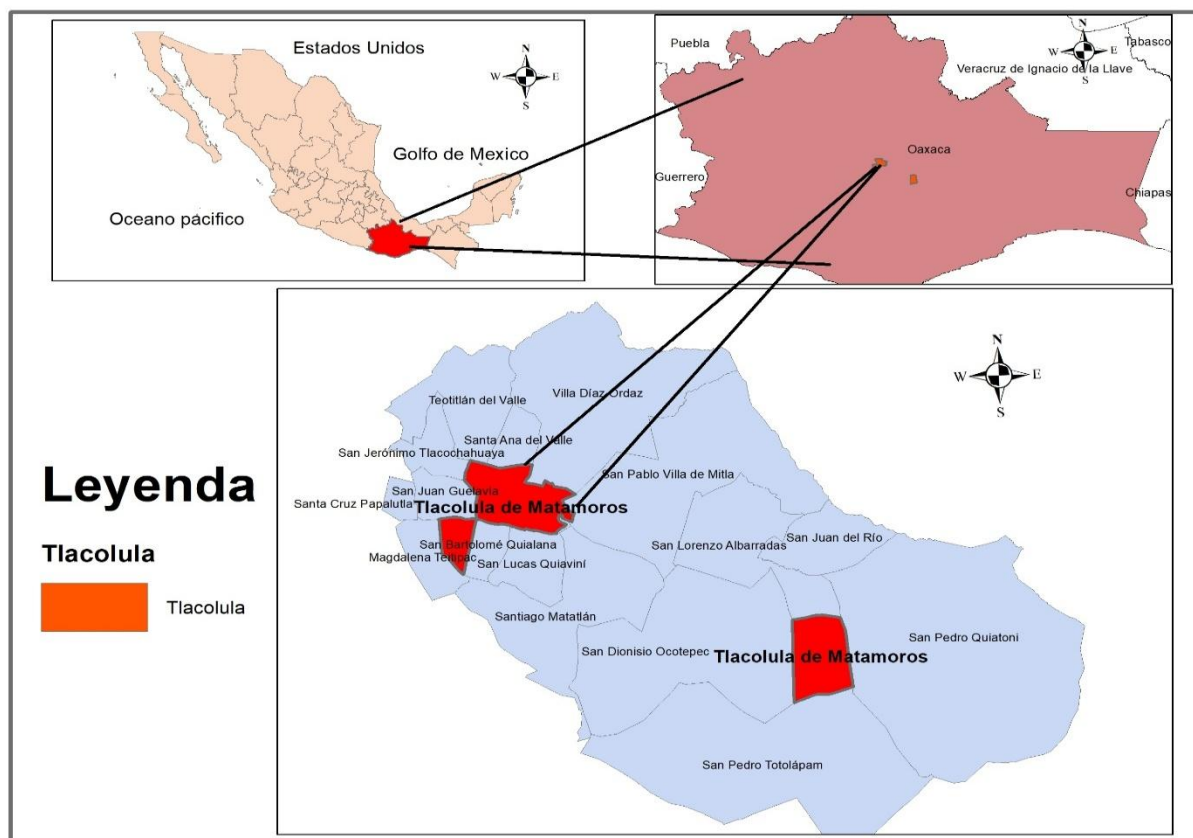


Figura 3 Ubicación del municipio de Tlacolula de Matamoros

La extensión total del municipio es de 244.96 km<sup>2</sup>, lo que representa el 0.26% del total del territorio del estado.

Colinda al norte con los municipios de, Santa Ana del Valle, Villa Díaz Ordaz, y San Pablo Villa de Mitla; al sur con San Bartolomé Quialana, Magdalena Teitipac, San Lucas Quiavini, Santiago Matatlán y San Dionisio Ocotepac; al oeste con Santa Cruz Papalutla, San Juan Guelavía, y Magdalena Teitipac; y al este con San Pedro Quiatoni y San Lorenzo Albarradas (INEGI 2020)

Orográficamente la región está conformada básicamente por pequeñas planicies que llegan hasta lomeríos y parte de serranía.

Su superficie es regada por diversos afluentes entre los que el principal afluente del sitio es el río salado.

El clima es templado, con verano cálido y lluvias tanto en verano como en otoño. (INEGI, 2004)

La flora y fauna se componen de vegetación que muestra una asociación de pastizal con plantas semidesérticas y un chaparral bajo, en cual prevalece el mezquite, el guaje y el cazahuate.

La fauna silvestre en su totalidad la constituyen el conejo, el cacomixtle, el tlacuache, la comadreja, la liebre, la tuza, la paloma, el gavián y rara vez es vista un águila.

El suelo pertenece a la clasificación del cambisol cálcico un suelo moderadamente desarrollado y el uso de suelo la mayor parte es de uso agrícola.

La población total de Tlacolula de Matamoros en 2020 fue 30,254 habitantes, siendo 52.5% mujeres y 47.5% hombres INEGI (2020).

Los rangos de edad que concentran mayor población fueron 35 a 39 años (2,754 habitantes), 5 a 9 años (2,709 habitantes) y 0 a 4 años (2,691 habitantes). Entre ellos concentran el 27% de la población total. (INEGI, 2020).

## Caracterización hidrológica de Tlacolula de Matamoros

El municipio de Tlacolula de Matamoros corresponde a la Región Hidrológica 20 (RH20). Su red hídrica está conformada por el Río Tlacolula (conocido localmente como río Seco) el cual es tributario del río Salado, cuenta con otros cauces efímeros de respuesta torrencial. La precipitación media anual en la zona es de 550 mm (CONAGUA, 2023) concentrada entre junio y septiembre, en donde tormentas convectivas superan 120 mm/24h (Gobierno Municipal de Tlacolula de Matamoros, 2010). El municipio pertenece a la cuenca el río Atoyac -Salado. hidrológicamente, el valle pertenece a la subregión hidrológica “Río Verde”, siendo los ríos Verde y Atoyac los escurrimientos superficiales de mayor importancia hidrológicamente. (Chaves y Binnqüist, 2013).

Desde el punto de vista subterráneo, la zona pertenece al acuífero Valles Centrales que se localiza en la región hidrológica 20, en la subregión 20B. Costa Chica – Río Verde, Cuenca del Río Atoyac y sus límites laterales coinciden con el parte aguas de la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez, siendo su principal corriente superficial el Río Atoyac. (CONAGUA, 2024).

Con respecto a la disponibilidad de agua subterránea; el acuífero de Valles Centrales está integrado por un sistema de cuatro microcuencas ubicadas en Coyotepec, Tlacolula, Oaxaca y Ocotlán, parte de la cuenca del río Atoyac. De acuerdo con los datos del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Valles Centrales de Oaxaca (Cotas), de este acuífero se extraen 193.1 Hm<sup>3</sup>/año para atender las demandas de agua de los servicios públicos urbanos, agrícola, industrial y de servicios. En la zona se han perforado gran número de norias para el desarrollo de los campos agrícolas o bien, para uso doméstico y pecuario, la dirección regional del flujo del agua subterránea en el valle es en sentido este- oeste, a la altura de la ciudad de Oaxaca de Juárez se incorpora al flujo subterráneo proveniente del Valle de Etna y cambia de dirección hacia el sur para incorporarse al Valle de Zimatlán. (INEGI, 2004)

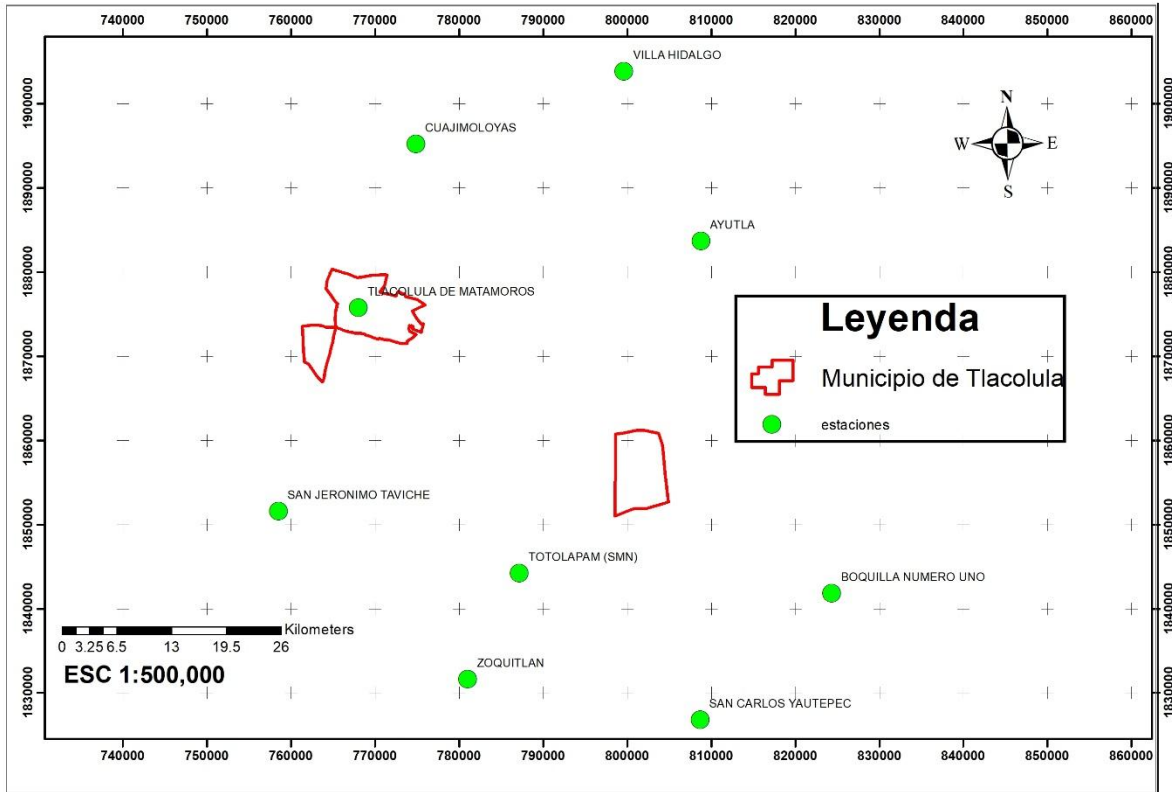
Las pendientes pronunciadas (15-45% en la Sierra Madre del Sur) y suelos Leptosoles de baja infiltración (INEGI, 2020) generan altos coeficientes de escorrentía (Curva número “CN” en promedio igual a 80, método de la curva número por el servicio de conservación de suelo). Esto explica inundaciones históricas en el centro urbano de Tlacolula, donde confluyen tres barrancas (Atlas de riesgos, 2022). La cuenca tiene un tiempo de concentración estimado de 5-6 horas clave para modelar hidrogramas.

## 2.1 Recopilación de información de estaciones climatológicas

Por medio del programa SIATL (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas), de la página web del INEGI se analizaron las cuencas que abarcan al territorio del municipio de Tlacolula. Se recopilaron datos de 24 estaciones aledañas a la zona de interés, pero se seleccionaron 9 de estas, las cuales cumplieron con los siguientes criterios:

- 1.- Que las estaciones tengan un periodo de información mínimo de 20 años de acuerdo a las sugerencias realizadas por la (CONAGUA, 2015).
- 2.- Que las estaciones tengan una información subsecuente es decir que los periodos no estén interrumpidos en años y se obtenga una secuencia de datos.
- 3.- Que la información sea lo más actualizada para que refleje los cambios en su comportamiento en años recientes debido al cambio climático.
- 4.- Que las estaciones estén lo más cerca posible del área de interés.

En la Figura 4 se muestra la distribución de las estaciones seleccionadas, las cuales en su mayoría tuvieron 20 años de registro; 4 de las estaciones tienen escasez de 3 años máximo de información, pero fueron útiles para el estudio.



*Figura 4 Distribución espacial de las estaciones climatológicas utilizadas en el estudio de la zona de Tlacolula de Matamoros.*

## 2.2 Recopilación de información geográfica

Se recopilaron y analizaron datos geográficos editados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), que incluyen modelos digitales de elevación (MDE) con resolución de 5m y 30m, a escala 1:50000 y 1:10000, Se obtuvieron cartografía topográfica, redes hidrográficas, y capas temáticas concernientes con relieve y usos de suelo (INEGI). los mapas que pertenecen a la zona de estudio, así como información de la página oficial del SIALT (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas) la cual es una aplicación geoespacial desarrollada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) que se ocupó para ver la regionalización de la zona, así como el área, flujo y topografía de la cuenca de Tlacolula.

### 2.3 Caracterización geomorfológica de cuencas.

Para la zona de estudio, se trazaron dos cuencas que abarcan al municipio de Tlacolula, para las cuales mediante las herramientas de QGIS, se obtuvieron los siguientes parámetros geomorfológicos.

#### 2.3.1 Parámetros de forma de la cuenca

Se obtuvieron los siguientes factores de forma:

Área de la cuenca: es el área en donde se drena un sistema de escorrentía directa o indirectamente hacia un cauce principal; la superficie es considerada como el parámetro físico básico que define una cuenca. Las cuencas obtenidas se clasificaron en función del área que abarca siguiendo los criterios de la Tabla 1 (Campos, 1984).

*Tabla 1 Criterios de clasificación del tamaño de cuencas (Campos, 1984)*

Tamaño de la cuenca Km <sup>2</sup>	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia- Pequeña
500 a 2500	Intermedia- Grande
2500 a 5000	Grande
>5000	Muy grande

Perímetro: según (Llamas, 1989) “es la longitud de su límite exterior, su magnitud depende de la superficie y de la forma de la cuenca”.

La longitud del río principal es el mayor recorrido de una gota de agua que se realiza en el río desde el punto más alto del cauce principal hasta la salida de la cuenca.

El ancho medio de la cuenca es el cociente entre la superficie de la cuenca y la longitud media de la cuenca y este se obtuvo con la siguiente ecuación:

*Ecuación 1 Ancho promedio de la cuenca*

$$A_{prom} = \frac{A_C}{L_{c\_rio}}$$

donde  $A_c$  es la superficie de la cuenca y  $L_c$  es la longitud del río principal.

La forma de una cuenca es la configuración geométrica tal como está proyectada sobre un plano horizontal. Esta afecta directamente en el tiempo de respuesta, esto significa que el tiempo de recorrido de las aguas a través de la red de drenaje y, por consiguiente, el tipo de los hidrogramas (Llamas, 1989).

Longitud de la cuenca ( $L_c$ ) se define según Schumm como “la distancia medida desde la salida de la cuenca en línea recta del cauce principal” (Gómez, 2020).

El coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) encontrado por Gravelius, es la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie de la cuenca (Llamas, 1989); tal como se define en la ecuación 2:

*Ecuación 2 Fórmula de coeficiente de compacidad*

$$K_c = \frac{P}{2\pi * \sqrt{A/\pi}} = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

donde  $P$  y  $A$  son el perímetro y el área de la cuenca respectivamente.

El coeficiente de compacidad tendrá como límite inferior la unidad, indicando entonces que la cuenca es circular y conforme a su valor crece indicará una mayor distorsión en su forma, esto quiere decir que se vuelve alargada o asimétrica Tabla 2 (Campos, 1984).

*Tabla 2 Forma del coeficiente de compacidad*

Rango	Forma
1.00-1.25	Redonda a oval redonda (compacta)
1.25-1.50	Oval redonda a oval oblonga
1.50-1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
>1.75	Casi rectangular (alargada)

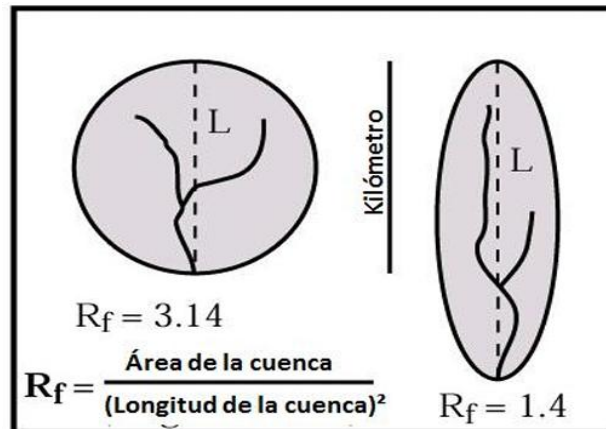
Factor de forma ( $R_f$ ) de la cuenca definido por Horton como un parámetro en el que el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima, en donde influye en el comportamiento del escurrimiento de la cuenca (Llamas, 1989). Como se define en la Ecuación 3:

*Ecuación 3 Fórmula de Factor de forma*

$$Rf = \frac{A_c}{L_c}$$

donde  $A_c$  es el área de la cuenca medida en kilómetros (km) o en metros (m) y  $L_c$  es la longitud de la cuenca medida igualmente en Km o en m.

Un factor pequeño (menor a 0.22) esto indica una cuenca muy alargada, mientras que un valor mayor a 1.5 indica que la cuenca es ancha tendiendo a una forma de círculo.



*Figura 5 Relación del factor de forma de una cuenca (Gómez, 2020)*

Radio de elongación ( $R_e$ ) se define según Schumm, como la relación que hay entre el diámetro de un círculo que tenga la misma superficie que la cuenca y su longitud máxima en la cuenca. Este coeficiente varía entre 1 para cuencas llanas y 0.6 para las cuencas que tengan un relieve marcado (Llamas, 1989); tal y como se muestra en la ecuación:

*Ecuación 4 Relación de elongación*

$$R_e = 1.128 * \frac{\sqrt{A_c}}{L_c}$$

donde  $A_c$  es el área de la cuenca y  $L_c$  es la longitud de la cuenca

Radio de circularidad ( $R_{ci}$ ) se define como el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es el perímetro de la cuenca (Llamas, 1989), tal y como se muestra en la ecuación:

*Ecuación 5 Radio de circularidad*

$$R_{ci} = \frac{4\pi * A_c}{P_c^2},$$

Donde  $A_c$  es el área de la cuenca y  $P_c$  el perímetro; en donde si el valor es 1, para una cuenca circular, y 0.785, para una cuenca cuadrada.

Rectángulo equivalente sirve para poder comparar fácilmente a las cuencas hidrográficas, desde el punto de vista en que la influencia de sus características afecta en el escurrimiento... El rectángulo equivalente es lógicamente una transformación prácticamente geométrica de la cuenca en un rectángulo de igual perímetro convirtiendo las curvas de nivel en rectas paralelas al lado menor, siendo estas la primera y la última curva de nivel. (Campos, 1984).

La fórmula para obtener el rectángulo equivalente se define como:

*Ecuación 6 Rectángulo equivalente mayor y menor*

$$L_1, L_2 = \frac{K_c * \sqrt{A_c}}{1.12} * \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c}\right)^2} \right],$$

donde  $K_c$  es el coeficiente de compacidad y  $A_c$  es el área de la cuenca;  $K_c \geq 1.12$

$$P = \frac{K_c * \sqrt{A_c}}{0.28},$$

$$L_2 * L_1 = A_c,$$

$L_1$  y  $L_2$  son las longitudes del rectángulo menor y mayor respectivamente y  $p$  el perímetro de la cuenca.

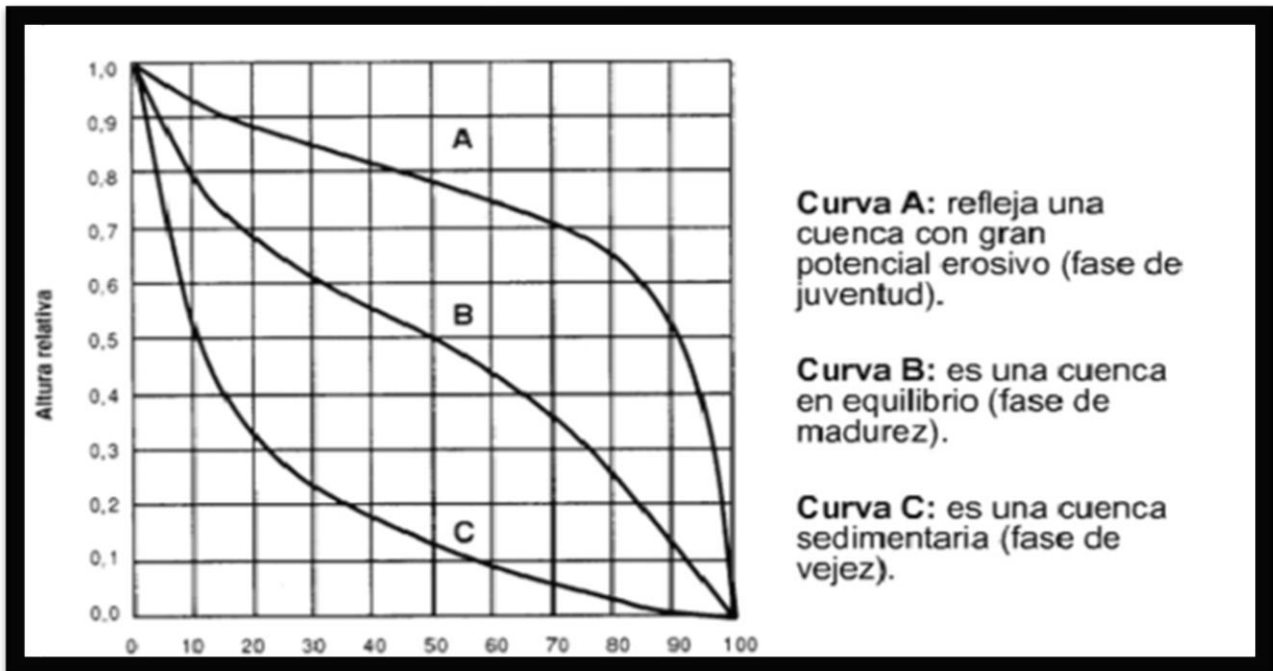
### 2.3.2 Parámetros de relieve de la cuenca

Para describir estos parámetros de la cuenca se ha parametrizado con métodos ampliamente conocidos en la hidrología e igualmente el uso de Software especializado QGIS y sus herramientas y aplicaciones como complementos, dado que esto proporciona versatilidad en su estimación.

En los parámetros se consideran los siguientes:

La curva hipsométrica (curva área-elevación) es el carácter más representativo en el que se presenta más preciso su elevación de la cuenca. Esta curva expresa el porcentaje de superficie de la cuenca más allá de una cierta elevación (Llamas, 1989).

Según Stahler citado por (Llamas, 1989), la curva hipsométrica es un reflejo del estado de equilibrio dinámico potencial de una cuenca.



*Figura 6 Características de Curva hipsométrica (Aparicio, 1989).*

La curva área-elevación se obtuvo mediante el software QGIS; en donde los parámetros fueron obtener la elevación máxima y mínimas, sus respectivas áreas en cada curva de nivel o elevaciones (máxima-mínima), progresivamente estos datos se metieron en una hoja de cálculo para obtener el porcentaje del área total y el porcentaje sobre el límite inferior en cada curva de nivel.

Polígono de frecuencias se le denomina así a la representación gráfica de la correlación existente entre altitud y la relación porcentual del área a esa altitud con respecto al área total. En el polígono de frecuencias existen valores representativos como: la altitud más frecuente, que es el polígono de mayor porcentaje o frecuencia (Hídricos, 2010).

Centro de gravedad que se define como las coordenadas geográficas de la cuenca que nos indica el centro de la cuenca, así como su respectiva elevación; esto se hizo por medio del programa

(QGIS 3.28.0) obtenido del modelo de elevación digital de la cuenca por medio de un archivo BIL escala 1:50000 editada por el INEGI.

La altura media de la cuenca tiene gran atribución en el régimen hidrológico, así como la altura máxima y mínima; ya que estos factores influyen sobre las precipitaciones que nutren el ciclo hidrológico de la cuenca, particularmente se encuentra gran correlación de estos parámetros en la influencia de la cuenca y su tiempo de respuesta.

Para obtener la altura media de la cuenca (elevación media de la cuenca) se ocuparon los datos de la curva hipsométrica, lo cual equivale a la cota correspondiente al 50% del área de la cuenca (Campos, 1984). En este caso se hizo una línea de tendencia en Excel para así obtener la altura media de la cuenca sustituyendo el valor de X (50%) de la cuenca, para así obtener la altitud media de la cuenca.

La pendiente media de la cuenca ( $S_m$ ) esta tiene influencia en el escurrimiento de la cuenca como en la velocidad en que una gota de agua escurre alrededor de la cuenca, y se define como el cociente entre el desnivel entre la cota más alta de la cuenca menos la cota menor de la cuenca medida entre la longitud de la cuenca, tal y como se muestra en la ecuación número 7:

*Ecuación 7 Pendiente media de la cuenca*

$$S_m = \frac{H}{L_m},$$

donde H es la diferencia entre la cota mayor menos la cota menor media en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y  $L_m$  es la longitud del lado mayor del rectángulo equivalente.

El coeficiente de masividad ( $C_m$ ) es la relación que existe entre el cociente de la elevación media de la cuenca y la superficie de la cuenca.

*Ecuación 8 Coeficiente de masividad*

$$C_m = \frac{E}{A_c},$$

donde  $E$  es la extensión media del escurrimiento superficial (km) y  $A_c$  es el área de la cuenca ( $km^2$ ).

Coefficiente de orografía ( $C_o$ ) es el producto entre la elevación media de la cuenca y el coeficiente de masividad ( $C_m$ ), este valor permite establecer el relieve en distintos puntos de la cuenca.

*Ecuación 9 Coeficiente de orografía*

$$C_o = C_m * E,$$

en donde  $C_m$  es el coeficiente de masividad y  $E$  es la elevación media del escurrimiento superficial.

Coefficiente de torrencialidad ( $C_t$ ), este parámetro indica la relación entre el número de ríos de la cuenca del primer orden entre el área superficial de la cuenca.

*Ecuación 10 Coeficiente de torrencialidad*

$$C_t = \frac{N_o Rios_1}{A_c},$$

donde  $N_o$  ríos son el total de número de la cuenca con el orden de clasificación 1 y  $A_c$  es el área de la cuenca.

La pendiente media del cauce principal es de los factores principales para caracterizar hidrológicamente la cuenca ya que esta está en función del escurrimiento máximo de la cuenca como su tiempo de concentración de ella.

*Ecuación 11 Pendiente del cauce principal*

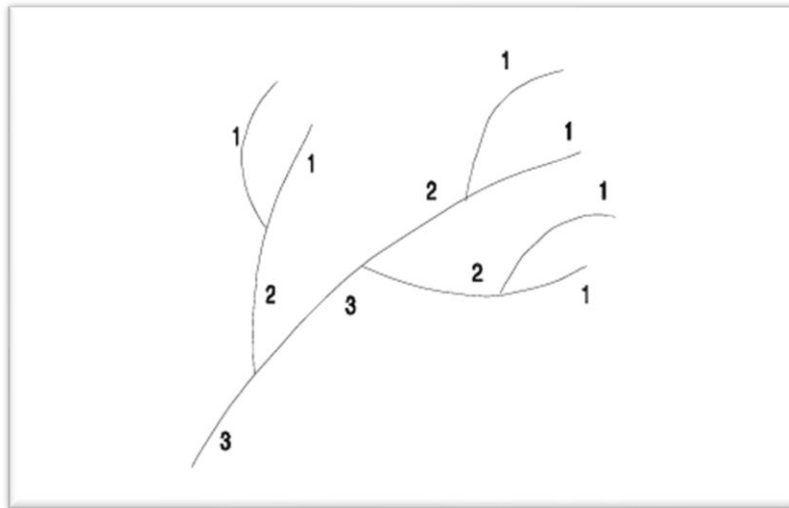
$$S_m = \frac{A_{max} - A_{min}}{Lc_{principal}},$$

Donde  $A_{max}$  es la altura máxima del cauce principal en metros sobre el nivel del mar (*m. s. n. m*) y  $A_{min}$  es la altitud mínima del cauce principal en *m.s.n.m.* y  $Lc$  es la longitud total del cauce principal (*Km*).

La longitud del cauce principal con respecto al centro de gravedad (*l<sub>cg</sub>*) sirve para estimar el tiempo de concentración a su vez este para obtener los caudales máximos de diseño.

### 2.3.3 Parámetros de la red hidrográfica

La red de drenaje se obtuvo mediante el software QGIS 3.28.0, el proceso es continuo primeramente se necesita obtener el DEM en el que pertenece la superficie de la cuenca sucesivamente obtener la red de drenaje conforme al software que se utilizó, en donde se clasificó la red de drenaje en 4 partes hasta llegar al río principal. Un ejemplo se observa en la Figura 7.



*Figura 7 Red de orden de una cuenca (drenaje)*

Para analizar la red hidrográfica superficial de una cuenca, en este apartado se obtendrán los parámetros de relieve como se muestra a continuación:

Una manera para clasificar el tipo de corriente es tomar en base a la constancia del escurrimiento o del flujo, la cual está relacionado con las características físicas y climáticas de la cuenca. Los tipos de corriente en una cuenca es la siguiente:

Ríos perennes: son ríos que contienen agua todo el año exclusive durante las sequías extremas.

Ríos intermitentes: son ríos que contienen agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en época de lluvia.

Ríos efimeros: son ríos que conducen agua, sólo cuando llueve o inmediatamente después de estas.

El orden de las corrientes es una clasificación en donde se observa el grado de ramificaciones o bifurcación dentro de una cuenca, R.H. Horton clasificó el orden de los ríos estableciendo el orden 1 como la más pequeñas, esto significa, aquellas que no están ramificadas; el orden 2 a las

corrientes que solo tiene ramificaciones o tributarios de primer orden; de orden 3 son aquellas con dos o más tributarios de orden 2 o menor y así sucesivamente hasta tener un orden mayor o final. (Campos, 1984). Entonces el orden de las corrientes principales serán un indicador de la magnitud de las ramificaciones y la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca; esto se clasificó en 4to orden de drenaje.

Densidad de drenaje ( $D_d$ ) se define como la longitud total de los cauces dentro de una cuenca dividida entre el área total de drenaje  $A_c$ , que es el área de la superficie de la cuenca y su ecuación matemática se muestra en la siguiente fórmula:

*Ecuación 12 Densidad de drenaje*

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A_c},$$

donde  $\Sigma L$  es toda la suma de los cauces que influyen en el área de la cuenca y  $A_c$  es el área de la cuenca. El resultado de esta ecuación permite clasificar de acuerdo (Aparicio, 1989)

Los tipos de drenaje se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3 Clasificación de los tipos de drenaje de acuerdo a su densidad Fuente INECC México*

Rangos de Dd	Tipos de drenaje
0.1-1.8	Baja
1.9-3.6	Moderada
3.7-5.6	Alta

Frecuencia de densidad de los ríos ( $Fr$ ) es el cociente del número total de ramificaciones (ríos) con respecto a la superficie de la cuenca.

*Ecuación 13 Densidad de frecuencia de ríos*

$$Fr = \frac{N_{ríos}}{A_c},$$

donde  $N_{ríos}$  es la suma total de los ríos que inciden en la cuenca y  $A_c$  es la superficie total de la cuenca ( $km^2$ ).

La extensión media del escurrimiento superficial ( $E$ ) es la relación que existe entre la superficie de la cuenca y la longitud total de la red hídrica de la cuenca. También se puede definir como la distancia promedio en línea recta que el agua precipitada tendría que recorrer para llegar al lecho de un curso de agua (Hídricos, 2010).

*Ecuación 14 Extensión media del escurrimiento superficial*

$$E = \frac{A_c}{L_t},$$

donde  $A_c$  es el área total de la cuenca y  $L_t$  es la longitud total de los ríos de la cuenca.

La altura media del río principal ( $H_{med}$ ) es el promedio de la altura máxima y la altura mínima del cauce principal, medida en metros sobre el nivel del mar (*m. s. n. m.*).

Estos parámetros se obtienen por medio del DEM, en forma de pixel ubicando en el inicio y final del cauce principal.

*Ecuación 15 Altura media del río principal*

$$H = \frac{H_{max} + H_{min}}{2},$$

donde  $H_{max}$  es la altura máxima y  $H_{min}$  es la altura mínima del cauce principal.

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda el escurrimiento de una tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más distante hasta la salida de la cuenca o sitio del proyecto, o bien el lapso que transcurrió desde el final de la tormenta hasta el término de su hidrograma de escurrimiento superficial (Campos, 2010).

Se hizo el cálculo del tiempo de concentración con los parámetros obtenidos, donde las fórmulas que se ocuparon fueron las siguientes, haciendo un “promedio” de todos los resultados que se obtuvieron de cada una de ellas.

*Ecuación 16 California Highways and Public Works*

$$T_c = \left[ \frac{0.8708 * L_c^3}{H} \right]^{0.385},$$

donde  $L_c$  es la longitud total del cauce principal en  $Km$  y  $H(m)$  es la diferencia entre la cota máxima y mínima del cauce principal en  $Km$ .

*Ecuación 17 Kirpich ( $T_c$ )*

$$T_c = 0.0663 * \left[ \frac{L_c}{\sqrt{H/L_c}} \right]^{0.77},$$

el valor entre paréntesis debe ser menor de 305, o bien el  $T_c < 5 h$ .

*Ecuación 18 Témez*

$$T_c = 0.30 * \left[ \frac{L_c}{(H/L_c)^{0.25}} \right]^{0.76},$$

*Ecuación 19 Giandotti*

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A_c} + 1.5 * L_c}{0.80 * \sqrt{H}},$$

el resultado de esta fórmula debe estar entre  $0.185xL_c$  y  $0.280xL_c$ .

*Ecuación 20 Fórmula del U.S. Corps of Engineers*

$$T_c = 0.2733 * \left( \frac{L_c * L_{cg}}{\sqrt{S}} \right),$$

en la cual  $L_{cg}$  es la distancia en  $km$  sobre el colector principal desde la salida de la cuenca hasta el punto más cercano al centro de gravedad de ésta y  $S$  es el pendiente promedio adimensional.

## 2.5 Series de lluvia máxima anual en 24 horas

De las series de lluvias de las estaciones que se involucran en la cuenca, se hizo el análisis por medio de una rutina programada en una hoja de cálculo, con datos mínimo de 20 años de información, en los años que se obtuvieron los datos fueron del periodo que comprende de 1961-1985 (25 años de información) en las que las variables que se solicitaba en el proceso fueron las mencionadas a continuación:

1. Datos de series diarias de precipitación (en mm) de las estaciones climatológicas.
2. Días
3. Mes
4. Años

En la Tabla 4, se muestra un ejemplo de cómo se ordenaron los datos de la lluvia diaria en cada año.

*Tabla 4 Datos diarios considerados para cada estación*

día/mes/año	Información			
	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Temperatura máxima	Temperatura mínima
01/01/1961	0	-9999	22	11
02/01/1961	0	-9999	20	12
03/01/1961	9	-9999	15	10
04/01/1961	4	-9999	13	11
05/01/1961	0	-9999	16	11
06/01/1961	0	-9999	18	7
07/01/1961	0	-9999	21	7
08/01/1961	2.7	-9999	14	10
09/01/1961	0	-9999	-9999	-9999
10/01/1961	0	-9999	13	6
11/01/1961	0	-9999	19	6
12/01/1961	0	-9999	15	7
13/01/1961	0	-9999	21	8
14/01/1961	0.5	-9999	23	8
15/01/1961	0.4	-9999	17	11
16/01/1961	0.5	-9999	11	10
....	...n	...	...	...n
31/12/1985	25	-9999	17	15

A partir de los datos diarios de lluvia se obtuvieron los valores máximos de esta variable para cada año, los cuales conformaron a las series de lluvia máxima en 24 horas de las estaciones analizadas, como se muestra en la Tabla 5.

*Tabla 5 Serie de lluvia máxima en 24 horas de la estación de Tlacolula*

Estación 20165	
Año	Precipitación (mm)
1961	36
1962	81
1963	48
1964	46.5
1965	34
1966	52
1967	42
1968	55
1969	40
1970	40
1971	41
1972	57
1973	47
1974	44
1975	62
1976	37.5
1977	34.5
1978	68
1979	54
1980	35
1981	38
1982	42
1983	-
1984	-
1985	-

## 2.6 Homogeneidad e independencia de las series

### 2.6.1 Prueba de homogeneidad

Las pruebas de estadística que miden la homogeneidad de una serie de datos presentan una hipótesis nula y una regla para poder aceptarla o rechazarla; se muestran las pruebas de homogeneidad que se ocuparon:

- A. Prueba estadística de helmert
- B. Prueba estadística t de student
- C. Prueba estadística de cramer

La prueba estadística de Helmert es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1,2,3,\dots,n_j$ , con respecto a su valor medio  $\bar{Q}^j$ . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario se considera como un cambio C (Escalante & Reyes, 2002).

La serie se considera homogénea si se cumple con la siguiente expresión

*Ecuación 21 Serie Helmert (homogeneidad)*

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1},$$

La prueba estadística de t de Student ocurre cuando el origen probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil. Si se considera una serie  $Q_i^j$  para  $i=1,2,3,\dots,n_j$ , de él se divide en dos conjuntos de tamaño  $n_1 = n_j/2$ , entonces el estadístico de prueba se define con la expresión siguiente.

*Ecuación 22 Serie t de Student (homogeneidad)*

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \left( \frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) * \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}},$$

donde  $\bar{x}_1, s_1^2$  son la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño  $n_1$ .

Donde  $\bar{x}_2, s_2^2$  son la media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño  $n_2$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución t de student de dos colas, y con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ .

Si y solo si el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por ende la serie  $Q_i^2$  se considera no homogénea (Escalante & Reyes, 2002).

La prueba estadística de Cramer se utiliza con la intención de verificar homogeneidad en el registro  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1,2,3,\dots,n_j$ , y también para establecer si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero, del tamaño total de la muestra  $n_j$ ; el segundo tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ); y el tercero de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ).

La prueba compara el valor de  $\bar{Q}_j$  del registro total con cada una de las medidas de los bloques elegidos  $\bar{Q}_{60}^j$  y  $\bar{Q}_{30}^j$ . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medidas de los bloques. (Escalante & Reyes, 2002).

*Ecuación 23 Ecuaciones de la serie Cramer (homogeneidad)*

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}, \text{ para una sola muestra analizada } j = 1$$

$$S_Q^j = \left[ \frac{1}{n_j - 1} * \sum_{j=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}}$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}}$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j}$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j}$$

$$t_w = \left[ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + (\tau_w^i)^2]} \right]^{1/2} * |\tau_w^j| \text{ para } w = 60 \text{ y } w = 30,$$

el estadístico  $t_w$  tiene distribución t de Student de dos colas con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ .

Si y sólo si el valor absoluto de  $t_w$ , para  $w=60$  y  $w=30$ , es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medidas, es evidencia de inconsistencia y por consecuente la serie  $Q_i^j$  se considera no homogénea.

En el estudio se integró información de los datos máximos de lluvia (mm) de cada año de las estaciones que se ocuparon, los datos fueron número de datos de lluvias (n) y sus respectivos datos de lluvia; de los datos n se obtuvieron la media y las desviaciones de la muestra para verificar si cumplió con la prueba y sus respectivas fórmulas descritas en los incisos A, B y C de este apartado.

### 2.6.2 Prueba de independencia

A. Prueba de independencia de eventos (Anderson), para que se logre llevar a cabo el análisis de frecuencias se necesita que la muestra  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1,2,3,\dots,n_j$ , está compuesto por variables aleatorias. Para experimentar se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes periodos de retraso  $k$ . Si se observa un solo registro, entonces  $j=1$  (Escalante & Reyes, 2002).

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  se muestra en la siguiente Ecuación 24.

*Ecuación 24 Coeficiente de autocorrelación serial*

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2} \text{ para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1,2,3, \dots, \frac{n_j}{3},$$

$$\text{donde } \bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}$$

Además, los límites el 95% de confianza para  $r_k^j$  se puede obtener de la siguiente expresión:

*Ecuación 25 límite de confianza*

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k}$$

La gráfica de los valores considerados para  $r_k^j$  (ordenadas) contra los tiempos de retraso  $k$  (abscisas), junto con sus convenientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra.

Si y solo el 10% de los valores  $r_k^j$  sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie  $Q_i^j$  es independiente y por ende es una variable que sigue las leyes de probabilidad.

## 2.7 Análisis de frecuencias

En este trabajo solo se hizo el análisis de forma estacionario ya que en las pruebas de homogeneidad e independencia se determinó que no hay cambio de los datos de lluvia máxima de cada estación (cumplen con las condiciones estadísticas para proseguir con el análisis de frecuencias).

En esta etapa se hizo la aplicación de diferentes distribuciones de probabilidad a las series anuales de lluvia máxima en 24 horas en donde se identificó cuál función tiene un menor error de ajuste (EE) del 10% de cada estación, así como cuál de todas las funciones de distribución es más factible utilizar en las estaciones, como cuál se ajusta mejor y tiene un menor error de ajuste, los datos de precipitación se revisaron para asegurar su consistencia y calidad.

Las funciones densidad de probabilidad que se ocuparon en este estudio se describen a continuación:

A. Distribución Normal

*Ecuación 26 Distribución normal*

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

donde  $\mu$  es el parámetro de ubicación y  $\sigma$  parámetros de escala.

Estimadores por momentos y máxima verosimilitud

*Ecuación 27 Estimadores*

$$\hat{\mu} = \bar{x} \quad ; \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1},$$

B. Distribución Log Normal con dos parámetros

*Ecuación 28 Distribución Log Normal con dos parámetros*

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}, \quad x > 0,$$

donde  $\mu_y$  parámetros de ubicación y  $\sigma_y$  parámetros de escala  $\gamma >$

Estimadores por momentos y máxima verosimilitud

*Ecuación 29 Estimadores*

$$\hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad ; \quad \hat{\sigma}_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \hat{\mu}_y)^2}{n}$$

C. Distribución Log Normal con tres parámetros

*Ecuación 30 Distribución Log Normal con tres parámetros*

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left[\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}; \quad x > x_0,$$

donde  $x_0$  parámetros de ubicación,  $\mu_y$  parámetro de escala y  $\sigma_y$  parámetro de forma.

Estimadores por momentos y por máxima verosimilitud

*Ecuación 31 estimador por momentos*

$$\hat{x}_0 = \bar{x} \left( 1 - \frac{\hat{\eta}_x}{\hat{\eta}_z} \right),$$

donde  $\hat{\eta}_x = \frac{s}{x}$ ; y  $\hat{\eta}_z = \frac{1-w^{2/3}}{w^{1/3}}$

Además

$$w = \frac{(g^2+4)^{1/2}-g}{2}; \quad \hat{\mu}_y = \ln\left(\frac{s}{\hat{\eta}_z}\right) - \frac{1}{2} \ln(\hat{\eta}_z^2 + 1); \quad \hat{\sigma}_y = [\ln(\hat{\eta}_z^2 + 1)]^{(1/2)}$$

*Ecuación 32 Estimador por máxima verosimilitud*

$$\hat{\mu}_y = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i - \hat{x}_0)}{n}; \quad \hat{\sigma}_y^2 = \sum_{i=1}^n [\ln(x_i - x_0) - \hat{\mu}_y]^2 / n$$

D. Distribución Gamma con dos parámetros

*Ecuación 33 Distribución Gamma con dos parámetros*

$$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)}; \quad 0 \leq x < \infty; \text{ y si } \alpha > 0 \rightarrow \gamma > 0; \gamma > 0,$$

donde  $\alpha$  es el parámetro de escala,  $\beta$  parámetro de forma y  $\Gamma(\beta)$  función Gamma completa

Además  $\mu = \beta\alpha$ ;  $\sigma^2 = \alpha^2\beta$ ;  $\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$

*Ecuación 34 Estimador por momentos*

$$\hat{\alpha} = \frac{s^2}{x}; \quad \hat{\beta} = \left(\frac{x}{s}\right)^2$$

*Ecuación 35 Estimador por máxima verosimilitud*

$$\hat{\alpha} = \frac{x}{\hat{\beta}}$$

Utilizando como valor inicial del parámetro  $\hat{\beta}$

$$\hat{\beta} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3}C}}{4C}; \quad C = \ln(X) - Y$$

E. Distribución Gamma con tres parámetros

*Ecuación 36 Distribución Gamma con tres parámetros*

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)}; \quad \alpha > 0; x_0 \leq x < \infty; \gamma > 0,$$

donde  $x_0$  es el parámetro de ubicación,  $\alpha$  parámetro de escala,  $\beta$  parámetro de forma.

Además  $\mu = x_0 + \alpha\beta$ ;  $\sigma^2 = \alpha^2\beta$ ;  $\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$ ;  $\kappa = 3\left(1 + \frac{\gamma^2}{2}\right)$

*Ecuación 37 Estimador por momentos*

$$\hat{\beta} = \frac{4}{g^2}; \quad \hat{\alpha} = \frac{S}{\sqrt{\hat{\beta}}}; \quad \hat{x}_0 = \bar{x} - S\sqrt{\beta}$$

*Ecuación 38 Estimador por máxima verosimilitud*

$$\hat{\beta} = \frac{1}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0) \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)}\right]}{n^2}}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0) - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)}\right]}$$

F. Distribución Log Pearson tipo III

*Ecuación 39 Distribución Log Pearson tipo III*

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)x} \left(\frac{\ln x - y_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{\ln x - y_0}{\alpha}\right)}; \quad 0 < x < \infty; \gamma > 0,$$

donde  $y_0$  parámetro de ubicación,  $\alpha$  parámetro de escala,  $\beta$  parámetro de forma.

*Ecuación 40 Estimadores por momentos (método directo)*

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{A+3}; \mu_r = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^r}{n} \quad r = 1,2,3; \quad B = \frac{\ln(\hat{\mu}_3) - 3\ln(\hat{\mu}_1)}{\ln(\hat{\mu}_2) - 2\ln(\hat{\mu}_1)}; \quad C = \frac{1}{B-3}$$

Si  $3.5 < B \leq 6$

$$A = -0.23019 + 1.65262C + 0.20911C^2 - 0.04557C^3$$

Si  $3.5 < B \leq 3.5$

$$A = -0.45157 + 1.99955C$$

$$\hat{\beta} = \frac{\ln(\hat{\mu}_2) - 2\ln(\hat{\mu}_1)}{\ln(1 - \hat{\alpha})^2 - \ln(1 - 2\hat{\alpha})}; \quad \hat{y}_0 = \ln(\hat{\mu}_1) + \hat{\beta} \ln(1 - \hat{\alpha})$$

*Ecuación 41 Estimadores por momentos (método indirecto)*

$$\hat{\beta} = \frac{2}{g_y^2}; \quad \hat{\alpha} = \frac{S_y}{\sqrt{\hat{\beta}}}; \quad \hat{y}_0 = y - S_y \sqrt{\hat{\beta}},$$

donde  $y, S_y, g_y$  son los estadísticos de la serie  $y_i = \ln(x_i)$

*Ecuación 42 Estimador por máxima verosimilitud*

$$\hat{\beta} = \frac{1}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \hat{y}_0] \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\ln(x_i) - \hat{y}_0} \right]}{n^2}}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \hat{y}_0] - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\ln(x_i) - \hat{y}_0} \right]}$$

G. Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel)

*Ecuación 43 Distribución de valores extremos tipo I*

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} - e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)}} \text{ la variable reducida Gumbel } y_i = \frac{x_i - v}{\alpha}$$

Donde  $v$  parámetros de ubicación y  $\alpha$  parámetro de escala

$$E = \hat{v} + 0.577\hat{\alpha}; \sigma^2 = \frac{\pi^2 \hat{\alpha}^2}{6}; \gamma = 1.1296; \kappa = 5.4002$$

*Ecuación 44 Estimador por momentos*

$$\hat{v} = \bar{x} - 0.45S; \hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78S$$

Tomando en cuenta la variable reducida se tiene el siguiente proceso iterativo

*Ecuación 45 Estimador por máxima verosimilitud*

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i}; R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{y_i}$$

El criterio de convergencia es  $\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0; y \frac{-R}{\alpha} \approx 0$

Incrementos de  $\delta_{vi} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_j}{n}; y \delta_{ai} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_j}{n}$

Nuevos valores de  $\hat{v}_{j+1} = \hat{v}_j + \hat{\delta}_{vj}; \hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \hat{\delta}_{\alpha j}$

H. Distribución general de valores extremos (GVE)

*Ecuación 46 Distribución GVE*

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \left(1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right)^{\frac{1}{\beta}-1} \text{ la variable reducida(GVE) es:}$$

$$y = -\ln\left(1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)\beta\right)^{1/\beta}$$

Si  $\beta = 0 \quad \infty < x < \infty$ , entonces la distribución es tipo I (Gumbel);

Si  $\beta < 0$   $v + \frac{\alpha}{\beta} \leq x < \infty$ , entonces la distribución es tipo I (Frechet);

Si  $\beta > 0$   $-\infty < x \leq +\frac{\alpha}{\beta}$ , entonces la distribución es tipo I (Frechet);

donde  $v$  parámetro de ubicación,  $\alpha$  parámetro de escala,  $\alpha > 0$ , y  $\beta$  parámetro de forma

*Ecuación 47 Estimador por momentos*

Para  $-11.35 < g < 1.1396$

Donde  $g$  se describe en la siguiente ecuación:

*Ecuación 48 coeficiente de asimetría sesgado*

$$g_{sesg} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (x_i - \bar{x})^3}{(S_{sesg}^2)^{\frac{3}{2}}}$$

*Ecuación 49 Varianza sesgada*

$$S_{sesg}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 (x_i - \bar{x})^2$$

*Ecuación 50 Media*

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 x_i$$

$$\hat{\beta} = 0.279434 - 0.333535g + 0.048306g^2 + 0.023314g^3 - 0.00376g^4 - 0.000263g^5$$

Para  $1.14 < g < 18.95$

$$\hat{\beta} = 0.25031 - 0.29219g + 0.075357g^2 + 0.010883g^3 - 0.000904g^4 - 0.000043g^5$$

$$\hat{A} = \mu_x + \hat{B}E[y] = \bar{x} + \hat{B}E[y]; \quad \hat{B} = \left[ \frac{Var(x)}{Var(y)} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad Var(x) = \sigma_x^2 = S_x^2$$

$$E[y] = \Gamma(1 + \hat{\beta}); \quad var(y) = \Gamma(1 + 2\hat{\beta}) + \Gamma^2(1 + \hat{\beta})$$

Para  $\hat{\beta} < 0$   $\hat{\alpha} = -\hat{\beta}\hat{B}$  y  $\hat{v} = \hat{A} + \hat{B}$

Para  $\hat{\beta} > 0$   $\hat{\alpha} = \hat{\beta}\hat{B}$  y  $\hat{v} = \hat{A} - \hat{B}$

Para  $\hat{\beta} = 0$   $\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}S = 0.78S$  y  $\hat{v} = x - 0.45S$

*Ecuación 51 Estimador por máxima verosimilitud (variable reducida)*

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i}; \quad Q = \sum_{i=1}^n e^{-y_i + (\beta-1)y_i} - (1-\beta) \sum_{i=1}^n e^{\beta y_i}; \quad R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i}$$

El criterio de convergencia es:

$$\frac{Q}{\hat{\alpha}} \approx 0; \quad \frac{1}{\hat{\alpha}} \left( \frac{P+Q}{\hat{\beta}} \right) \approx 0; \quad \frac{1}{\hat{\beta}} \left( R \left( \frac{P+Q}{\hat{\beta}} \right) \right) \approx 0$$

Incrementos:

$$\begin{aligned} \delta_{\hat{v}i} &= -\frac{\hat{\alpha}_j}{n} \left\{ bQ_j + \frac{h(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} + \frac{f}{\hat{B}_j} \left[ R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} \right] \right\} \\ \delta_{\hat{\alpha}i} &= -\frac{\hat{\alpha}_j}{n} \left\{ hQ_j + a \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} + \frac{gs}{\hat{B}_j} \left[ R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} \right] \right\} \\ \delta_{\hat{\beta}i} &= -\frac{\hat{\alpha}_j}{n} \left\{ fQ_j + gs \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} + \frac{c}{\hat{B}_j} \left[ R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} \right] \right\}, \end{aligned}$$

donde  $a, b, c, f, gs$  y  $h$  son los elementos de la matriz de varianza-covarianza de los parámetros de la distribución GVE  $-1.5 < \hat{\beta} < 1.0$

$$a = 0.661437 - 0.562798\hat{\beta} + 0.985803\hat{\beta}^2 - 0.059011\hat{\beta}^3$$

$$b = 1.235356 - 0.162161\hat{\beta} - 0.115137\hat{\beta}^2 + 0.009577\hat{\beta}^3$$

$$c = 0.4711 - 0.077627\hat{\beta} + 0.295825\hat{\beta}^2 - 0.009645\hat{\beta}^3$$

$$f = 0.244435 - 0.10287\hat{\beta} - 0.19583\hat{\beta}^2 - 0.075004\hat{\beta}^3$$

$$gs = 0.15373 - 0.411923\hat{\beta} - 0.479209\hat{\beta}^2 - 0.075004\hat{\beta}^3$$

$$h = 0.338937 - 1.209555\hat{\beta} - 0.109822\hat{\beta}^2 - 0.019801\hat{\beta}^3$$

Nuevos valores

$$\hat{v}_{j+1} = \hat{v}_j + \delta_{vi}; \quad \hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \delta_{ai}; \quad \hat{\beta}_{j+1} = \hat{\beta}_j + \delta_{\beta i}$$

Estimadores por momentos L

*Ecuación 52 Momentos L*

$$\hat{M}_{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \hat{M}_{(1)} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n x_i(n-i)$$

$$\hat{M}_{(2)} = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n x_i(n-i)(n-i-1)$$

$$E = \left\{ \frac{2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)}}{3\hat{M}_{(2)} - \hat{M}_{(0)}} \right\} \left[ \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \right], \quad \beta = 7.859E + 2.9554E^2, A = \Gamma(1 + \beta), B = 1 - 2^{-\beta}$$

$$C = \frac{2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)}}{\beta}, D = \frac{A-1}{\beta}, \quad \hat{\alpha} = \frac{C}{AB}, \quad v = \hat{M}_{(0)} + D\hat{\alpha}, \quad \hat{M}_{(r)}, r = 0,1,2,3$$

I. Distribución Gumbel Mixta

*Ecuación 53 Distribución Gumbel Mixta*

$$f(x) = pe^{e^{-\left(\frac{x-v_1}{\alpha_1}\right)}} e^{-\left(\frac{x-v_1}{\alpha_1}\right)} + (1-p)e^{e^{-\left(\frac{x-v_2}{\alpha_2}\right)}} e^{-\left(\frac{x-v_2}{\alpha_2}\right)}$$

$$x > 0 \quad \alpha_i > 0, \quad 0 < p < 1,$$

donde  $v_1$  parámetro de ubicación de la primera población,  $\alpha_1$  parámetro de escala de la primera ubicación,  $v_2$  parámetro de ubicación de la segunda población,  $\alpha_1$  parámetro de escala de la segunda ubicación y  $p$  parámetro de asociación.

Los parámetros se calculan por la maximización de la función logarítmica de verosimilitud.

*Ecuación 54 Estimador por máxima verosimilitud*

$$\ln \prod_{i=1}^n f(x_i; v_1; \alpha_1; v_2; \alpha_2; p)$$

Una vez seleccionado el mejor modelo de ajuste para cada estación se obtuvieron los parámetros de lluvia máxima en 24 horas, y se utilizaron las lluvias para los años que se estudiaron (5,10,25,50 y 100 años) para hacer el proceso de lluvia promedio mediante método de isoyetas y Thiessen que se muestran en la siguiente sección.

### 2.8 Precipitación promedio de las cuencas

Se analizó la información obtenida de parte del análisis de frecuencias para así obtener la lluvia promedio máxima en 24 horas, para los periodos de retorno de 5,10,25,50 y 100 años de las cuencas de Tlacolula, así como de su agencia municipal San Luis del Rio. A continuación, se describe cada uno de los métodos utilizados:

#### A. Polígonos de Thiessen

Paso 1. El método consiste en unir mediante líneas las estaciones que influyen en la cuenca más cercanas entre sí, con eso se forman triángulos en los cuales los vértices son las estaciones climatológicas de la cuenca.

Paso 2. Se sigue con el trazo de las líneas rectas que se bisectan entre los lados de los triángulos. Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto (Aparicio, 1989).

Paso 3. Cada estación climatológica quedará rodeada por las líneas rectas del anterior, que forman los polígonos de Thiessen y, en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca. El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente (Aparicio, 1989). Véase en la Figura 8.

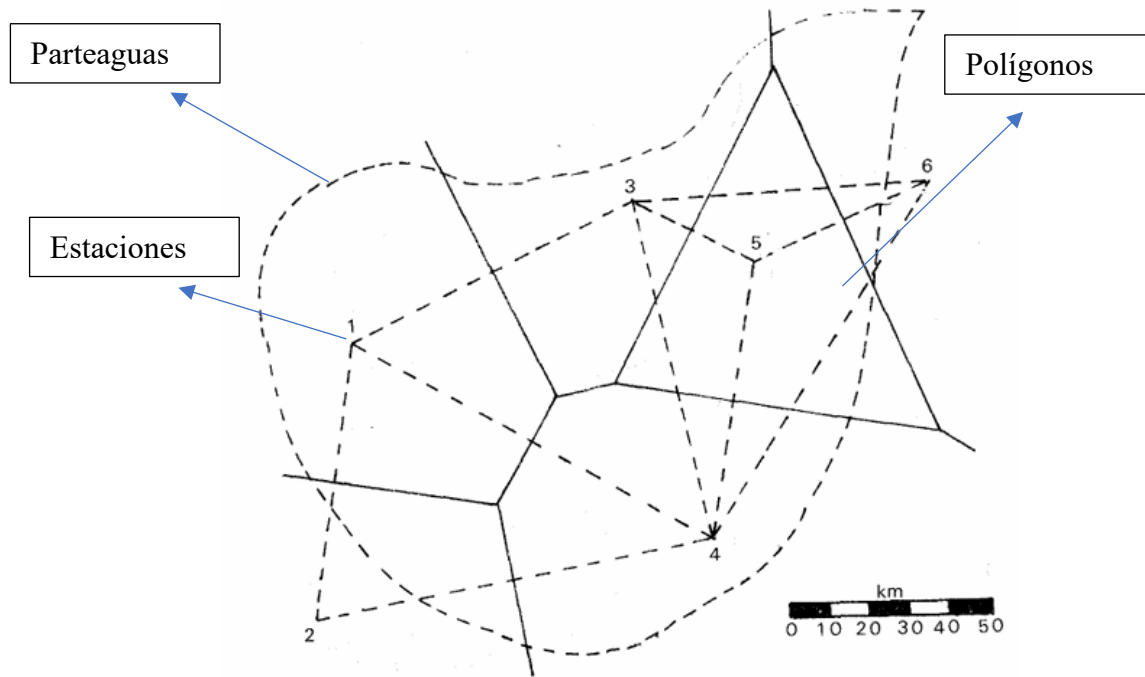


Figura 8 Método de Thiessen (Aparicio, 1989).

Se utilizó el software QGIS 3.28.0 para la creación de los polígonos de Thiessen, consiguientemente se obtuvo el área de influencia de cada polígono y su respectiva estación y se realizó el cálculo por medio de una hoja de cálculo en Excel donde la Ecuación 55 fue la que se ocupó:

*Ecuación 55 Lluvia media (Thiessen)*

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

donde  $A_i$  es el área de influencia de cada estación,  $A_T$  es el área total de la cuenca y  $h_{pi}$  es la precipitación máxima en 24 horas para un Tiempo de retorno ( $Tr$ ).

B. Método de Isoyetas este método consiste en trazar con la información de las estaciones meteorológicas, que en este caso es precipitación con su respectiva coordenada UTM o geográfica, líneas de igual altura de precipitación que se denomina isoyetas de forma similar a las curvas de topografía. La precipitación media se obtiene de forma similar a la Ecuación 55, pero ahora el peso

es el área  $A_i$  entre cada dos isoyetas y el parteaguas de la cuenca y la cantidad que se pesa es la altura de precipitación promedio entre las dos isoyetas  $\bar{h}_p$ . (Aparicio, 1989).

*Ecuación 56 Precipitación media (Isoyetas)*

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (A'_i \bar{h}_{pi}),$$

donde  $n'$  es el número de áreas  $A'$  que se consideraron.

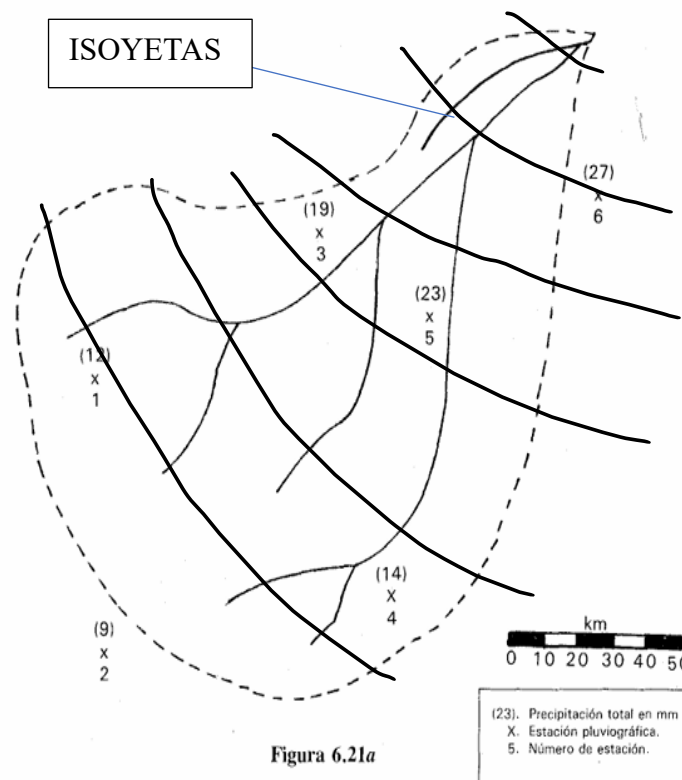


Figura 6.21a

Figura 9 Método de Isoyetas (Aparicio, 1989).

De igual forma la información de la distribución de las lluvias por este método se obtuvo por medio del software QGIS, para posteriormente realizar el cálculo en una hoja de Excel obteniendo la precipitación promedio de las cuencas, se analizó la información para ver cuál de los dos métodos resultó mejor de la información obtenida.

Con esto se obtuvieron las precipitaciones de  $p_{24}^{10}$ ,  $p_{24}^{25}$ ,  $p_{24}^{50}$ ,  $p_{24}^{100}$  que se ocuparon en la estimación de las curvas IDT que se muestra en el siguiente capítulo.

## 2.9 Curvas intensidad duración periodo de retorno

El procedimiento inicial fue obtener las intensidades por medio de las que nos indica la SCT (Secretaría de comunicaciones y transporte) el mapa estatal de isoyetas para la duración de 60min.

Se descargó la imagen de isoyetas de la SCT para 60 min para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años (SCT, 1990), se insertó la imagen en el programa QGIS en donde la imagen se georreferencio y de la obtención del centroide de la cuenca se hizo una interpolación para obtener la intensidad de lluvia para los periodos de retorno mencionados.

El procedimiento que se realizó para la estimación de las curvas IDF, cuando no se dispone de información pluviográfica, hace uso de las curvas isoyetas citadas, así como de la información pluviométrica relativa a precipitación máxima está basado en la fórmula de Chen. (Aparicio, 1989).

Del mapa de isoyetas se obtuvieron las precipitaciones o láminas de lluvia en milímetros que se muestran a continuación:

*Ecuación 57 Precipitación SCT isoyetas*

$$P_1^{10}; P_1^{25}; P_1^{50}$$

En seguida, las obtenciones de lluvia máxima diaria de periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años que se obtuvieron por medio de Isoyetas y Thiessen se multiplican por 1.13 para que se conviertan en  $P_{24}^{Tr}$ , con las cuales se obtienen los cocientes lluvia-duración (R) y lluvia-frecuencia (F) necesarios para utilizar la fórmula de Chen, estos son:

*Ecuación 58 Cocientes lluvia-duración*

$$R_1 = \frac{p_1^{10}}{p_{24}^{10}}; R_2 = \frac{p_1^{25}}{p_{24}^{25}}; R_3 = \frac{p_1^{50}}{p_{24}^{50}}; R_{promedio} = R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}$$

*Ecuación 59 Lluvia-frecuencia*

$$F = \frac{p_{24}^{100}}{p_{24}^{10}}$$

Con el valor promedio (R) de los tres cocientes R que se pueden evaluar, uno para cada periodo de retorno de 10, 25 y 50 años, se obtienen las gráficas propuestas por Chen y los parámetros a, b, y c de la fórmula expuesta. Estas gráficas se han expresado en forma de ecuaciones de regresión.

Una vez se obtuvo el valor de  $R_{promedio}$  que es igual R, para cada periodo de retorno, se obtienen los parámetros a, b y c de la Ecuación 60. En donde cita (Campos, 2010) “las fórmulas están expresadas de forma de ecuación de regresión polinomial”.

*Ecuación 60 Parámetros a, b, c.*

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4$$

$$c = -0.06498345 + 5.06994R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4$$

Las expresiones anteriores son válidas únicamente en el intervalo  $0.1 \leq R \leq 0.6$  que en este caso fue en el área de estudio.

Se obtuvo el parámetro  $\alpha_{Tr}$  para los periodos (Tr) de 5, 10, 25, 50 y 100 años

*Ecuación 61 Parámetro alfa (Tr)*

$$\alpha_{Tr} = aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})$$

Con esto se calculó las curvas I-D-T con una duración de 1440 min en donde se graficaron para las cuencas de Tlacolula y la cuenca de San Luis en una hoja de cálculo en Excel que se muestran en la sección de resultados. La fórmula de Chen es la siguiente:

*Ecuación 62 Fórmula de Chen*

$$i_D^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(D + b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(D + b)^c},$$

donde D es la duración en minutos.

## 2.10 Tormentas de diseño

Los pasos para construir la tormenta sintética para el caso de las cuencas fueron con la metodología citada por “el método del bloque alterno” que se muestra a continuación:

El método de bloque alterno es una forma de desarrollo del hietograma de diseño, este método especifica la profundidad de precipitación que ocurren en intervalos  $n$  sucesivos de una duración  $\Delta t$ .

A partir de los datos obtenidos en la metodología del punto 2.3 y 2.9 se ocuparon los siguientes datos para la obtención de las tormentas de diseño, los datos que se ocuparon fueron los siguientes:

- Área de la cuenca
- Parámetro  $\alpha$
- Parámetro  $b$
- Parámetro  $c$

Se hizo el análisis para las tormentas de diseño en un periodo de 24 horas con los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años con intervalos de tiempo ( $\Delta t$ ) de 1 hora para poder simular lo suficientemente pequeño(tiempo) para que permita definir con exactitud el hidrograma de la avenida, en especial su gasto máximo (Campos, 2010).

La intensidad se obtuvo en función de la ecuación 61, se hace la acumulación de la lluvia  $lluvia\ acomulada = intensidad(mm/h) \times duración(h)$ , se prosiguió con el incremento de lluvia que se tomó diferencias de valores de precipitación, para después obtener la lluvia multiplicada por un FRA (factor de reducción de área) que se muestra a continuación:

*Ecuación 63 Factor de reducción de área*

$$FRA = 1 - 0.3549D^{-0.42723}(1.0 - e^{-0.005794A}),$$

donde D es la duración de la precipitación en horas y A es el área de cuenca en  $km^2$ .

Los bloques de incrementos se rodean en secuencia temporal de forma que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración y que los demás bloques se ubiquen de forma descendente alternativamente hacia la derecha y a la izquierda.

### 2.11 Número de curva (CN o N)

La curva número también denominada número de curva de escorrentía es un parámetro empírico en el que se indica la capacidad de escorrentía (lluvia) que escurre por la cuenca, una parte se infiltra, una más se evapora y el demás escurre, “lo que este parámetro mide”. Servicio (anteriormente Servicio de Conservación de Suelos, SCS). Este método estima la escorrentía directa a partir de la precipitación. El número de curva tiene valores de 0 a 100 lo que indica un valor cercano a 100 que hay un escurrimiento superficial alto, un número menor cercano a 0 indica que existe demasiada infiltración, estos parámetros están en función del uso de suelo y del tipo de suelo, actualmente el número de curva está influenciado y muy afectado por el uso humano que ha cambiado y modificado el uso y tipo de suelos que existen.

A continuación, se muestra la metodología que se llevó a cabo para obtener CN para las cuencas de Tlacolula y San Luis del Rio.

Del análisis y descarga de información de esta metodología se utilizó los mapas de tipo y uso de suelo, mediante el software QGIS se insertaron los mapas y se hizo el proceso de obtener los tipos de suelo y usos de suelo que presenta cada cuenca.

Con los tipos de suelo y uso de suelo que presenta las cuencas se clasificó de acuerdo estos tres parámetros

Condición hidrológica= bueno, malo o regular (se evaluó por medio de Google Earth esta condición si cumplía con la información según los mapas del INEGI 2020)

Grupo hidrológico= A, B, C o D

Tipo de suelo= a qué tipo de suelo pertenece según (INEGI, 2015)

Se hizo una interpolación de información por medio del software QGIS para obtener el número de curva y su respectiva área; luego de los resultados se hizo la multiplicación de  $\text{Área} * CN$  de cada uso de suelo, se prosiguió con una hoja de cálculo obtener la curva número de cada cuenca con las siguientes fórmulas:

*Ecuación 64 Sumatoria de curvas número*

$$\sum_{i=1}^n A_i * CN_i ,$$

donde  $A_i$  es el área de influencia de cada tipo y uso de suelo y  $CN$  su respectiva curva número

*Ecuación 65 Curva número*

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * CN_i}{A_T} ,$$

donde  $A_T$  es el área total de la cuenca en  $km^2$

## 2.12 Obtención de los hidrogramas de diseño.

El hidrograma tiene como finalidad obtener la respuesta del flujo de agua con respecto al tiempo, esto influye en nuestro caso sobre las posibles inundaciones de la cuenca de Tlacolula para así prever desastres y hacer un mejor manejo de la gestión del agua.

Para obtener los hidrogramas de diseño se ocupó el software HEC-HMS por el método de SCS “Curve Number,” transformado al método SCS Unit Hydrograph. Los factores que se incluyeron en el programa fueron los siguientes:

- Área ( $km^2$ )
- Número de curva (CN)
- Tiempo de retraso  $Tr$

Los pasos que se siguieron se describen a continuación:

- A. Se creó el basing Model Manager de acuerdo al Shapelife (shp) de la cuenca de Tlacolula, de igual forma para la cuenca de San Luis del río.
- B. Se creó un mapa layers de acuerdo a la cuenca, en donde del basing model, se generó un subbasin creation tool.
- C. En subbasin se ingresó el área de la cuenca en  $km^2$ , de igual modo por el método de pérdidas SCS Curve number y su debida transformación en SCS unit hydrograph.

- D. En la sección de pérdidas (Loss) se ingresó el número de curva de cada cuenca con un impervious de 0.0%, sucesivamente en la sección de transformación se ingresó el  $t_r$  (tiempo de retraso min) que se calculó con la ecuación 65.
- E. En la sección de componentes se ingresó en la sección Times series data manager, donde se creó una nueva estación (precipitation Gages) en esa sección se ingresó el intervalo de tiempo del hietograma que fue cada hora en un lapso de 24 horas en la ventana de Time Windows, se ingresó el inicio y final de la tormenta de diseño
- F. Nuevamente en componentes se creó un Meterereologic Model Manager en donde en la sección de modelo metereológico-Replace Missing se quedó en Set To default de igual forma en Basins que se incluye en subbasins (yes).
- G. En la sección de Metereologic Model-Met se especifica el hietograma conforme al nombre que se puso en el punto E.
- H. Nuevamente en la sección de componentes (components) se creó un nuevo control de especificaciones en donde se ingresó el tiempo, en este caso se tomó un lapso mayor para generar el hidrograma unitario variando de 40 y 42 horas para poder generar correctamente el hidrograma.
- I. Con estos pasos se procede a ejecutar la información, para así generar la simulación y así obtener los resultados que se van a mostrar en la sección de resultados.

El tiempo de la tormenta se estimó de 24 horas, en donde el lapso de tiempo del hidrograma de diseño fue de 42 horas, para poder estimar bien el flujo de agua con su respectivo tiempo.

*Ecuación 66 Tiempo de retraso*

$$t_r = 0.6t_c ,$$

donde  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca que se obtuvo en la metodología de parámetros geomorfológicos.

El proceso fue similar para obtener los hidrogramas de diseño para las cuencas de Tlacolula y San Luis del Rio para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

### 2.13 Determinación de las áreas de inundación para los periodos de retorno indicados

La obtención de la inundación es de suma importancia, ya que con esta información se puede llevar a cabo mitigaciones de riesgos y pérdidas materiales, así como humanas, una inundación es la acumulación de agua sobre un terreno causada por una lluvia torrencial o alguna crecida repentina del río.

Se hizo el cálculo por el flujo no estacionario que está en función del tirante que este varía conforme al tiempo de flujo, los pasos a seguir fueron los siguientes por medio del programa HEC-RAS cuales se muestran a continuación:

- A. En la sección de Gis tool-Ras mapper, en esta sección se agregó el DEM para el área deseada de la cuenca de Tlacolula, en donde en este caso la resolución del DEM fue de 5mx5m (pixel) descargado del INEGI y el área que se estudió fue la zona urbana del municipio de Tlacolula para el río seco, se ingresó la zona de ubicación y georreferenciación (zona WGS84 14 NORTE).
- B. Nuevamente en la sección de editar (edit.) se ingresa en geometry data, se agrega el área en el DEM con una malla de 5x5, de igual forma se ingresa el número de Manning de acuerdo al tipo de suelo que se tienen el río para este caso fue de 0.018 (debido a que la sección del río contiene depósitos de arena, como en los laterales depósitos de limos) y se genera las condiciones de frontera de aguas arriba y aguas abajo del área.
- C. En el menú de la ventana principal de HEC-RAS-Unsteady Flow Data. Normal Depth (aguas abajo) se ingresó la pendiente del cauce principal y en aguas arriba-Flow Hydrograph se pone la fecha de inicio del hidrograma, así como se ingresa los datos del hidrograma.
- D. En la sección de RUN se crea una nueva simulación donde se ingresó la fecha de inicio y el final del hidrograma, en intervalos de 10min para generar una simulación más precisa de inundación, así se obtuvieron los mapas y la simulación para diferentes periodos de retorno.

## 3.0 Resultados

### 3.1 Verificación in situ: Trabajo de Campo en la Cuenca de Tlacolula de Matamoros

Se realizó un recorrido de campo en zonas estratégicas del municipio, para ubicar las mejores zonas para poder verificar el tipo de suelo, uso de suelo, principales ríos de la cuenca, su principal fuente de economía y sus recursos, se llevó a cabo el recorrido sobre la cuenca para poder observar el parteaguas de la cuenca, así como su flora y fauna de la zona de la zona (Figura 10):



*Figura 10 Zona del valle de Tlacolula*

El objetivo de la visita a campo fue constatar datos de gabinete con las condiciones reales del terreno para validar parámetros hidrológicos. Durante la visita se documentó mediante fotografías y observación directa además de entrevistas breves a pobladores.

Se verificó la predominancia de cambisol eutrico en el caso de la cuenca de Tlacolula; así como el suelo dominante litosol para el caso de la zona de la cuenca de san Luis identificados en gabinete mediante cartografía INEGI (2020).

Estos presentan: mediana a alta infiltración, alta erosión en zonas agrícolas de San Luis y del valle de Tlacolula; Coincidencia con el  $50 < CN < 80$  usado en modelos SCS que se pudo verificar en la sección de la curva número.



*Figura 11 Zona de Yagul Tlacolula (Uso de suelo)*

En la zona centro, se observó canalización inadecuada de arroyos efímeros, explicando inundaciones históricas reportadas en CENAPRED (2018).

Situación Hídrica; Río Tlacolula conocido como “río seco”, su caudal reducido en época seca como se observa en la Figura 12, pero con cauce con capacidad de arrastre de sedimentos (>5 m de ancho aproximadamente), validando su potencial torrencial.



*Figura 12 Río seco del municipio de Tlacolula*

Zonas críticas: En San Luis, se identificaron puntos de grandes escurrimientos, provocada por la falta de cobertura vegetal, debido la deforestación para establecer plantaciones de maguey mezcalero.



*Figura 13 Zona de San Luis y su uso de la tierra para uso del mezcal*

En la Figura 14 se muestra la zona noreste de Yagul, en donde se puede apreciar en uso de suelo tipo agrícola, como cambia el tipo de suelo debido al desarrollo de la comunidad que han hecho, ya que esto influyen en la poca infiltración y tendrá zonas con mayor arrastre de sedimento y erosión de los suelos.



*Figura 14 Visualización del tipo y uso de suelo*

En la figura 15 y Figura 16 se aprecia el parteaguas de la cuenca de Tlacolula (zona oriente y zona poniente). Se observa una zona montañosa en los parteaguas medianamente montañosos, así que en la zona central tiene una zona de baja pendiente y la mayoría de la zona se observa un tipo de suelo agrícola, en específico en el área agrícola de la industria del mezcal.



*Figura 15 Parteaguas de la zona de Tlacolula oriente*



*Figura 16 Parteaguas de la cuenca zona poniente*

### 3.2 Parámetros geomorfológicos de la cuenca

#### 3.2.1 Parámetros de forma de la cuenca

Las cuencas trazadas se nombraron como Tlacolula (cuenca 1) y San Luis (cuenca 2), la ubicación de estas se muestra en la Figura 17 y sus parámetros de forma se describen en las Tablas 6 y 7, respectivamente. La cuenca de Tlacolula se clasifica como intermedia-grande (Tabla 1), lo cual implica que el escurrimiento puede ser considerable, ya que el área superficial está relacionada con el volumen de agua que escurre en la cuenca, de igual forma el perímetro de la cuenca es relativamente amplio. En cauces principales cortos y tiempos de concentración pequeños implica una respuesta rápida de la cuenca ante una tormenta, en comparación de otra cuenca de área similar, pero con cauces más largos y tiempos de concentración más altos.

En la Figura 18 se observa el perfil del cauce principal y en la Figura 19 se muestra la longitud de la cuenca (línea negra), este parámetro junto con la longitud del cauce principal, influyen en el tiempo de respuesta de la precipitación. La cuenca tiene forma de oval redonda a oval oblonga (Tabla 6) lo que indica que la distribución de los ríos es medianamente uniforme. La cuenca tiene la forma media alargada lo que implica un mayor tiempo de concentración, de igual manera el factor de forma de la cuenca está entre  $0.22 < 0.34 < 1.5$  y lo que confirma que la cuenca es medianamente alargada. En la Figura 20 se muestra el rectángulo equivalente que permitió cuantificar la elongación de la cuenca, la geometría obtenida tiende a ser alargada y medio ancha.

*Tabla 6 Parámetros de forma de la cuenca de Tlacolula*

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Área ( $A_c$ )	546.99	$Km^2$
Perímetro ( $P_c$ )	120.88	km
Longitud del río principal ( $L_{c\_principal}$ )	40.20	km
Ancho de la cuenca	13.61	Adimensional
Longitud de la cuenca ( $L_c$ )	31.25	km
Coefficiente de compacidad ( $K_c$ )	1.46	Adimensional
Factor de forma ( $R_f$ )	0.34	Adimensional
Radio de elongación ( $R_c$ )	0.84	Adimensional
Radio de circularidad ( $R_e$ )	0.47	Adimensional

Rectángulo Equivalente		
Lado mayor	49.92	km
Lado menor	10.96	km

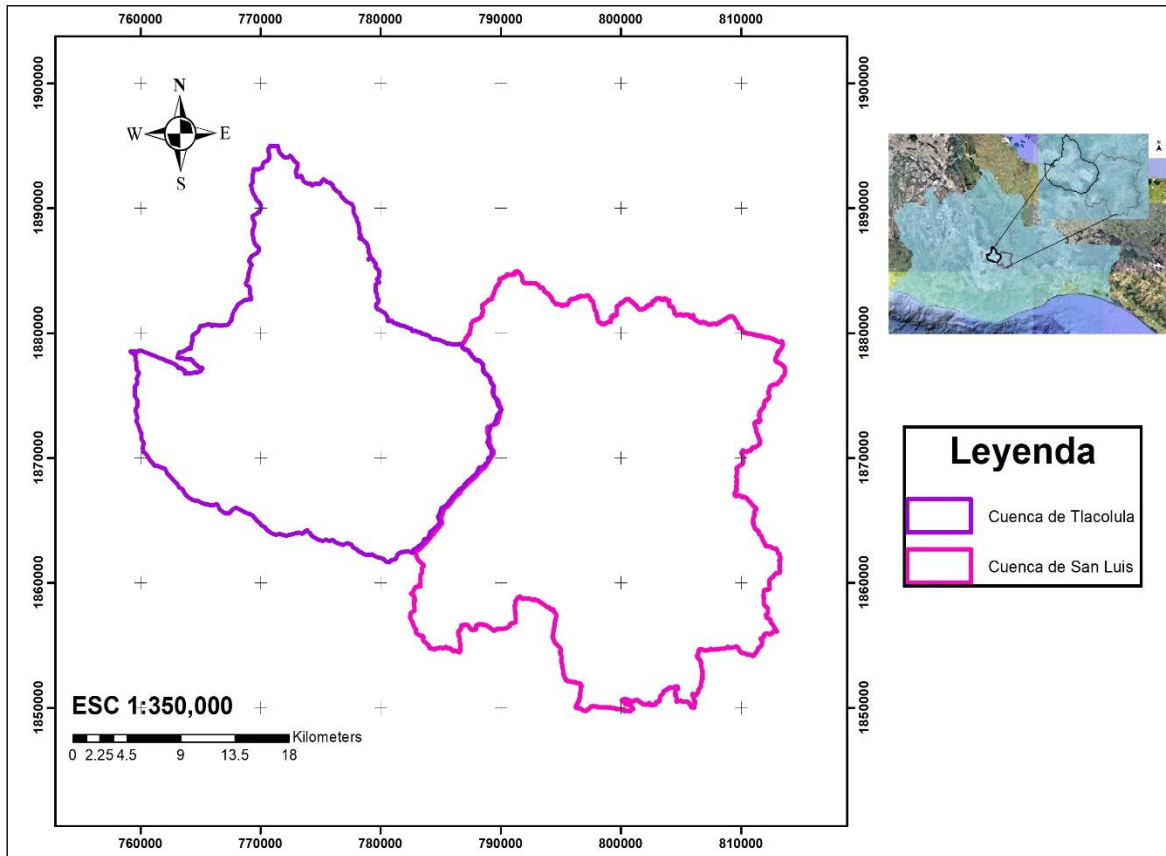
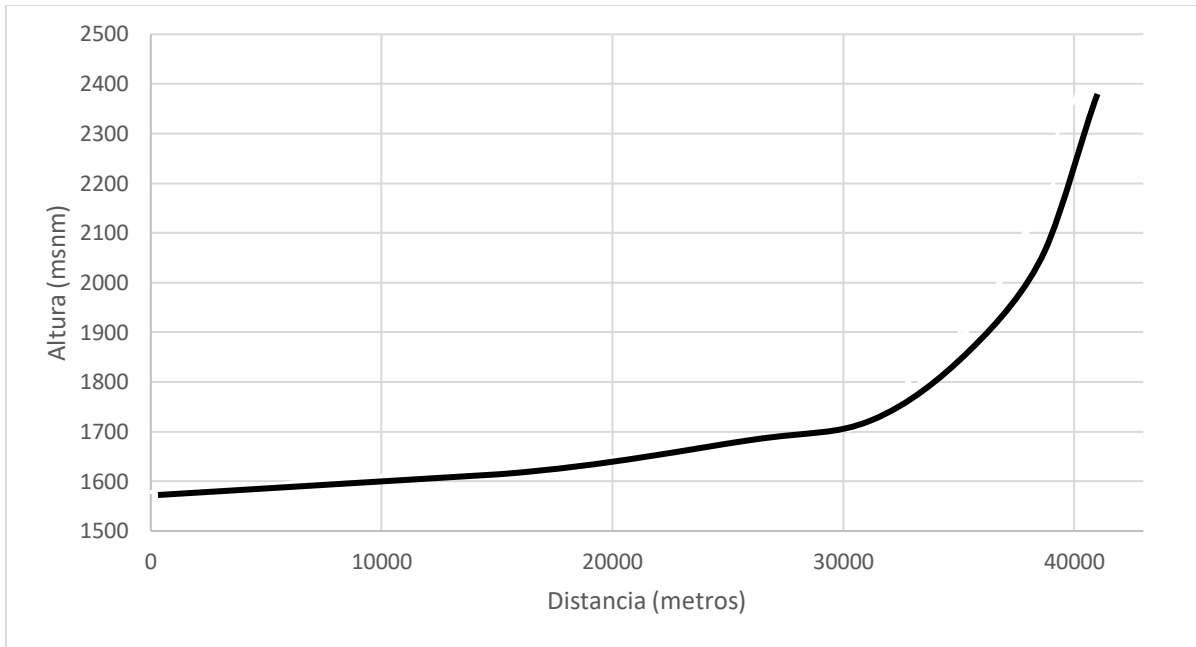
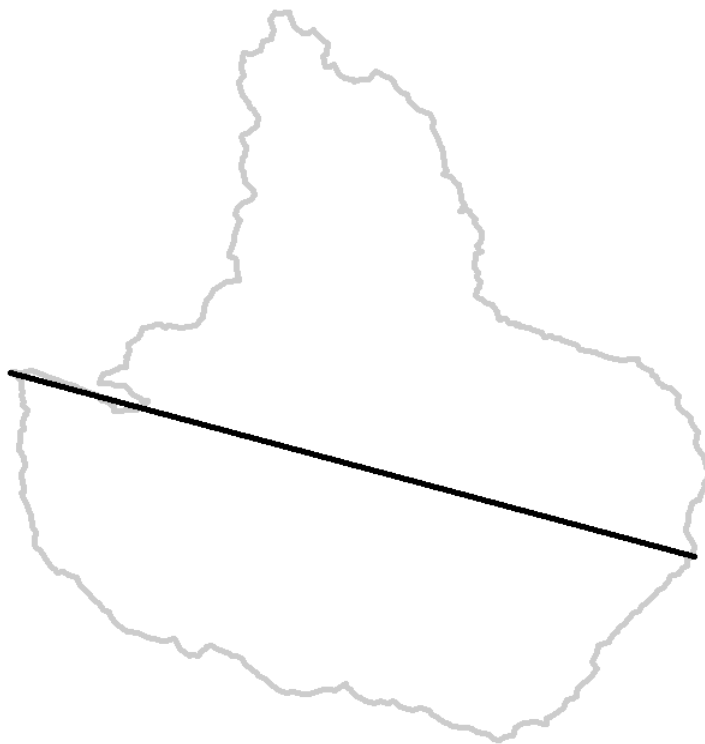


Figura 17 Cuenca de Tlacolula y de San Luis del Río



*Figura 18 Perfil longitudinal de la cuenca de Tlacohula*



*Figura 19 Longitud de la cuenca*

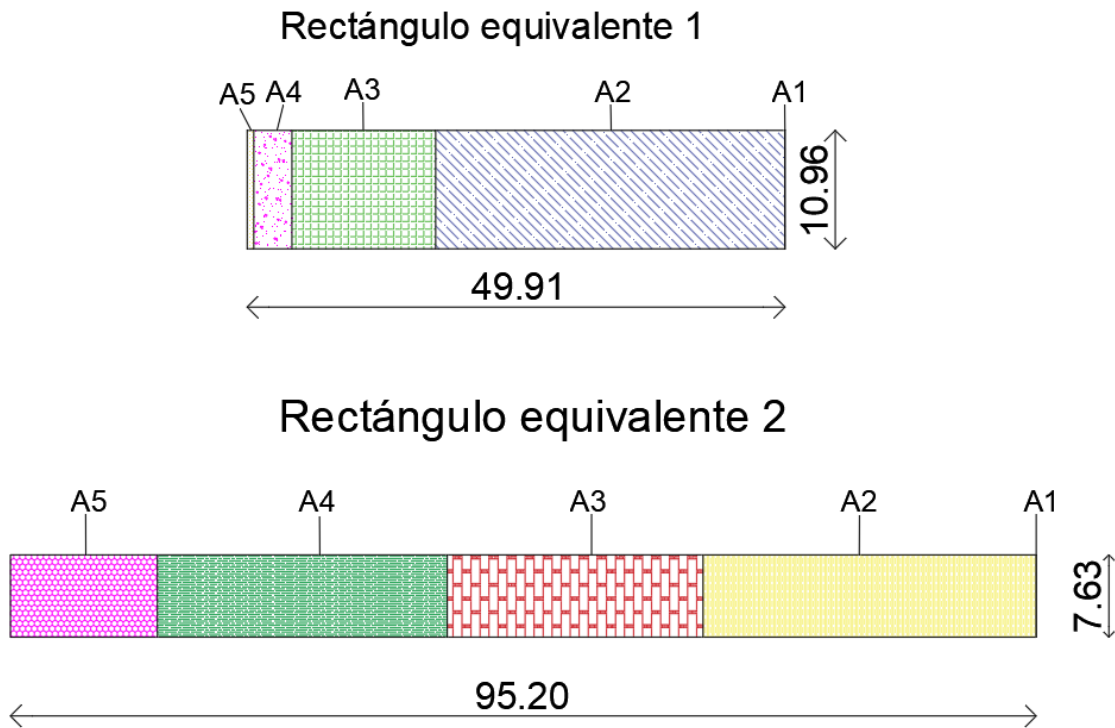


Figura 20 Rectángulo equivalente de Tlacolula (1) y de san Luis del rio (2)

La cuenca de San Luis del Río, se clasifica como intermedia-grande, lo cual favorece que los escurrimientos pluviales sean mayores debido a que se tienen una mayor área que la cuenca de Tlacolula. La longitud del cauce fue mayor que la cuenca de Tlacolula lo que implica un tiempo de concentración mayor y tiempos base de los hidrogramas mayores ya que este su forma tiende a ser alargada. En Figuras 21 y 22, se muestran el perfil de cauce principal y la longitud de la cuenca; la cuenca tiene un coeficiente de compacidad mayor a 1.75, por consiguiente, la forma es casi rectangular por lo que la cuenca tiene menos probabilidad de tener inundaciones rápidas o repentinas (la velocidad de la goa de agua tardara más en llegar al inicio de la cuenca). Además, el radio de circularidad y el factor de forma están entre 0.22 y 1.5, respectivamente; esto indica una cuenca media alargada (de acuerdo al radio de circularidad) y forma es medianamente alargada. Por lo anterior el tiempo de concentración es mayor en comparación con la cuenca de Tlacolula. En la Figura 20 se aprecia el rectángulo equivalente obtenido, cuya geometría indica que la cuenca es medianamente alargada.

Tabla 7 Parámetros de forma de la cuenca de san Luis del Rio

Descripción	Resultado	Unidad
Área (Ac)	726.70	km
Perímetro (Pc)	204.21	km
Longitud del río principal (Lc_principal)	49.08	km
Ancho de la cuenca	14.81	Adimensional
Longitud de la cuenca (Lc)	35.72	km
Coefficiente de compacidad (Kc)	2.14	Adimensional
Factor de forma (Rf)	0.30	Adimensional
Radio de elongación (Rc)	0.85	Adimensional
Radio de circularidad (Re)	0.22	Adimensional
Rectángulo Equivalente		
Lado mayor	95.20	km
Lado menor	7.63	km

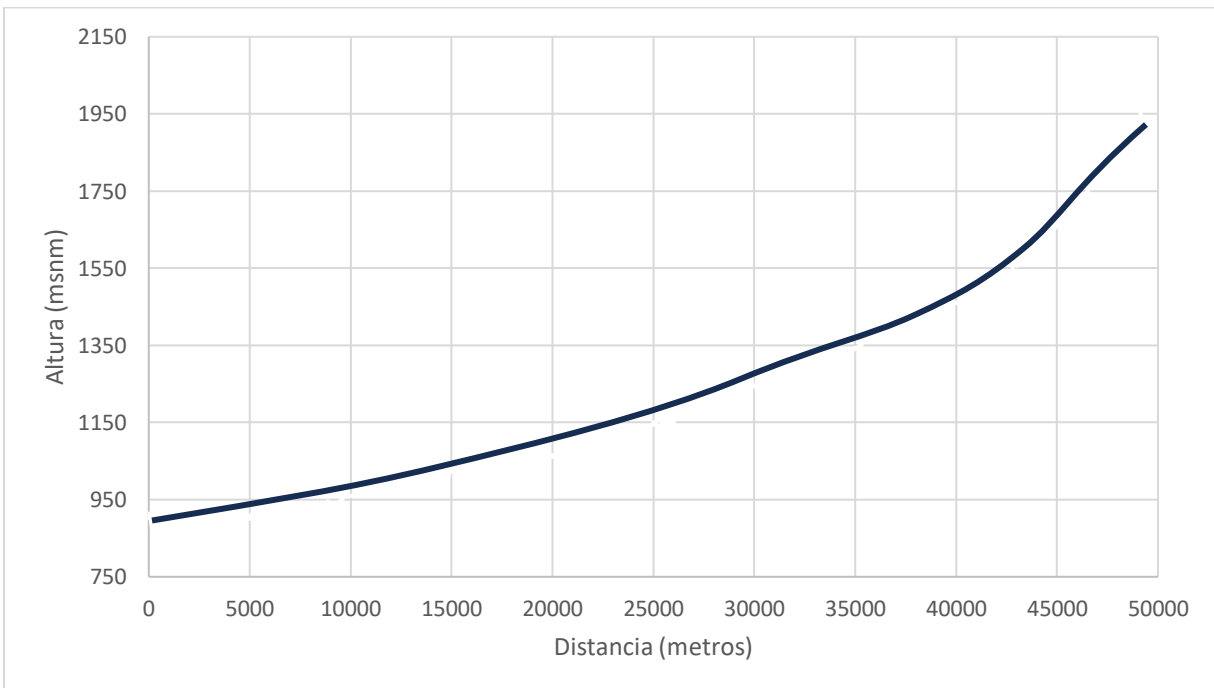
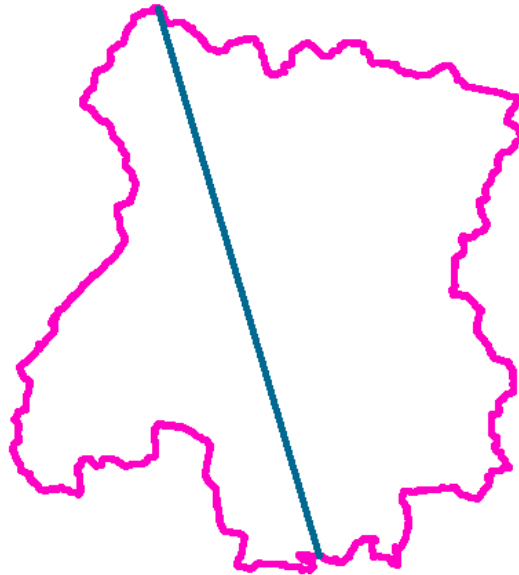


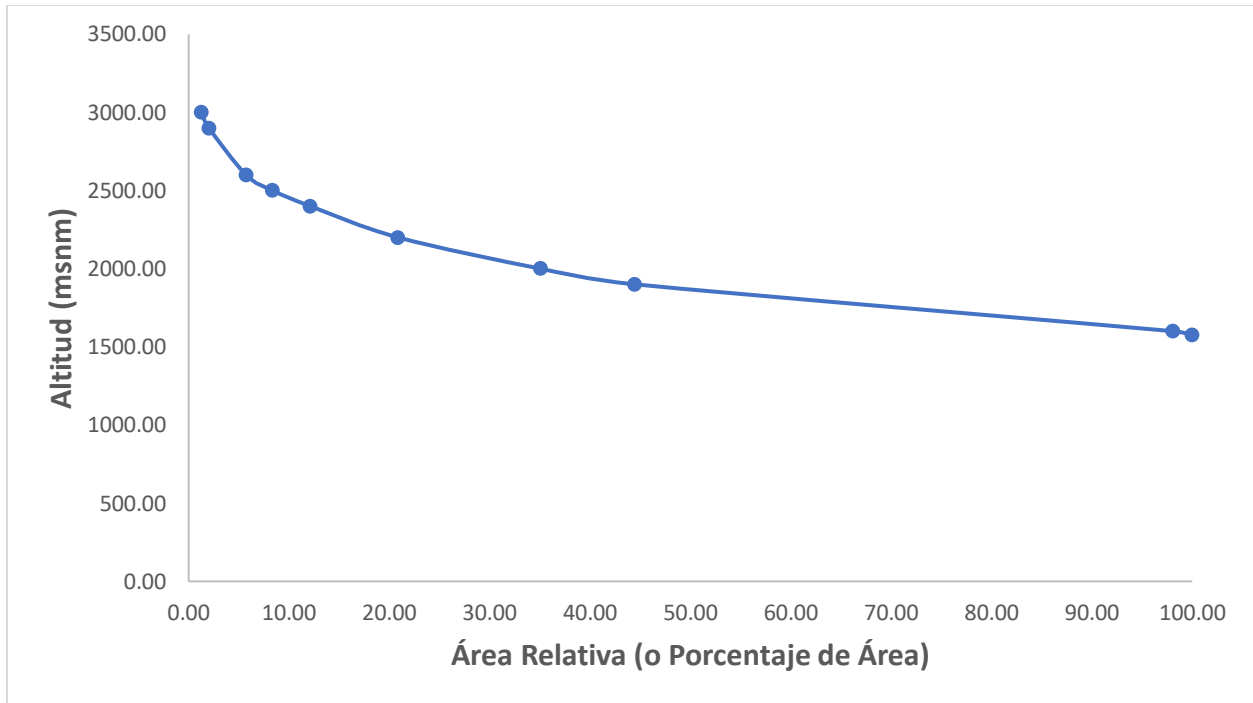
Figura 21 Perfil longitudinal de la cuenca de San Luis



*Figura 22 Longitud de la cuenca (fuente propia)*

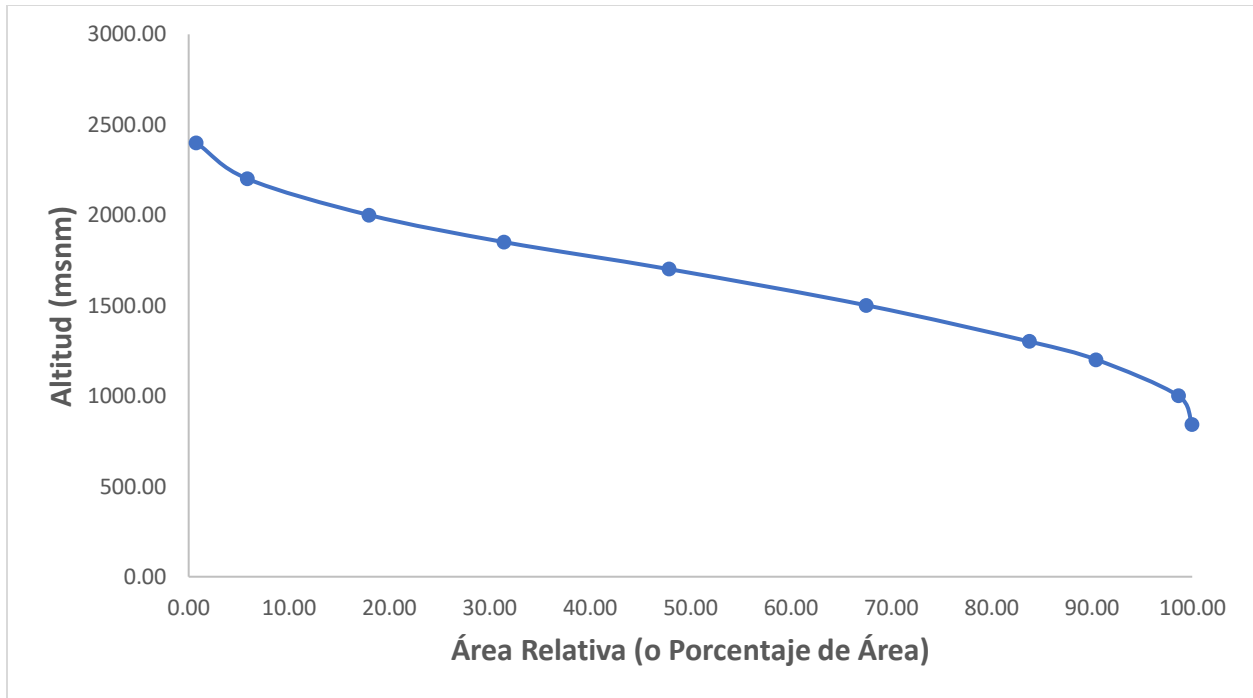
### 3.2.2 Parámetros de relieve de la cuenca

De la curva hipsométrica (Figura 23), se determinó que la cuenca de Tlacolula está en fase de juventud, con tendencia fase de equilibrio; esto significa que el suelo está en proceso de erosión, aunque puede presentar algún grado de erosión o de sedimentación, además según Campos (1984) es una cuenca de pie de montaña, por lo que aún conserva relieve con pendientes pronunciadas en algunos sectores, situación que se pudo verificar en campo.



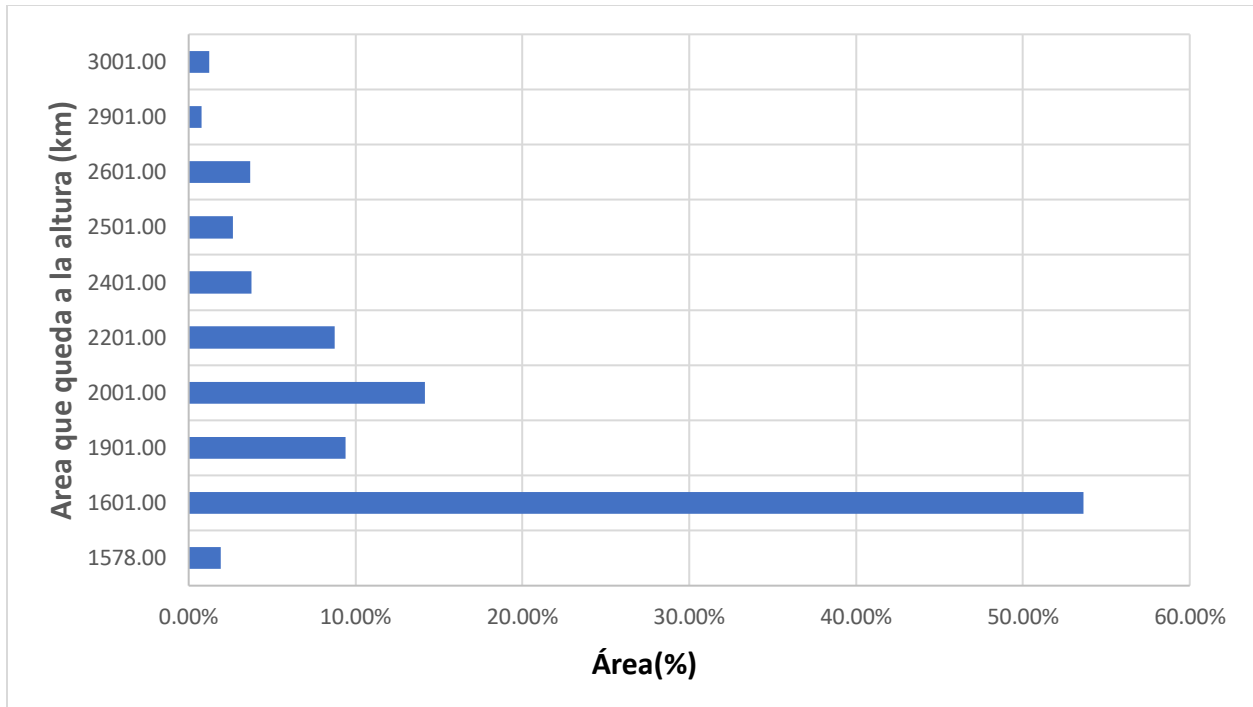
*Figura 23 Curva hipsométrica cuenca de Tlacolula*

La curva hipsométrica de la cuenca de San Luis (Figura 24), corresponden a una cuenca en fase geológicamente joven (cuenca de meseta) con tendencia a fase de equilibrio, lo que representa un relieve aún conservado, pero con indicios de procesos erosivos y de sedimentación, que favorecen la generación de escurrimientos rápidos. Además, según (Campos, 1984), la cuenca es geológicamente madura.



*Figura 24 Curva hipsométrica Cuenca de San Luis*

El polígono de frecuencia (Figura 25) que se obtuvo de la distribución de la curva hipsométrica muestra los intervalos de altitudes de la cuenca. Se observa en la Figura 25 que la altitud más frecuente de la cuenca de Tlacolula es de 1601 metros.



*Figura 25 Polígono de frecuencias de la cuenca de Tlacolula*

El polígono de frecuencias (Figura 26) de la cuenca de San Luis presenta una variedad notoria con respecto a la de Tlacolula. Se observa que la altitud más frecuente de la cuenca de Tlacolula es de 1501 metros, con una mejor distribución de las altitudes.

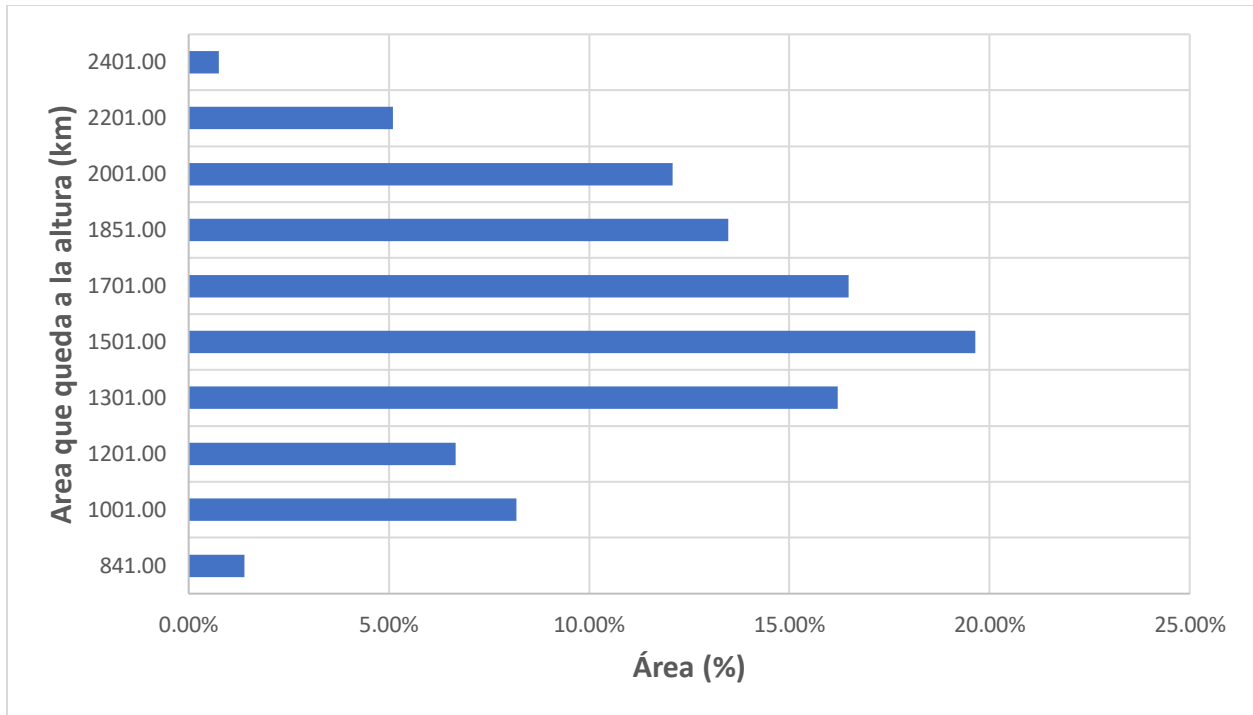


Figura 26 Polígono de frecuencias de la cuenca de San Luis

Se observa en las siguientes Figuras 27 los centroides de la cuenca de Tlacolula y de San Luis:

Cuenca de Tlacolula X: 774746.66; Y: 1875395.55

Cuenca de San Luis X: 799077.90; Y: 1867154.75

Estos parámetros se utilizaron para obtener la longitud del cauce principal con respecto a la salida de la cuenca y el punto del cauce más cercano al centroide.

Estos parámetros fueron útiles para obtener la distancia entre el centroide y la salida de la cuenca en donde se puede estimar el tiempo de concentración *l<sub>cg</sub>* (longitud con respecto al centroide) para cada una de las cuencas, así como relacionar la disposición espacial con la forma de la cuenca, un ejemplo es que el centroide de las cuencas está relativamente en medio de cada una lo que refleja simetrías con la topografía.

De acuerdo a los datos mostrados en las Tablas 8, la altitud media de la cuenca de Tlacolula es de 1942.59 msnm, lo cual indica que la cuenca es de medianamente montañosa, tal como se pudo observar en campo. La pendiente media de la cuenca indica un relieve moderado ya que está entre una cuenca medianamente montañosa, pero con zonas planas presentes en el centro de la cuenca.

El coeficiente de masividad y el de orografía tiene valores pequeños asociados a un relieve con media a pequeñas montañas, principalmente en la zona del parteaguas donde la topografía tiende a ser más plana que montañosa. El coeficiente de torrencialidad es bajo, por lo que las lluvias son aparentemente poco intensas.

La pendiente media del cauce principal es medianamente suave, lo que es coherente con la zona centro de la cuenca.

*Tabla 8 Parámetros de relieve de la cuenca Tlacolula*

Descripción	Resultado	Unidad
Altitud media de la cuenca	1942.59	msnm
Pendiente media de la cuenca	3.38	%
Coeficiente de masividad (Cm)	0.003	Adimensional
Coeficiente orográfico (Co)	0.006	Adimensional
Coeficiente de torrencialidad (Ct)	0.132	Adimensional
Pendiente media del cauce principal	2.03	%
Longitud del cauce con respecto al centro de gravedad	18.43	km

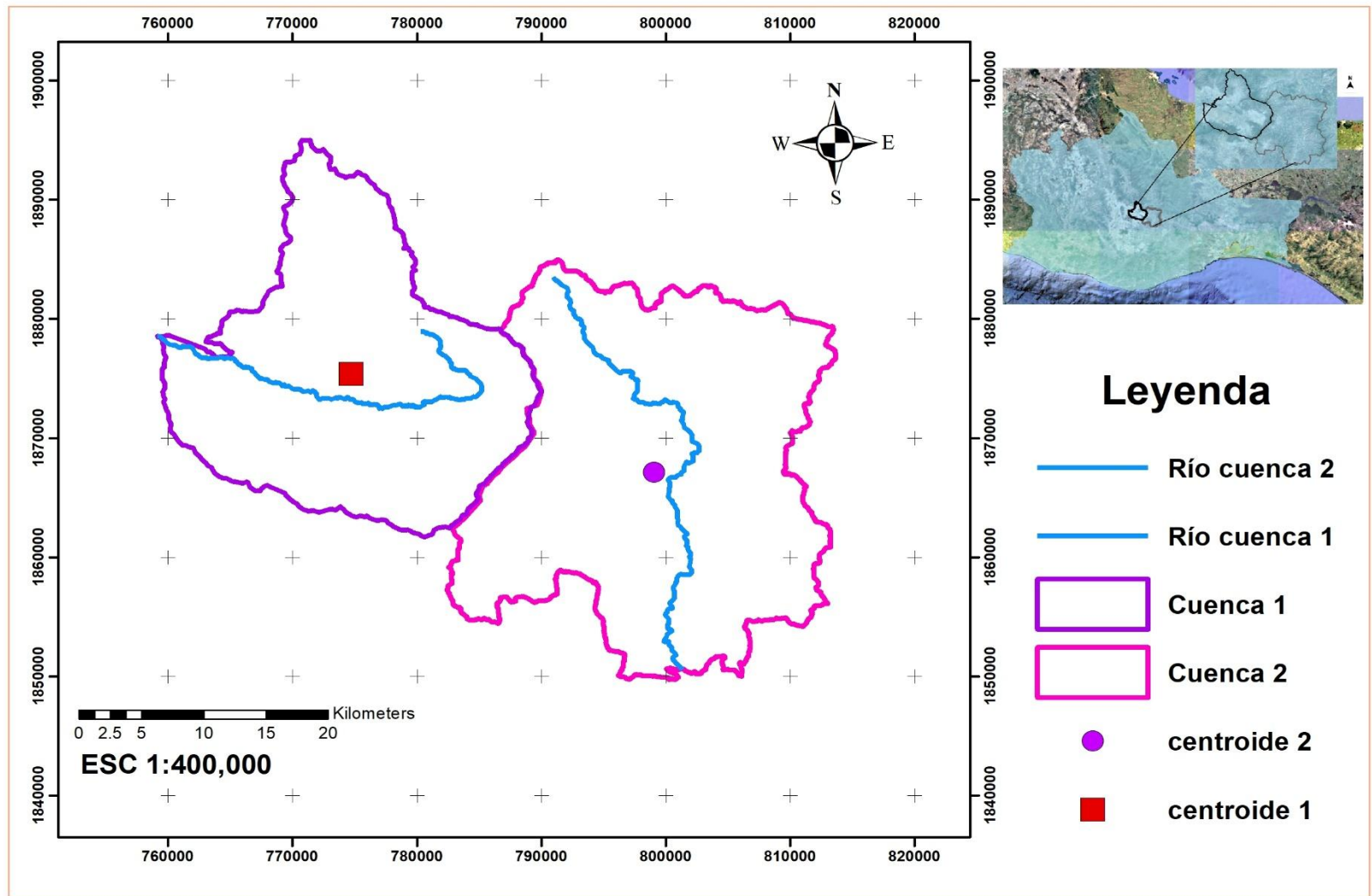


Figura 27 Cuenca de Tlacolula y de San Luis

La altitud media de la cuenca de San Luis, está dentro del rango intermedio, lo cual corresponde a una cuenca de valles planos con algunas pendientes moderadamente pronunciadas. Además, la zona del perímetro de la cuenca corresponde a montañas medianamente altas. La pendiente de la cuenca refleja un relieve suave y es mayor a la pendiente de la cuenca de Tlacolula (cauce principal). De igual manera la pendiente media del cauce principal es moderadamente suave lo que indica que el escurrimiento es moderado y el tiempo de concentración medianamente alto.

El coeficiente de masividad y de orografía indica que la topografía ejerce un efecto moderado en el tiempo de concentración. De igual forma como en la cuenca de Tlacolula el coeficiente de torrencionalidad es bajo, por lo que las lluvias son aparentemente poco intensas.

*Tabla 9 Parámetros de relieve de la cuenca de San Luis*

Descripción	Resultado	Unidad
Altitud media de la cuenca	1679.60	msnm
Pendiente media de la cuenca	1.85	%
Coeficiente de masividad (Cm)	0.003	Adimensional
Coeficiente orográfico (Co)	0.006	Adimensional
Coeficiente de torrencionalidad (Ct)	0.122	Adimensional
Pendiente media del cauce principal	2.32	%
Longitud del cauce con respecto al centro de gravedad	20.01	km

### 3.2.3 Parámetros de la red hidrográfica

En la Tabla 10 se puede apreciar que la densidad de drenaje (Dd) tiene un valor de 0.55, lo que nos indica que la densidad de drenaje es baja de acuerdo a la Tabla 3, lo que refleja un escurrimiento superficial que se distribuye moderadamente antes de llegar al cauce principal. La frecuencia de los ríos indica que hay pocos ríos por unidad de área, lo que muestra una ramificación de drenaje menor y que se refiere a un tiempo de concentración más largo en el que presenta una cuenca con mayor frecuencia de los ríos. La extensión media de la cuenca muestra que la lluvia hace recorridos moderadamente antes de cruzar el cauce principal, esto influye en el tiempo de concentración de

la cuenca. La elevación media del cauce principal muestra como existen pendientes moderadas donde existe baja intensidad del flujo del agua.

El tiempo de concentración se aproxima a 6 horas, lo que implica hidrogramas de diseño relativamente altos, como se mostró en la metodología, se obtuvo de un promedio de todos los métodos para poder obtenerla, lo que se indican en las tablas, lo cual se ocupó para el diseño de los hidrogramas de diseño.

*Tabla 10 Parámetros de red hidrográfica de Tlacolula*

Descripción	Resultado	Unidad
Densidad de drenajes (Dd)	0.55	Adimensional
Frecuencia de densidad de ríos (Fr)	0.26	Adimensional
Extensión media del escurrimiento superficial	1.830	Adimensional
Altura media del río principal ( <i>Hmed</i> )	1986.50	msnm
Tiempo de concentración	5.887	Horas

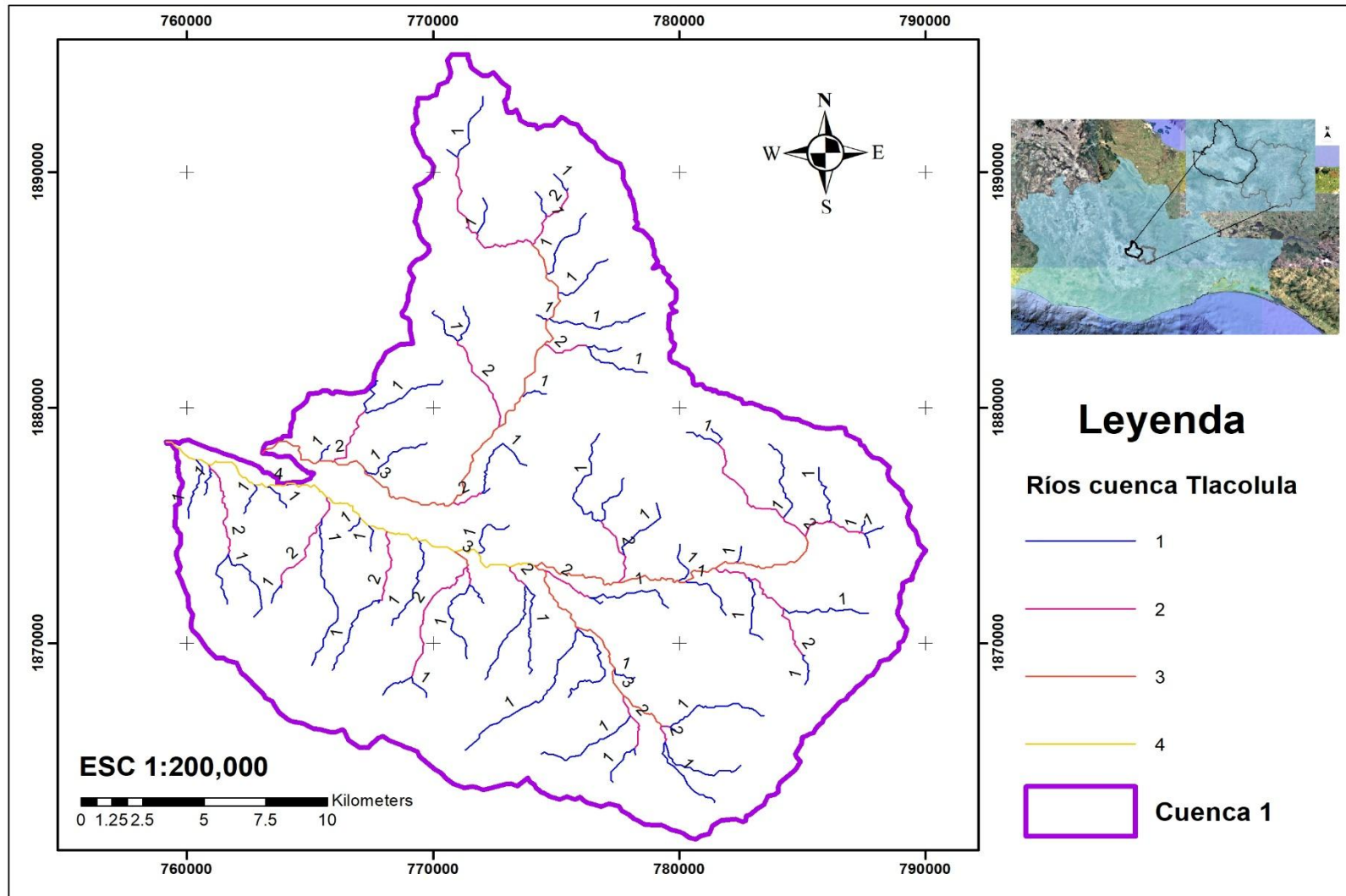


Figura 28 Ríos de la cuenca de Tlacolula

La cuenca de San Luis presenta una densidad baja como de igual forma con la cuenca de Tlacolula, la red de drenaje está moderadamente desarrollada. La frecuencia de los ríos significa que existen muy pocos ríos por unidad de área lo que indica un drenaje moderadamente ramificado, así como del tiempo de concentración medio alto. La extensión media de la cuenca indica que es relativamente alta, aumentado el tiempo de concentración y obteniendo un mayor caudal en los hidrogramas y de la altura media del río es moderada, lo que influye en la velocidad del flujo que afecta en la infiltración de la zona, así como de los procesos erosivos, lo que significa que una mayor parte del escurrimiento fluye a través del cauce principal.

El tiempo de concentración fue mayor a 6 horas lo que significa un mayor tiempo de concentración de escurrimiento por lo tanto tendrá mayor caudal que la cuenca de Tlacolula.

*Tabla 11 Parámetros de red hidrográfica de San Luis*

Descripción	Resultado	Unidad
Densidad de drenajes (Dd)	0.50	Adimensional
Frecuencia de densidad de ríos (Fr)	0.24	Adimensional
Extensión media del escurrimiento superficial	2.012	Adimensional
Altura media del río principal ( $H_{med}$ )	1430.00	msnm
Tiempo de concentración	6.362	Horas

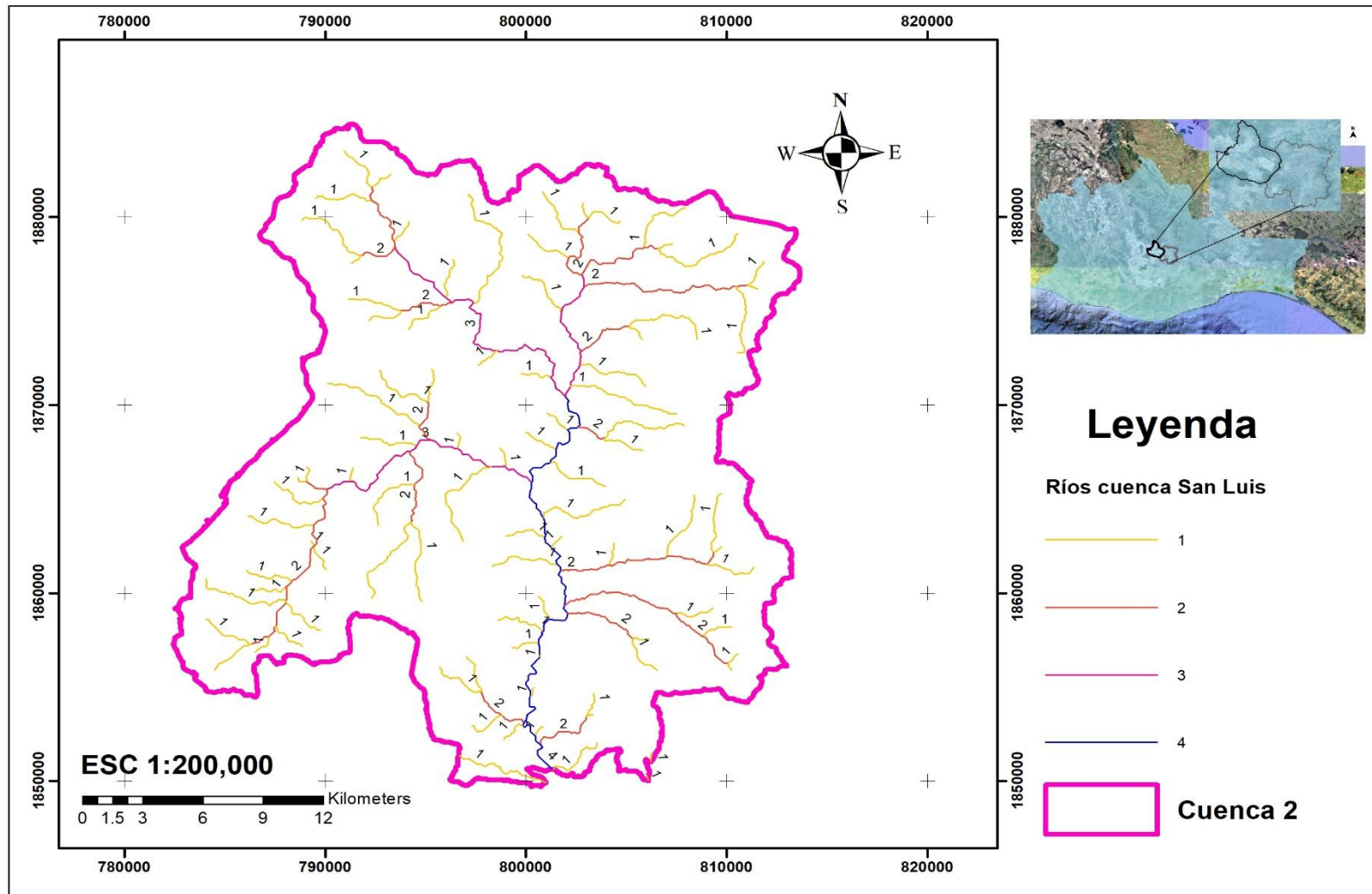


Figura 29 Ríos de la cuenca de San Luis

## ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA

### 3.3 Estaciones climatológicas seleccionadas

En la Tabla 12 se describen a las estaciones climatológicas seleccionadas, las cuales tienen al menos 20 años de registros entre los años 1961 y 1985. La cantidad de información de estas estaciones se muestra en la Tabla 13, en la que se observa que la estación con clave 20179 y nombre Villa de Hidalgo, tiene 21 años de registros mientras que el resto de las estaciones tiene entre 23 y 25 años de registros.

*Tabla 12 Estaciones ocupadas*

Número	Estación	Nombre	Municipio	Coordenadas Geográficas		Período	Número de años con registro	Lluvia media anual
				Longitud	Latitud			
1	20007	Ayutla	San Pedro y San Pablo Ayutla	-96.09970	17.01670	1961-2024	53 años	1255.60
2	20009	Boquilla Número Uno	Nejapa de madero	-95.95970	16.63670	1946-2024	75 años	534.70
3	20023	Cuajimoloyas	San Miguel Amatlán	-96.41670	17.12500	1955-2024	55 años	995.20
4	20109	San Jerónimo Taviche	San Jerónimo Taviche	-96.57530	16.73310	1944-1996	49 años	562.60
5	20165	Tlacolula de Matamoros	Tlacolula de matamoros	-96.48310	16.95000	1950-1988	37 años	477.00
6	20170	Totolápam (smn)	San Pedro Totolápam	-96.30750	16.66330	1944-2024	79 años	415.70
7	20179	Villa Hidalgo	Villa Hidalgo	-96.18310	17.20000	1955-1983	26 años	782.70
8	20184	San Carlos Yautepec	San Carlos Yautepec	-96.10830	16.50330	1961-2024	61 años	590.20
9	20191	Zoquitlán	santa maría Zoquitlán	-96.36670	16.55000	1963-2024	60 años	354.80

### CAPÍTULO 3 RESULTADOS

A continuación, se muestra los años de registro de lluvia que se estudió para cada cuenca en forma de gráfica de barras teniendo en cuenta un periodo de registro de 1961 a 1985 en donde se encontró un periodo de años con que las estaciones tenían información promedio entre 20 años.

*Tabla 13 Período de registro*

		PERIODO DE AÑOS DE REGISTRO																								
Estación		1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
AYUTLA	20007																									
BOQUILLA																										
NUMERO UNO	20009																									
CUAJIMOLOYAS	20023																									
SAN JERONIMO																										
TAVICHE	20109																									
TLACOLULA DE MATAMOROS	20165																									
TOTOLAPAM (SMN)	20170																									
VILLA DE HIDALGO	20179																									
SAN CARLOS YAUTEPEC	20184																									
ZOQUITLAN	20191																									

Año sin información

Año con información

### 3.4 Lluvia máxima de 24 horas

En la Tabla 14, se muestran las lluvias máximas en 24 horas obtenidas para cada período de análisis. Las claves de las estaciones que tienen más de tres datos faltantes son: 20179, 20007, 20165 y 20191.

*Tabla 14 Lluvia máxima de cada estación (mm)*

Año	Estaciones									
	20184	20009	20109	20179	20170	20007	20023	20165	20191	20080
1961	89	21	52	63	65	85	48.5	36	55	59
1962	67	30.6	148	30.9	25	67.1	45.5	81	74	42
1963	72	33.5	72	55.2	60	67.1	59	48	49.6	71.8
1964	63	22.5	39	38	25	45.2	29.5	46.5	38.2	58
1965	66	14.2	64	34.9	30	54.2	30	34	31.5	78.5
1966	42	43.2	43	84.2	40	116.5	64.5	52	85	49.2
1967	42	45.4	53	75	40	51	64	42	46	63.4
1968	59	29.6	50	59	20	84.6	58	55	22	37.4
1969	42	57.8	66	102.2	30	77.1	60	40	30	48.6
1970	27.2	38.6	71	35.6	60	75.5	42.5	40	35	24.9
1971	48.5	38.5	64	39.3	20	60.1	40	41	61.5	85
1972	62	20.3	53	61.8	40	130.4	49.5	57	71	44
1973	34	53.6	48	78.3	40	60.5	73	47	60	59
1974	80	38	41	49	35	70.8	108	44	32	71.6
1975	27	43.4	58.5	46	40	60.5	42.5	62	90	39.6
1976	31	57.8	60	75	25	60.1	39	37.5	47.5	51.3
1977	70	26.4	35	80	60	82.5	36	34.5	44	68.3
1978	50	70.1	91	66	40	65.2	51.5	68	43.5	86.5
1979	70	57	70	55.7	40	73.4	38.5	54	50	64.6
1980	77	73	67	-	65	84	47.5	35	55	67.8
1981	60	55	37	-	45	-	81.8	38	48	97.8
1982	60	55.8	27	-	40	-	50.5	42	41	282
1983	54	64	39	-	60	-	46.8	-	-	87
1984	50	69.5	24	-	100	-	62.2	-	-	-
1985	-	60.6	-	-	30	-	-	-	-	-

### 3.5 Pruebas de homogeneidad e independencia

Como ejemplo de los resultados obtenidos de las pruebas de homogeneidad, en la Tabla 15 se muestran los resultados de la estación “Tlacolula”. La serie de lluvia máxima de esta estación, pasó 2 de las pruebas (Helmer y t de Student), por ende, se consideró que es homogénea.

Tabla 15 Prueba de homogeneidad Estación 20165 (Tlacolula)

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	22	MEDIA	47.023
NÚMERO DE SECUENCIAS	9	NÚMERO DE CAMBIOS	12
COMO (S-C)	-3	RAÍZ	4.6
<b>LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA</b>			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	11	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	11
MEDIA	46.864	MEDIA	47.182
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	13.019	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	11.49
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			-0.058
GRADOS DE LIBERTAD	20	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.09
<b>CÓMO TD&lt;T STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA</b>			

<b>METODO DE CRAMER</b>			
<b>BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)</b>		<b>BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)</b>	
NÚMERO DE VALORES	13	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	46.154	MEDIA	44.143
TAO60	-0.07251	TAO30	-0.24032
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	2.1164	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	2.30509
GRADOS DE LIBERTDAD	18	GRADOS DE LIBERTDAD	2.101
<b>COMO T60&gt;T NO ES HOMOGÉNEO</b>		<b>COMO T30&gt;T NO ES HOMOGÉNEO</b>	

Por otro lado, el resultado de la prueba de independencia de Anderson, indica que la serie es independiente, ya que como se observa en la Figura 30, los valores de RK están dentro de los límites permisibles.

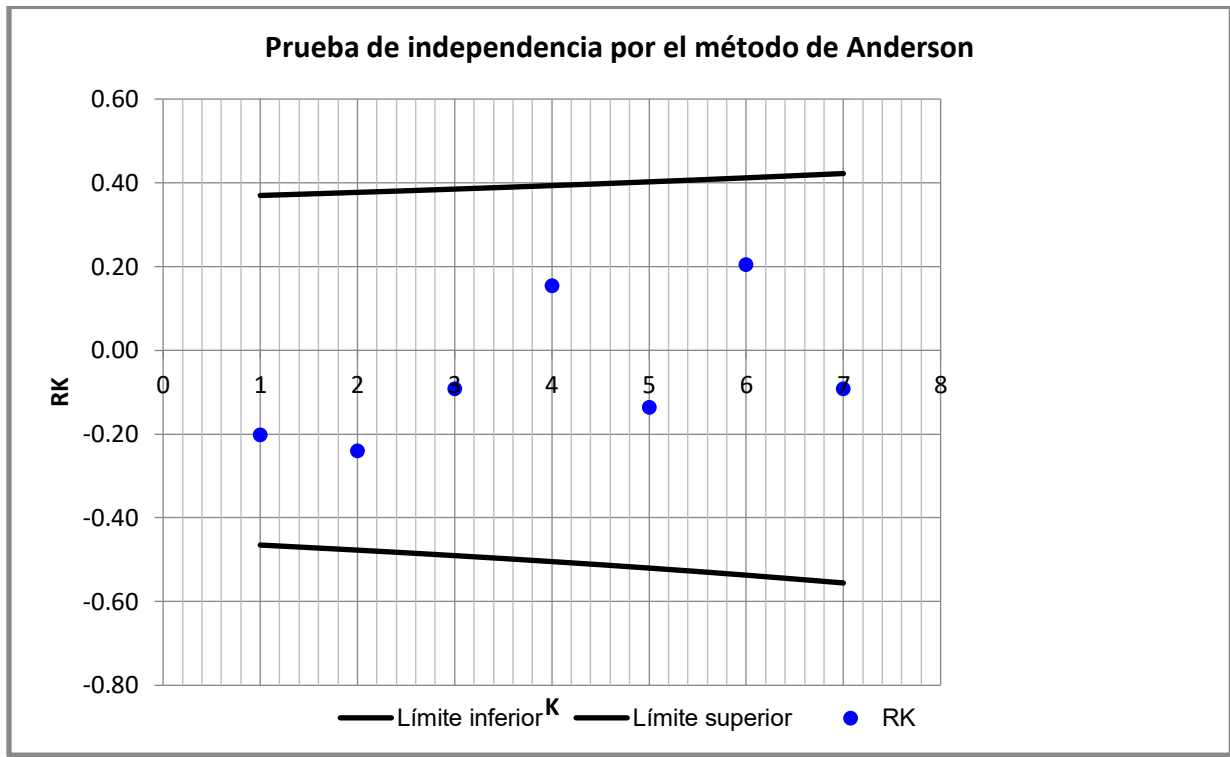


Figura 30 Gráfica de independencia estación 20165 (Tlacolula)

En la Tabla 16 se muestra un resumen de las pruebas de homogeneidad y de independencia de las estaciones seleccionadas. Se determinó que todas las estaciones son independientes y todas pasaron al menos una prueba de homogeneidad, así que se consideró que las series son homogéneas e independientes. Dado que la validez de los resultados del análisis de frecuencias se basa en la independencia y homogeneidad de los datos utilizados, se asumió que los datos son adecuados.

Tabla 16 Resumen de tablas de pruebas de homogeneidad e independencia

Estación	Nombre	Prueba de homogeneidad e independencia			
		Helmer	T de Student	Cramer	Independencia
20007	AYUTLA	SI	SI	SI	SI
20009	BOQUILLA NUMERO UNO	NO	SI	NO	SI
20023	CUAJIMOLOYAS	NO	SI	NO/SI	SI
20109	SAN JERÓNIMO TAVICHE	SI	SI	NO	SI
20165	TLACOLULA DE MATAMOROS	SI	SI	NO	SI
20170	TOTOLAPAM (SMN)	SI	SI	NO	SI

20179	VILLA HIDALGO	SI	SI	NO/SI	SI
20184	SAN CARLOS YAUTEPEC	SI	SI	NO/SI	SI
20191	ZOQUITLÁN	SI	SI	SI/NO	SI

### 3.6 Frecuencias máximas en 24 horas

Las funciones de distribución utilizadas para la predicción de los eventos de lluvia máxima, fueron las que arrojaron los menores Errores Estándar de ajuste (EE). Por ejemplo, para la estación “Tlacolula”, se determinó que el menor EE (Tabla 18) corresponde a la función General de Valores Extremos (GVE). De la misma manera, para 90% de las estaciones, la función que mejor EE (menor del 10%) fue la función GVE de valores extremos estimadores por momentos y momentos L en la cual en algunas funciones tenían mejor error estándar de ajuste. En consecuencia, se tomó la decisión de elegir a la función GVE para predecir la lluvia máxima en 24 horas de las 8 estaciones, excepto para una estación que fue la estación 20191 en donde la mejor función fue log Pearson por lo que esta fue la utilizada.

Un ejemplo de los datos que se obtuvieron se muestra a continuación

Parámetro de escala ( $\alpha$ ) 7.70, parámetro de ubicación ( $v$ ) 40.90 y parámetro de forma ( $\beta$ ) -0.183

$$\hat{x}_T = \hat{v} + \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \left\{ 1 - \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{\hat{\beta}} \right\}$$

En donde T es el periodo de retorno de 10, 25 50 y 100 años y se muestra un ejemplo con un período de retorno de 10 y 25 años en el cual la información obtenida se puede verificar con la Tabla 17.

$$\hat{x}_T = 40.90 + \frac{7.70}{-0.183} \left\{ 1 - \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{10} \right) \right]^{-0.183} \right\} = 62.33$$

$$\hat{x}_T = 40.90 + \frac{7.70}{-0.183} \left\{ 1 - \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{25} \right) \right]^{-0.183} \right\} = 74.35$$

A continuación, se muestran los resultados del análisis de frecuencias de la estación “Tlacolula” (Figura 31 y Tabla 17) el resto de las Figuras y Tablas se muestra en el capítulo 6 (anexos). Los datos resaltados en color gris en la Tabla 17, se utilizaron para obtener la precipitación promedio de las cuencas y para obtener las curvas intensidad-duración-periodo de retorno por el método de Chen. En la tabla 19 se muestran eventos estimados de lluvia máxima en 24 horas asociados a distintos periodos de retorno.

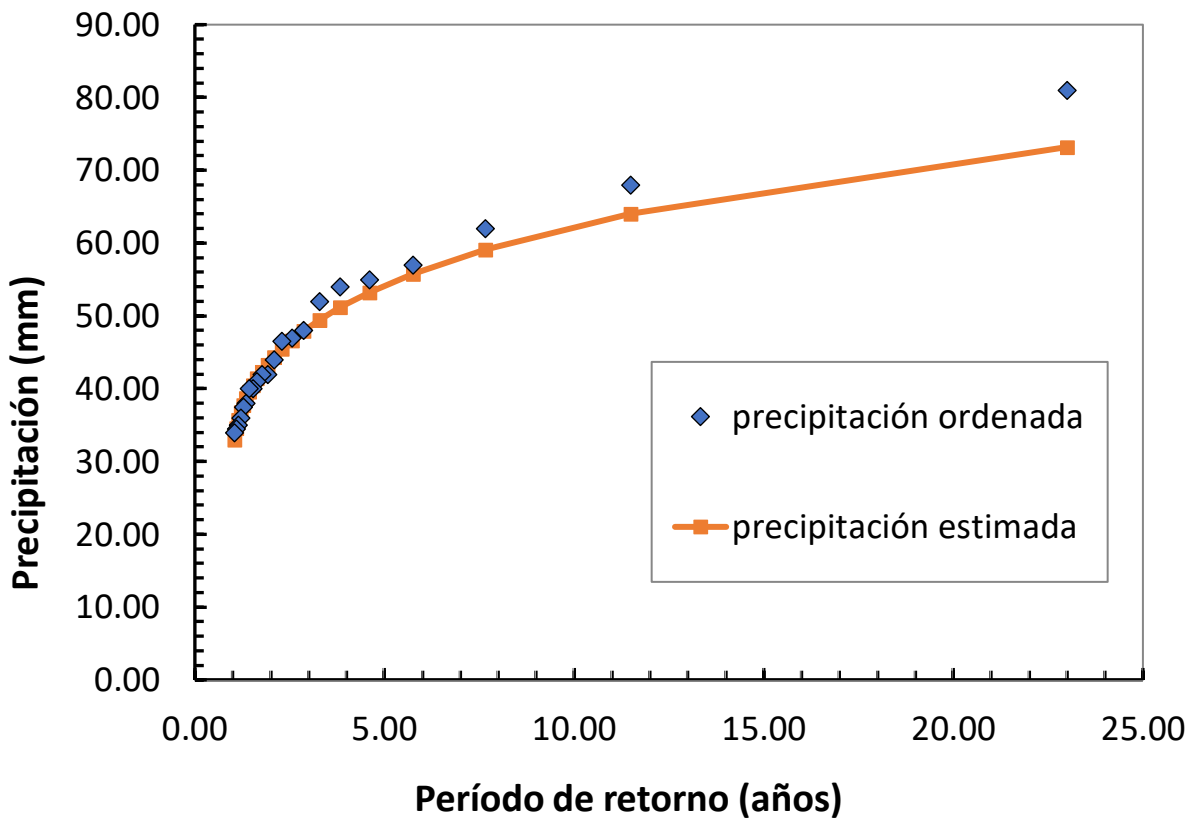


Figura 31 Gráfica Tlacolula (20165)

Tabla 17 Precipitaciones Tlacolula (20165)

Eventos de diseño	
T(años)	Precipitación (mm)
2	43.82
5	54.18
10	62.33
20	71.26
25	74.35
50	84.72
100	96.41
200	109.64
500	129.88
1000	147.60
2000	167.70
5000	198.48
10000	225.44

Tabla 18 Error estándar de ajuste de las funciones

Función	Error estándar de ajuste	
	momentos	máxima verosimilitud
normal:	4.199	4.338
Log normal 2p:	2.818	3.120
Log normal 3p:	3.286	3.331
Gamma 2p:	3.148	3.535
Gamma 3p:	3.213	-
Log Pearson:	2.775	2.962
Gumbel:	3.292	3.060
GVE:	3.203	2.862
Gumbel mixta:	-	4.503

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS

*Tabla 19 Precipitaciones máximas 24 horas*

Clave	Nombre	Precipitación (mm) T10	Precipitación (mm) T25	Precipitación (mm) T50	Precipitación (mm) T100
20007	AYUTLA	99.668	118.213	133.472	150.014
20009	BOQUILLA	67.768	74.827	78.812	81.953
20023	NUMERO UNO CUAJIMOLOYAS	75.269	90.369	102.497	115.375
20109	SAN JERÓNIMO TAVICHE	87.711	108.947	126.261	144.882
20165	TLACOLULA DE MATAMOROS	62.328	74.352	84.717	96.411
20170	TOTOLAPAM (SMN)	66.532	81.627	93.483	105.835
20179	VILLA HIDALGO	86.638	98.172	105.673	112.335
20184	SAN CARLOS YAUTEPEC	78.021	84.973	88.941	92.098
20191	ZOQUITLÁN	75.059	89.741	100.963	112.436

T son los periodos de retorno para cada precipitación en años

### 3.7 Precipitación promedio

En las Tablas 20 y 21, se muestran los resultados de la precipitación promedio obtenidos por el método de Isoyetas e Thiessen para cada cuenca, de igual forma en las Figuras 32 y 33, se muestran las isoyetas y polígonos de Thiessen para el periodo de retorno de 10 años, respectivamente. Los resultados para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años se encuentran en la sección 6 en el capítulo de anexos.

*Tabla 20 Precipitación promedio cuenca 1 (24 horas máxima)*

CUENCA DE TLACOLULA				
PERIODO	T10	T25	T50	T100
ISOYETAS	69.72	82.66	94.24	107.20
THIESEN	64.16	76.63	87.24	99.11

*Tabla 21 Precipitación promedio cuenca 2 (24 horas máxima)*

CUENCA DE SAN LUIS				
PERIODO	T10	T25	T50	T100
ISOYETAS	80.69	96.04	108.12	121.93
THIESEN	85.95	102.66	116.15	130.55

Para las cuencas de Tlacolula y de San Luis se optó por ocupar los resultados obtenidos por el método de las Isoyetas debido a que en terrenos muy montañosos como el de la zona de estudio es recomendable utilizar el método de isoyetas por que representa mejor la distribución altitudinal de la cuenca.

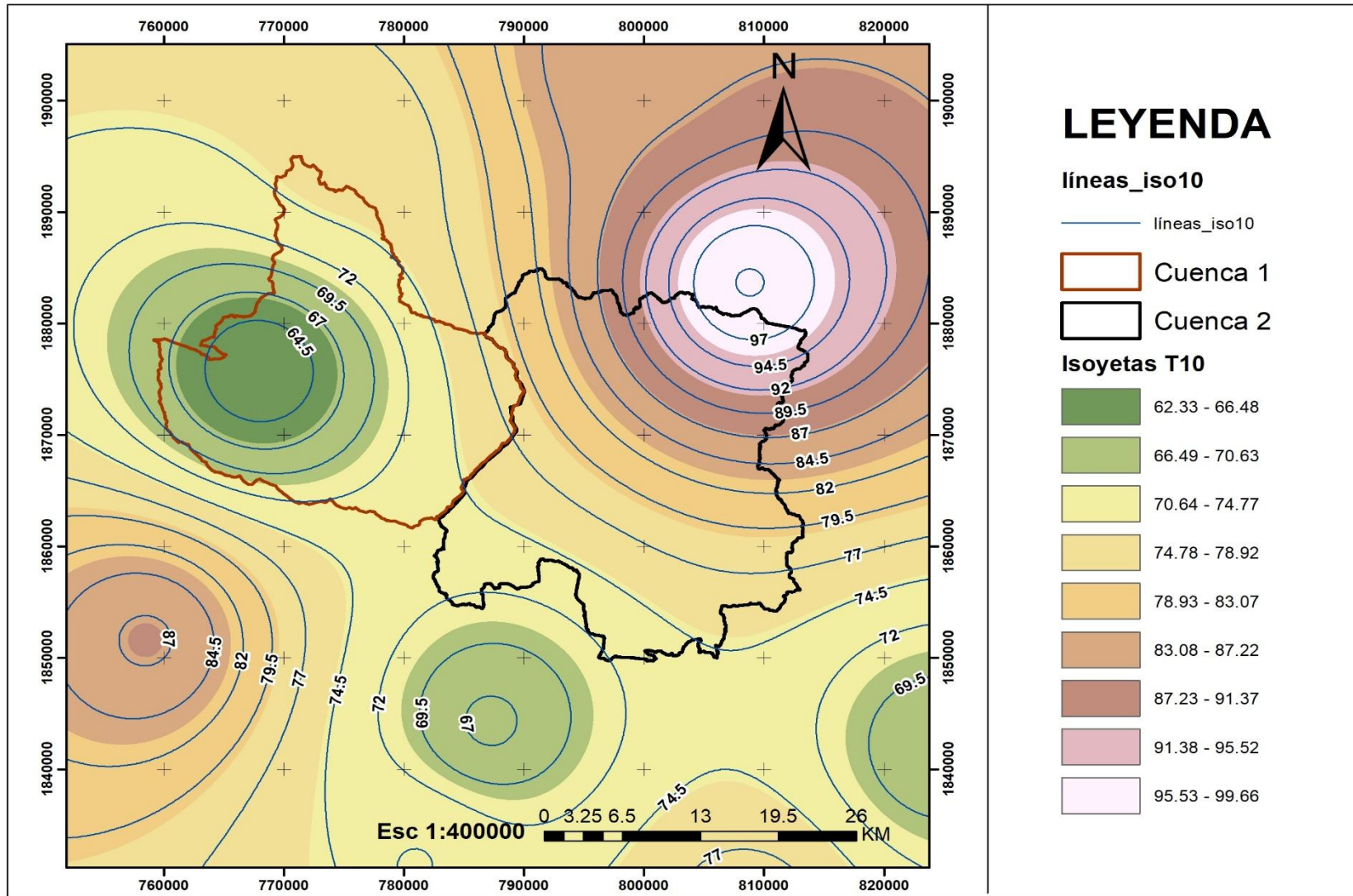


Figura 32 Mapa de Isoyetas del período de T10

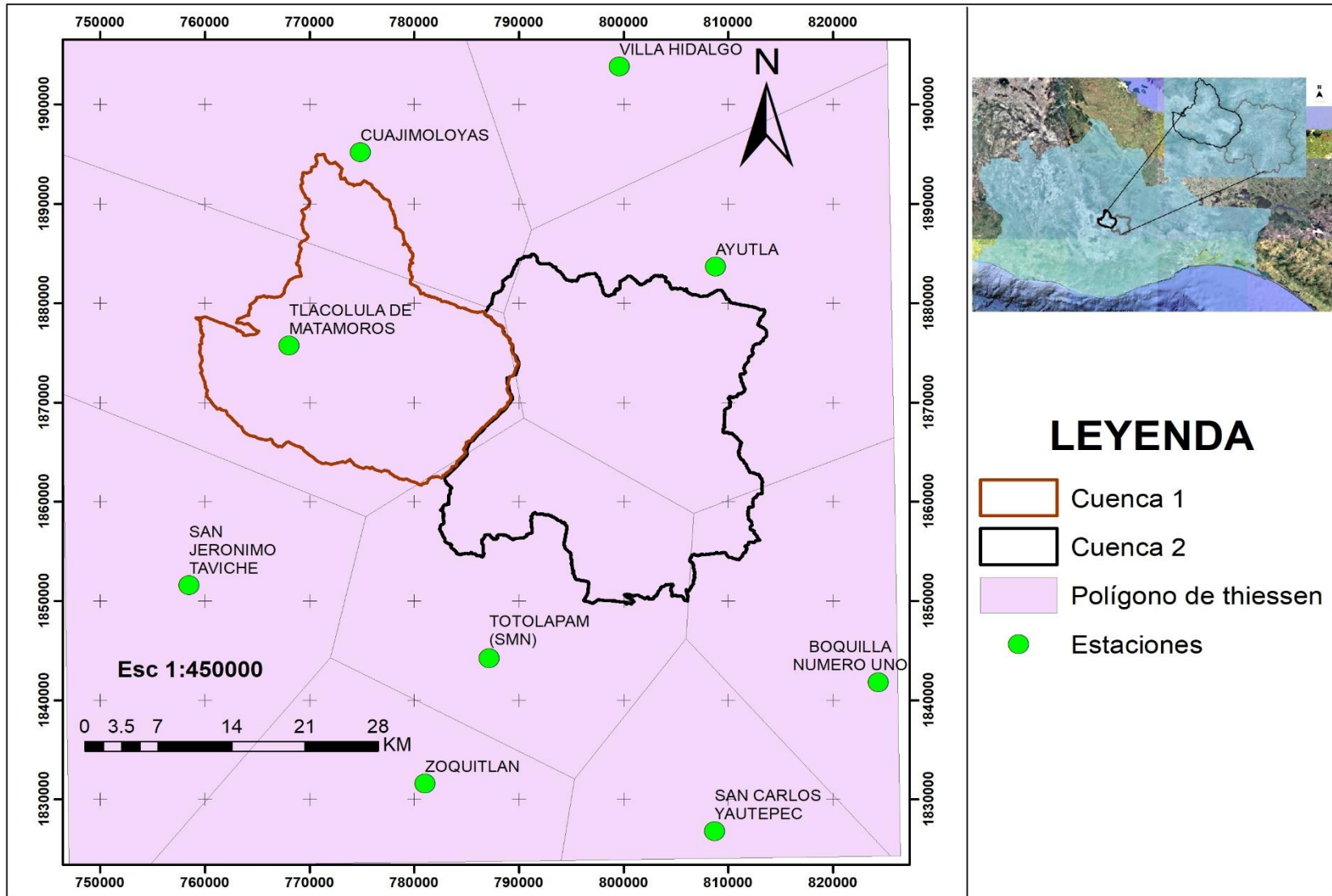


Figura 33 Mapa de Polígonos de Thiessen

### 3.8 Intensidades método de Chen

En las Figuras 34 y 35 se muestran las curvas intensidad duración período de retorno (I-D-T) para las cuencas de Tlacolula y San Luis, respectivamente; mientras que en las Tablas 22 y 23 contienen los parámetros de la fórmula de Chen, en ambas figuras, se puede apreciar un descenso rápido en la intensidad de la lluvia con respecto a la duración, es decir, la intensidad es inversamente proporcional a la duración y directamente proporcional al período de retorno. Las curvas i-d-T fueron la base para estimar los hietogramas de diseño para distintos periodos de retorno.

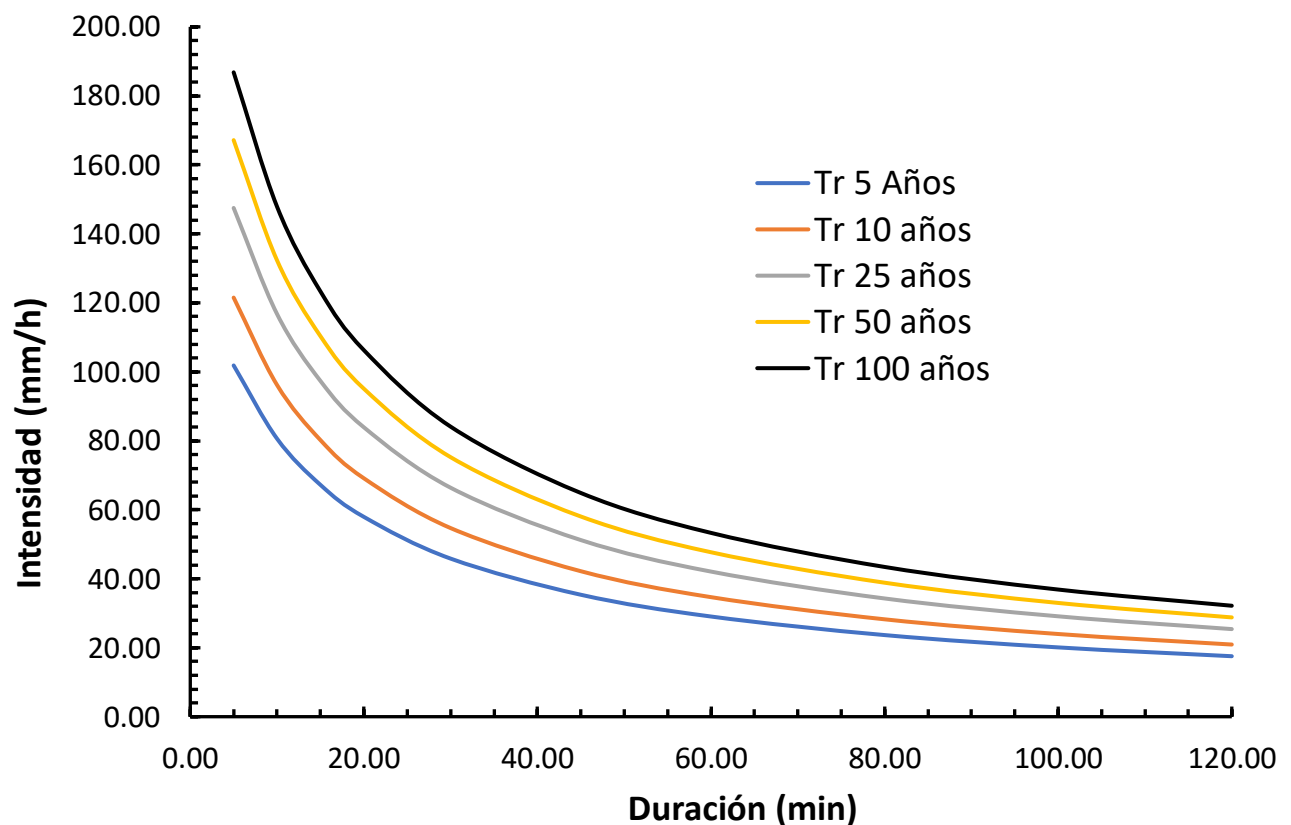


Figura 34 Curvas-Intensidad-Duración-Período de retorno estimadas con la fórmula de Chen para la cuenca de Tlacolula

Los parámetros que se muestran en la Tabla 22 son los que se utilizaron para obtener los valores de intensidad cada uno se aprecia en la fórmula de Chen.

Tabla 22 Parámetros de la fórmula de Chen para la cuenca de Tlacolula

Para metros Tlacolula	
a	30.34
b	10.05
c	0.82

Tr (años)	$\alpha$ Tr (años)
5	929.79
10	1109.31
25	1346.63
50	1526.15
100	1705.67

***Fórmula de Chen***

$$i_D^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \cdot \log(10^{2-F} \cdot Tr^{F-1})}{(D + b)^c} = \frac{\alpha_{Tr}}{(D + b)^c}$$

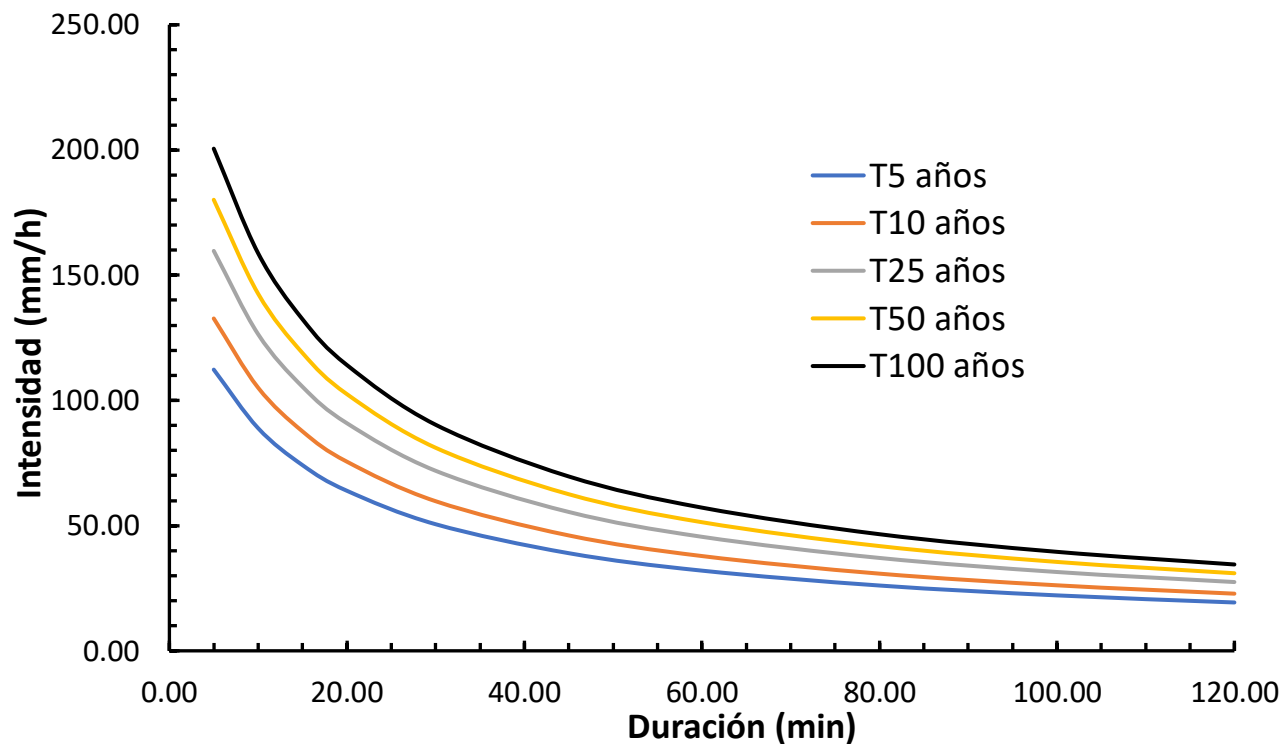


Figura 35 Curvas-Intensidad-Duración-Periodo de retorno estimadas con la fórmula de Chen para la cuenca de San Luis

Tabla 23 Parámetros de la cuenca de San Luis

Parámetros San Luis	
a	30.6015
b	10.1239
c	0.81796

Tr (años)	$\alpha$ Tr (años)
5	1035.7668
10	1224.0592
25	1472.9681
50	1661.2605
100	1849.5528

### 3.9 Hietogramas de diseño

Los hietogramas obtenidos para las cuencas de Tlacolula y San Luis para el período de retorno de 5 años, se muestran en las Figuras 36 y 37, en las que se pueden apreciar la lluvia máxima para una duración de 24 horas.

Al comparar los hietogramas se puede apreciar que a mayor periodo de retorno la intensidad es mayor. Por ejemplo, para la cuenca de Tlacolula la intensidad máxima es de 26.51 mm para el periodo de retorno de 5 años y de 31.63 para el periodo de retorno de 10 años donde se pueden apreciar en la sección 6 de anexos en la Figura 69.

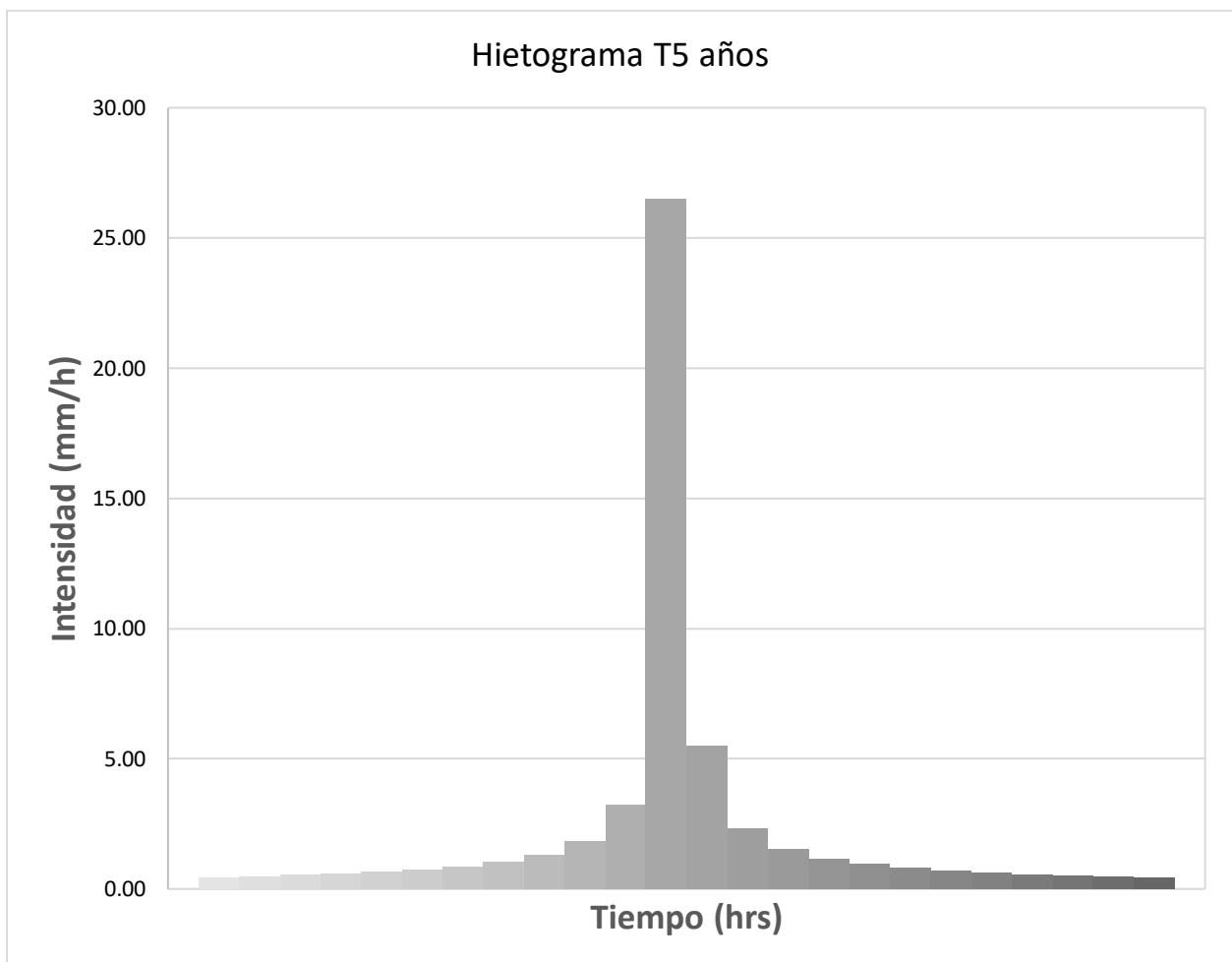


Figura 36 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 5 años

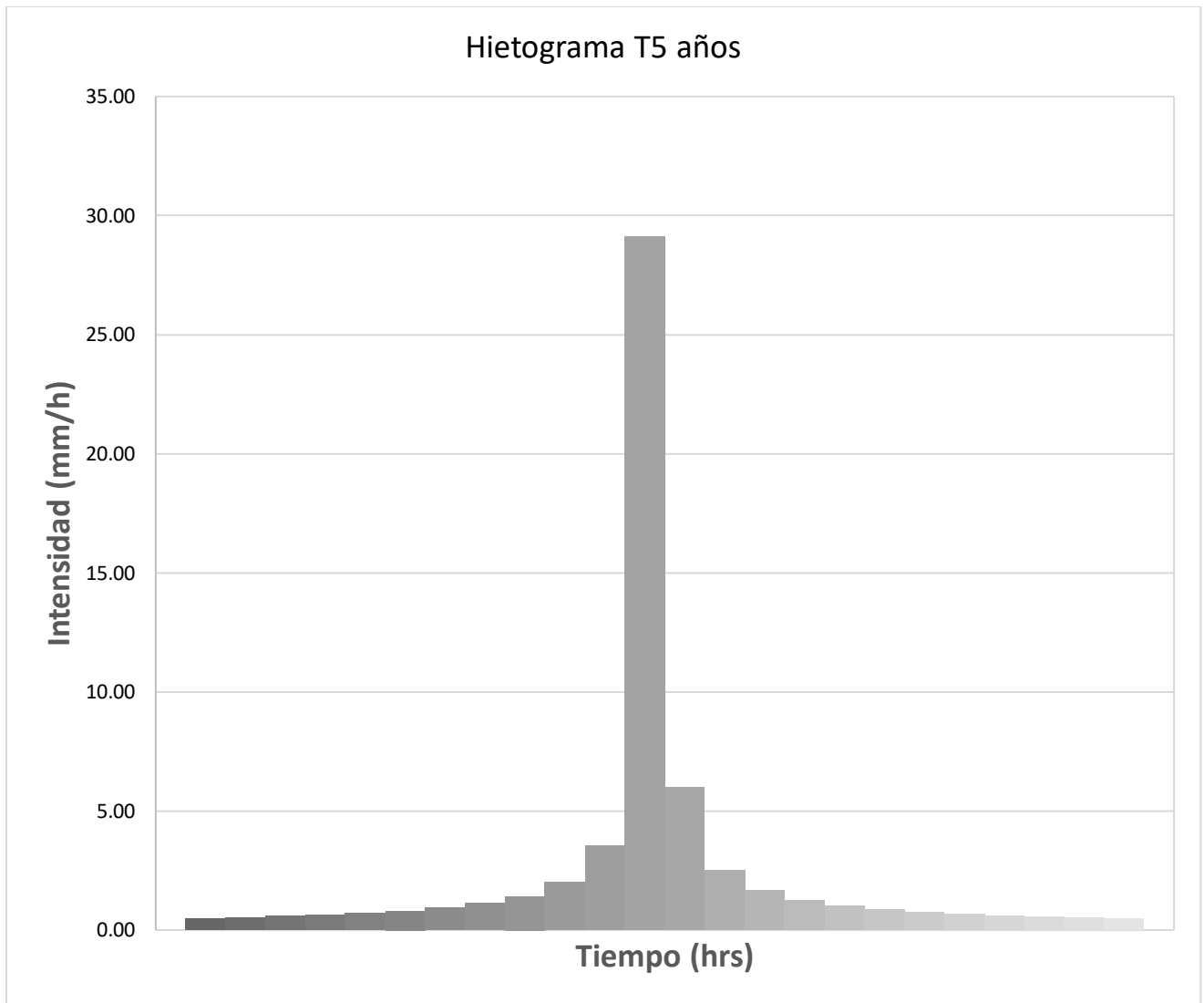


Figura 37 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 5 años

### 3.10 Curva número

Se muestra en las Tablas 24 y 25 que contiene los números de curvas (CN) obtenidos para los usos de suelo de las cuencas de Tlacolula y de San Luis de igual forma se aprecia 38 y 39 los tipos de suelo y uso de suelos que influyen en las cuencas. las Figuras Se puede observar que los CN para la cuenca de Tlacolula, que abarcan más superficie corresponden a 52 y 60, esto quiere decir que en la cuenca hay zonas con un medio tendiendo a alto grado de escurrimiento, tales como la zona urbana de Tlacolula y sus alrededores, además el aumento de los valores de CN tenderá a ser mayores debido a cambios en el uso de suelo, lo cual influye en el aumento en los gastos pico de los hidrogramas.

Por otro lado, para la cuenca de San Luis se puede observar que los números de curva con mayor presencia en superficie fueron 60 y 70, lo que indica que el CN promedio de la cuenca, corresponde a un índice medio a alto índice de escurrimiento. Además, en la cuenca se observó durante la visita de campo, que grandes extensiones de uso de suelo forestal se han modificado para el cultivo de maguey mezcalero. Finalmente, los valores de CN obtenido para la cuenca de Tlacolula fueron de 70 y para la cuenca de San Luis fue de 74.

Para la cuenca de Tlacolula su respectiva área y el número de curva resultante CN 70, esto representa que el área tiene un promedio medio alto de escurrimiento, debido a los suelos que se presentan en la zona, lo que esto significa que hay un mayor flujo de agua y menor infiltración, esto favorece la ocurrencia y afecta directamente a las inundaciones de la zona metropolitana en las zonas urbanas. Se puede observar que los números de curva más abundantes que tienen más área de superficie es 52 y 60, esto quiere decir que en la cuenca hay zonas con un alto grado de escurrimiento como en la zona metropolitana y sus alrededores de Tlacolula pero así también como en zonas habrá una mediana infiltración, una zona de infiltración medio alta, es en la zona de las montañas de la región, así como el uso de suelo que está cambiando actualmente como de asentamiento humano y agrícola de la región, esto influye directamente en los hidrogramas de diseño ya que este factor es ocupado en el programa HEC-HMS y el método de curva para obtener los caudales

### CAPÍTULO 3 RESULTADOS

De igual forma se puede observar el número de curva y sus respectivas áreas pertenecientes a la cuenca de San Luis CN 74, esto de igual forma se puede observar que el área de estudio tiene un índice medio alto de escurrimiento, debido a como se pudo apreciar en la sección de visita de campo los suelos de la región han sido modificados por el humano al convertir casi toda la zona en uso comercial del mezcal. Se puede observar que los números de curva con mayor presencia en superficie fueron 70 y 76 lo que eso nos da como el promedio del CN de la cuenca, lo que indica un índice medio alto de escurrimiento en la zona.

Esta información fue necesaria para poder utilizarla en el programa de HEC HMS y así obtener los hidrogramas de diseño para los periodos de retorno correspondientes.

*Tabla 24 Datos de la curva número para la cuenca de Tlacolula*

<i>Uso de suelo</i>	<i>Condición hidrológica</i>	<i>Tipo de suelo</i>	<i>Clasificación</i>	<i>CN</i>	<i>Área (km<sup>2</sup>)</i>	<i>CN*Área (km<sup>2</sup>)</i>
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	75	0.08	6.16
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BUENA	FEZEM HÁPLICO	B	75	4.60	344.79
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BUENA	LUVISOL CROMICO	C	82	5.50	450.87
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BUENA	LITOSOL	D	86	0.34	28.81
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BUENA	FEZEM CALCÁRICO	B	75	16.24	1218.34
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BUENA	FEZEM HÁPLICO	B	75	9.91	743.21
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	78	8.61	671.27
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	CAMBISOL HUMICO	B	78	0.14	11.14
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	FEZEM HÁPLICO	B	78	11.36	885.82
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	VERTISOL PÉLICO	D	89	23.33	2076.14
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	LITOSOL	D	89	12.29	1093.65

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	FEZEM CALCÁRICO	B	78	6.12	477.30
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	FEZEM HÁPLICO	B	78	10.13	790.51
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	78	2.80	218.03
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	BUENA	LUVISOL CROMICO	C	85	12.85	1092.65
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	BUENA	LITOSOL	D	89	50.44	4489.42
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	BUENA	FEZEM CALCÁRICO	B	75	17.08	1281.25
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	BUENA	FEZEM HÁPLICO	B	75	35.39	2653.93
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	CAMBISOL EUTRICO	B	86	1.43	122.98
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	CAMBISOL HÚMICO	B	86	0.58	50.03
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	FEZEM HÁPLICO	B	86	7.23	622.14
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	VERTISOL PÉLICO	D	86	2.36	203.04
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	LUVISOL CROMICO	C	86	0.81	69.26
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	LITOSOL	D	86	3.42	294.43
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	FEZEM CALCÁRICO	B	86	3.70	318.24
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	FEZEM HÁPLICO	B	86	2.39	205.95
BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	LITOSOL	D	69	3.39	233.60
BOSQUE DE PINO	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	52	0.15	7.76
BOSQUE DE PINO	BUENA	CAMBISOL HÚMICO	B	52	1.60	83.12
BOSQUE DE PINO-ENCINO	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	52	2.95	153.49
BOSQUE DE PINO-ENCINO	BUENA	CAMBISOL HÚMICO	B	52	4.37	227.06

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	59	24.73	1459.25
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	FEZEM HÁPLICO	B	59	1.01	59.45
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	VERTISOL PÉLICO	D	59	1.22	72.15
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	LITOSOL	D	59	0.79	46.86
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	FEZEM CALCÁRICO	B	59	4.75	280.05
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	13.79	827.25
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	VERTISOL PÉLICO	D	76	2.18	165.57
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	14.13	1074.14
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	FEZEM CALCÁRICO	B	60	1.66	99.88
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	5.79	347.33
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	2.60	197.45
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	REGULAR	FEZEM CALCÁRICO	B	60	0.66	39.61
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	REGULAR	CAMBISOL HÚMICO	B	60	0.00	0.06
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	3.98	238.68
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	CAMBISOL HÚMICO	B	60	2.76	165.89
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	9.39	714.02
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	52	79.41	4129.28
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	BUENA	LUVISOL VÉRTICO	C	63	0.11	6.87
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	BUENA	VERTISOL PÉLICO	D	69	0.01	0.81
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	BUENA	LITOSOL	D	69	56.17	3875.65

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	BUENA	FEOZEM CALCÁRICO	B	52	1.99	103.68
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	BUENA	FEOZEM HÁPLICO	B	52	0.03	1.43
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	52	12.76	663.56
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	CAMBISOL HÚMICO	B	52	2.83	147.22
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE	REGULAR	FEOZEM HÁPLICO	B	60	2.19	131.34
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE	REGULAR	LUVISOL CROMICO	C	70	1.07	75.03
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	52	1.23	63.81
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	BUENA	CAMBISOL HÚMICO	B	52	1.26	65.52
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	BUENA	LUVISOL VÁRTICO	C	63	0.00	0.15
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	BUENA	LITOSOL	D	69	0.02	1.23
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	28.01	1680.73
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	FEOZEM HÁPLICO	B	60	1.43	85.58
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	FEOZEM CALCÁRICO	B	60	7.43	445.78
					546.99	38389.67
					N=	<b>70</b>
					Grupo hidrológico=	B

### CAPÍTULO 3 RESULTADOS

*Tabla 25 Datos de la curva número para la cuenca de San Luis*

<i>Uso de suelo</i>	<i>Condición hidrológica</i>	<i>Tipo de suelo</i>	<i>Clasificación</i>	<i>CN</i>	<i>Área (km<sup>2</sup>)</i>	<i>CN*Área (km<sup>2</sup>)</i>
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	81	6.28	508.93
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	88	15.93	1402.10
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	LITOSOL	D	89	63.10	5616.22
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	REGULAR	CAMBISOL CROMICO	B	81	4.23	342.59
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	REGULAR	LITOSOL	D	79	5.75	454.23
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	REGULAR	CAMBISOL CROMICO	B	75	0.19	14.46
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	LUVISOL VÉRTICO	C	86	0.50	43.34
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	LITOSOL	D	86	1.32	113.69
ASENTAMIENTOS HUMANOS	MALA	CAMBISOL CROMICO	B	86	0.80	69.20
BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	LITOSOL	D	69	0.61	41.81
BOSQUE DE PINO	BUENA	LITOSOL	D	69	6.06	417.91
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	59	0.05	2.76
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	75	8.70	652.22
PASTIZAL INDUCIDO	REGULAR	LITOSOL	D	83	2.19	181.59
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	60	2.10	125.72
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	BUENA	LUVISOL VÉRTICO	C	73	7.26	530.17
SELVA BAJA CADUCIFOLIA	BUENA	LITOSOL	D	79	18.06	1426.84
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	70	8.70	608.75
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	56.15	4267.46

### CAPÍTULO 3 RESULTADOS

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	CAMBISOL EUTRICO	B	52	0.22	11.69
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	LUVISOL VÉRTICO	C	63	0.07	4.51
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	BUENA	LITOSOL	D	69	12.24	844.57
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO	BUENA	LITOSOL	D	69	22.94	1582.74
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	5.15	308.77
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	70	11.90	833.07
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	25.28	1921.53
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	70	2.48	173.58
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	LITOSOL	D	76	105.82	8042.18
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	14.57	873.99
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	70	23.43	1639.75
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	138.55	10530.06
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	CAMBISOL CROMICO	B	60	1.08	64.99
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	REGULAR	CAMBISOL CROMICO	B	60	0.33	19.91
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	6.17	370.40
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	70	26.06	1824.49
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	BUENA	LITOSOL	D	69	40.40	2787.83
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	CAMBISOL EUTRICO	B	60	11.61	696.44
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	LUVISOL VÉRTICO	C	70	40.75	2852.64

### CAPÍTULO 3 RESULTADOS

VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	REGULAR	LITOSOL	D	76	16.20	1230.93
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	LUVISOL VERTICO	C	70	12.33	862.78
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA	REGULAR	LITOSOL	D	76	1.14	86.44
					726.705	54383.3
					N=	<b>74</b>
					Grupo hidrológico=	B

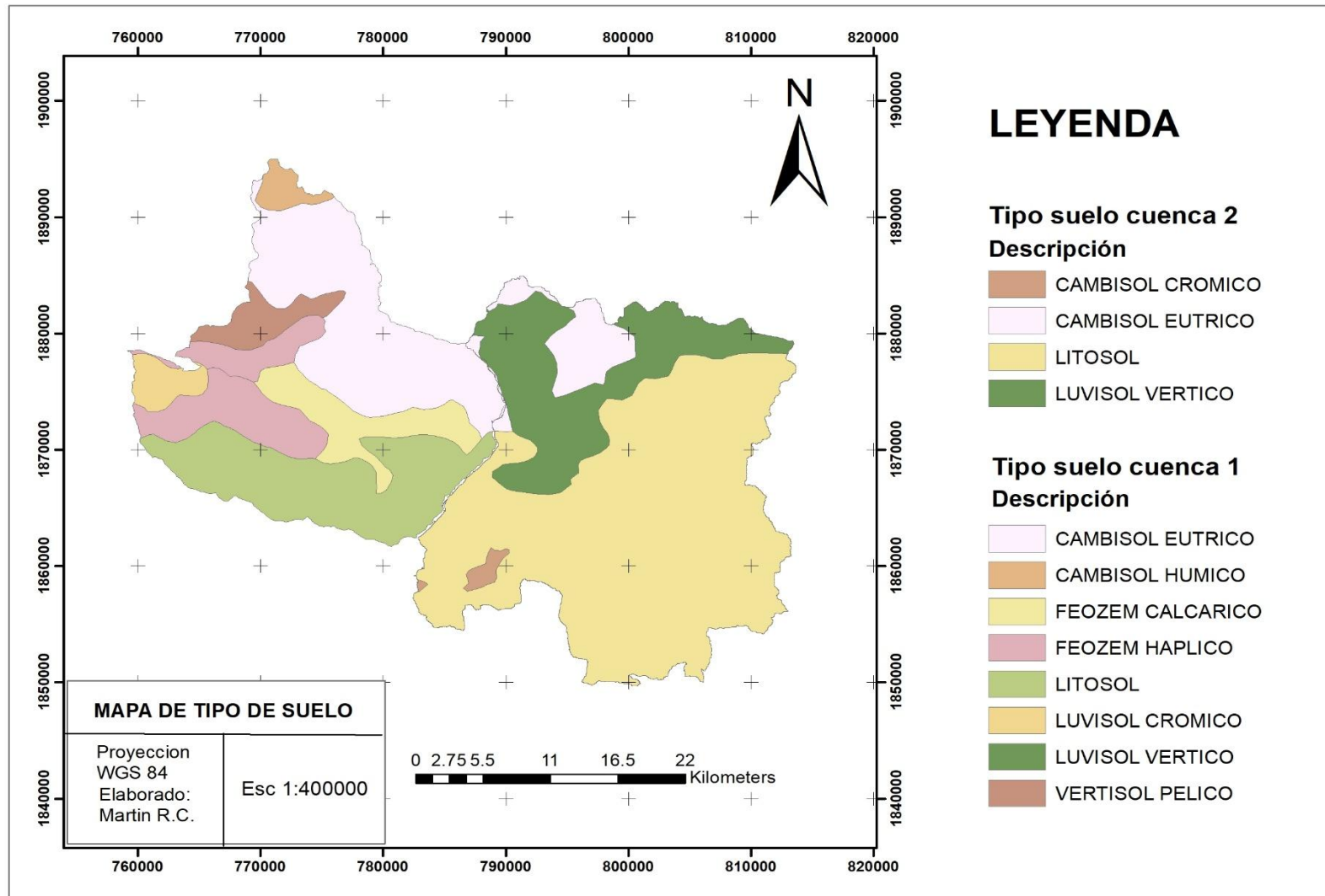
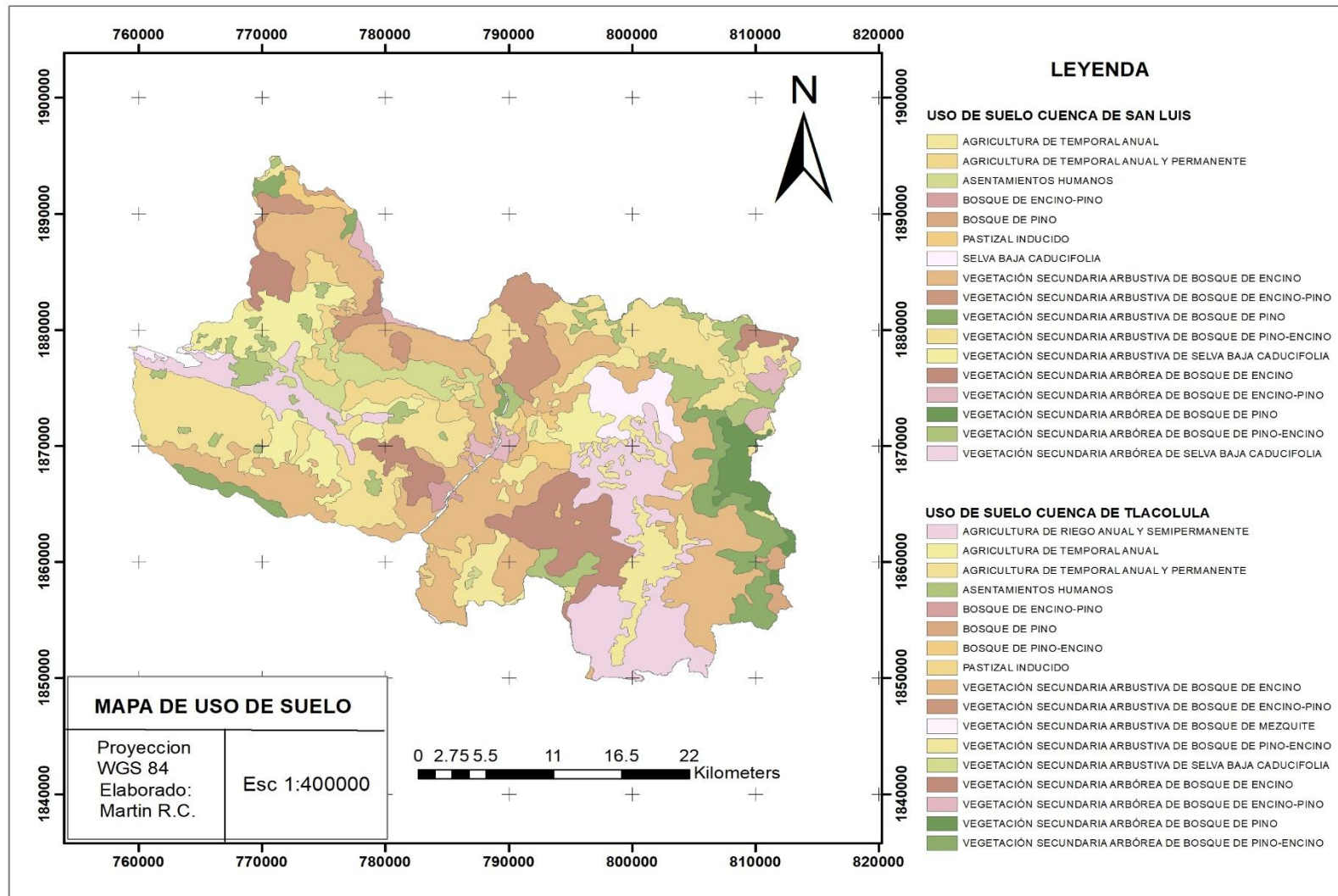


Figura 38 Mapa de tipos de suelo

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS



*Figura 39 Mapa de uso de suelo*

### 3.11 Hidrogramas de diseño

En la Figura 40 se muestran los hidrogramas de diseño para la cuenca de Tlacolula y sus respectivos periodos de retorno. Como se puede apreciar en las primeras horas el caudal es nulo hay a partir de las 11 horas, las curvas comienzan a ascender, de tal forma que los tiempos pico se tienen a las 15 horas en un lapso del escurrimiento de 42 horas para cada una de las cuencas. Para el periodo de retorno de 5 años el gasto pico es de 137.4 m<sup>3</sup>/s, mientras que para el periodo de retorno de 100 años el gasto pico es de 719.6 m<sup>3</sup>/s.

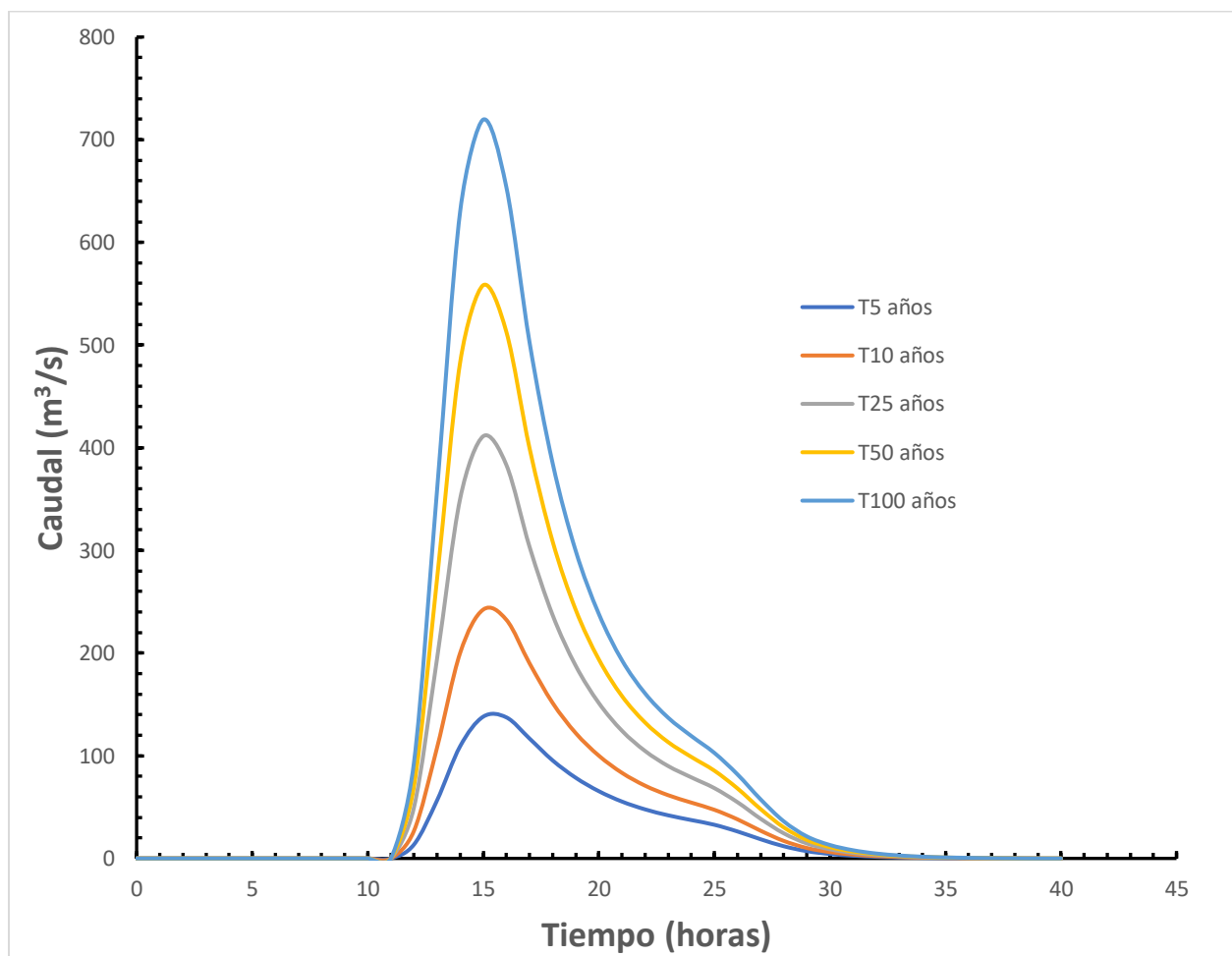


Figura 40 Caudales de diseño de la cuenca de Tlacolula

De igual forma, en la Figura 41, se pueden apreciar los hidrogramas de la cuenca de San Luis asociados a distintos periodos de retorno. Dado que esta cuenca es la de mayor área, los gastos

picos obtenidos son mayores en comparación de los gastos de Tlacolula. Además, la mayor parte de la superficie tiene valores de número de curva mayor a 70, lo que indica mayor flujo y menos infiltración. El gasto pico para el período de retorno de 5 años es de  $302.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que para el período de retorno de 100 años es de  $1107.4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

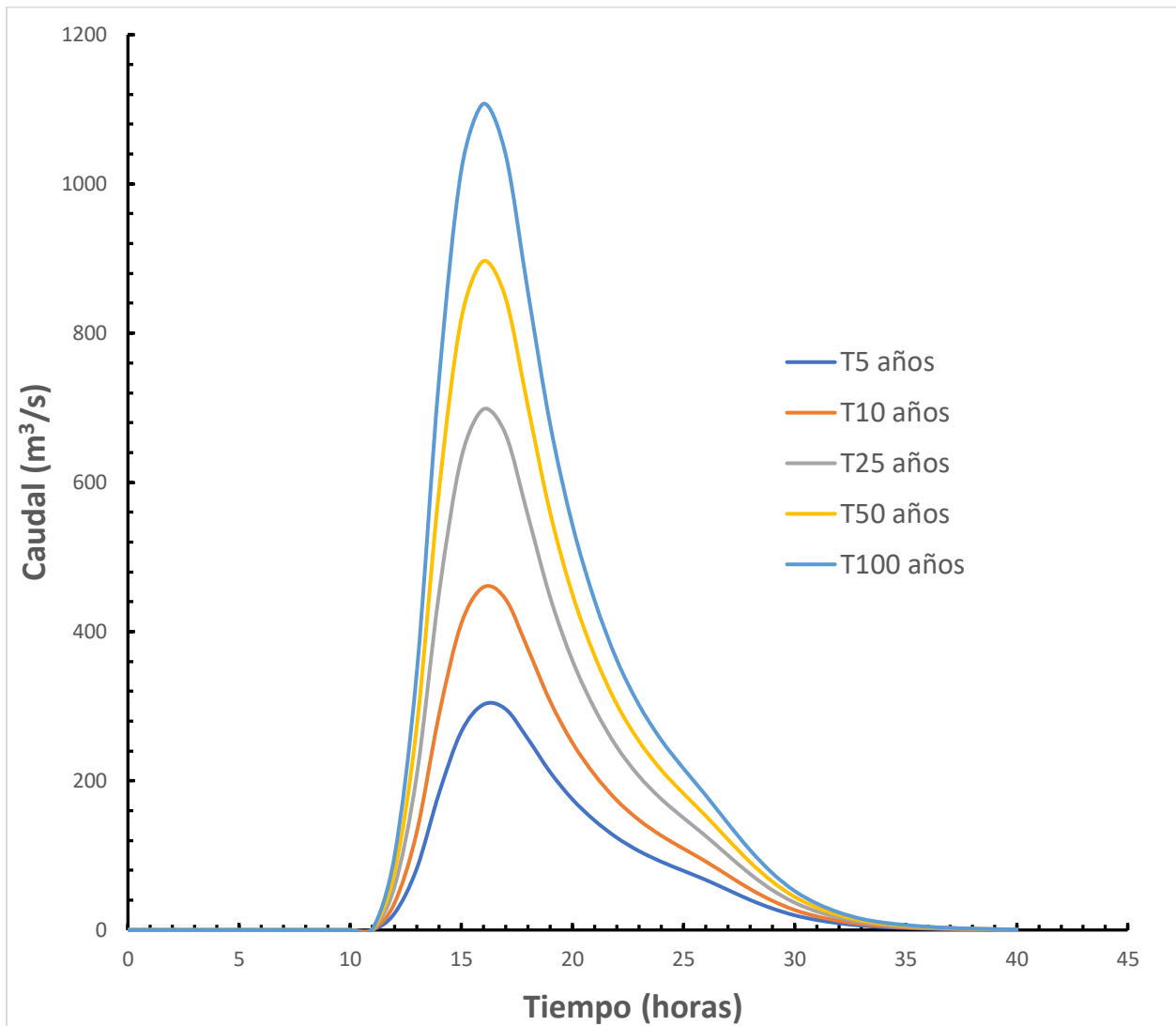


Figura 41 Caudales de diseño de la cuenca de San Luis

### 3.12 Mapas de inundación

Para la zona urbana de Tlacolula, se muestran las áreas de inundación (Figura 42, 46, 47 y 48) obtenidas para los periodos de retorno para 5, 10, 25 y 50 años, de acuerdo al Sistema nacional de protección civil centro nacional de prevención de desastres, sobre el río seco, se muestra una altura mínima de 0.001 metros y una altura máxima de 13 metros aproximadamente, en un caso extremo en el inicio de la inundación se puede apreciar en las fotos que se desborda en el área del río y llega alcanzar zonas urbanizadas (casas, campos de siembra etc.).

Las diferentes superficies para cada inundación (periodos de 5, 10, 25 y 50 años) se muestra en las Tablas 26, 27, 28 y 29. Se puede apreciar que el área de las inundaciones fue de 121.57 ha para un período de 50 años. Las zonas aguas abajo del río son las más susceptibles a inundaciones. Se observa en los mapas de inundación que entre mayor es el periodo de retorno mayor área de inundación se presenta, así como una altura mayor por cada área. Cabe mencionar que para una precisión más exacta de la inundación se necesita de trabajo de campo, de un levantamiento topográfico en la zona con estación total o Gns Rtk. En las Figuras 49 y 50 se aprecian sitios con posibles riesgos de inundación para el valle de Tlacolula en los cuales se recomienda, que en estos sitios se tomen las debidas precauciones, así como estructuras hidráulicas para la disminución de posibles desastres.

*Tabla 26 Altura de elevaciones de inundación para 5 Años*

TR 5 AÑOS		
Área (ha)	Metros de profundidad	
17.01	0.001	1.033
10.93	1.033	2.693
3.88	2.693	5.251
2.49	5.251	8.391
0.35	8.391	11.44
Total= 34.66		

Tabla 27 Altura de elevaciones de inundación para 10 Años

TR 10 AÑOS		
Área (ha)	Metros de profundidad	
35.73	0.001	1.157
14.97	1.157	2.801
6.35	2.801	5.024
3.67	5.024	7.602
1.37	7.602	11.34
Total=62.09		

Tabla 28 Altura de elevaciones de inundación para 25 Años

TR 25 AÑOS		
Área (ha)	Metros de profundidad	
32.76	0.001	0.733
18.50	0.733	1.924
12.53	1.924	3.526
4.71	3.526	5.769
3.23	5.769	11.67
Total=71.73		

Tabla 29 Altura de elevaciones de inundación para 50 Años

TR 50 AÑOS		
Área (ha)	Metros de profundidad	
68.20	0.001	0.945
26.58	0.945	2.503
16.34	2.503	4.959
6.80	4.959	8.217
3.65	8.217	12.04
Total=121.57		

Es notorio el cambio de profundidad con respecto al período de retorno, entre mayor es el período se espera una mayor inundación en la zona, por eso se muestra a continuación las zonas calles y barrios más afectados para la zona de Tlacolula.

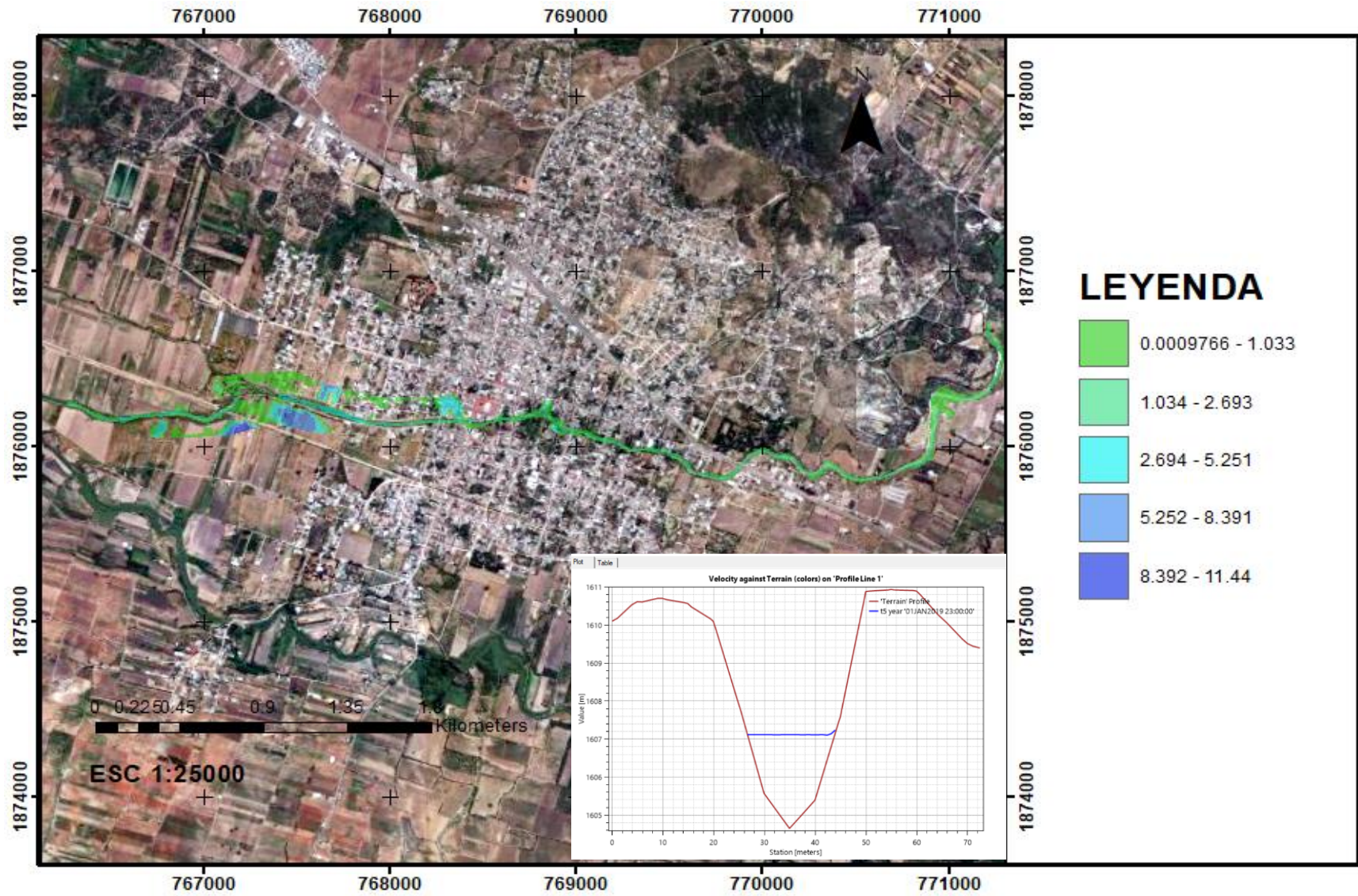


Figura 42 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un periodo Tr 5 años

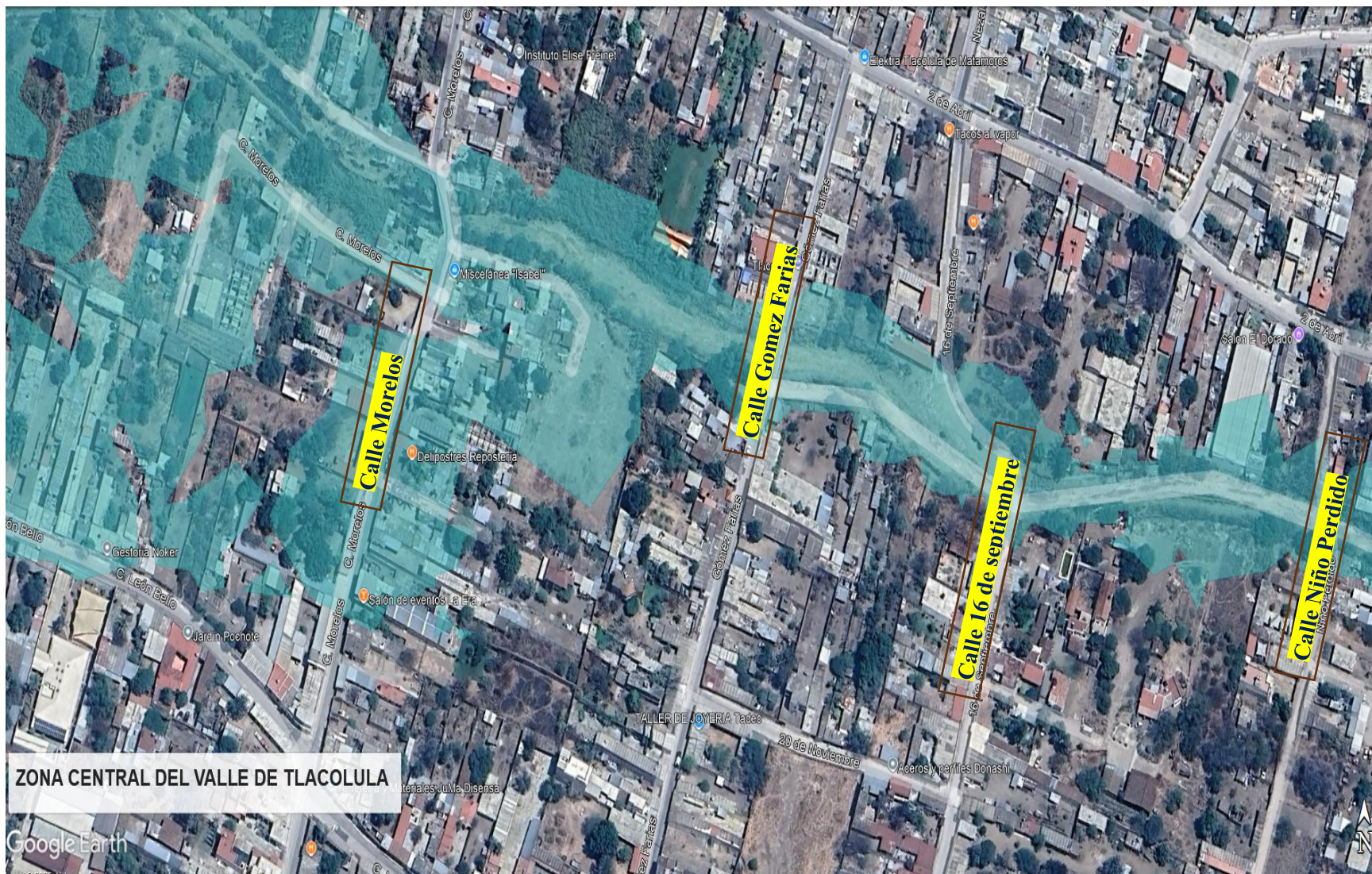


Figura 43 Zona de inundación 1

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS

Las calles que se ven afectadas en la zona son las que se muestran en la Figura 44 Calle niño perdido, Calle 16 de septiembre, Calle Gómez Farias y Calle Morelos.



Figura 44 Zona de inundación 2

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS

Las calles con mayor área de afectación son las siguientes: Calle Quintana Roo, Calle León Bello, Calle Tacubaya, Calle Aldama, Calle Mariano Matamoros, Calle del sur, Calle Diaz Ordaz, Calle Santos Degollado y Calle Vicente Guerrero

En la última sección se puede apreciar las siguientes calles las cuales las más afectadas por la inundación son: Calle Moctezuma, Calle Bugambilias, Calle 2 de abril, Avenida ferrocarril, Calle Genaros, Calle Margaritas, Calle 8 de diciembre y Calle Aurora.

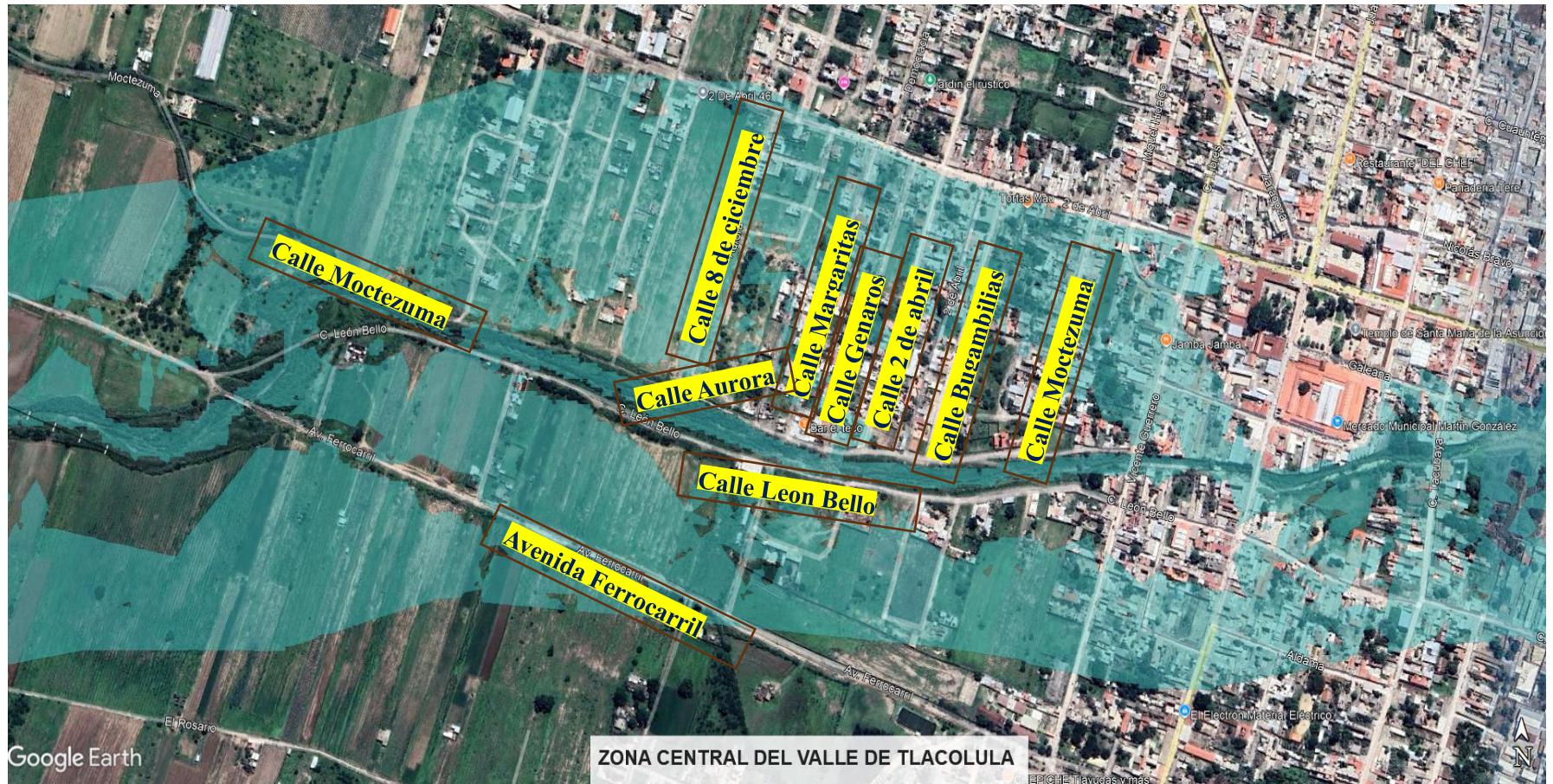


Figura 45 Zona de inundación 3

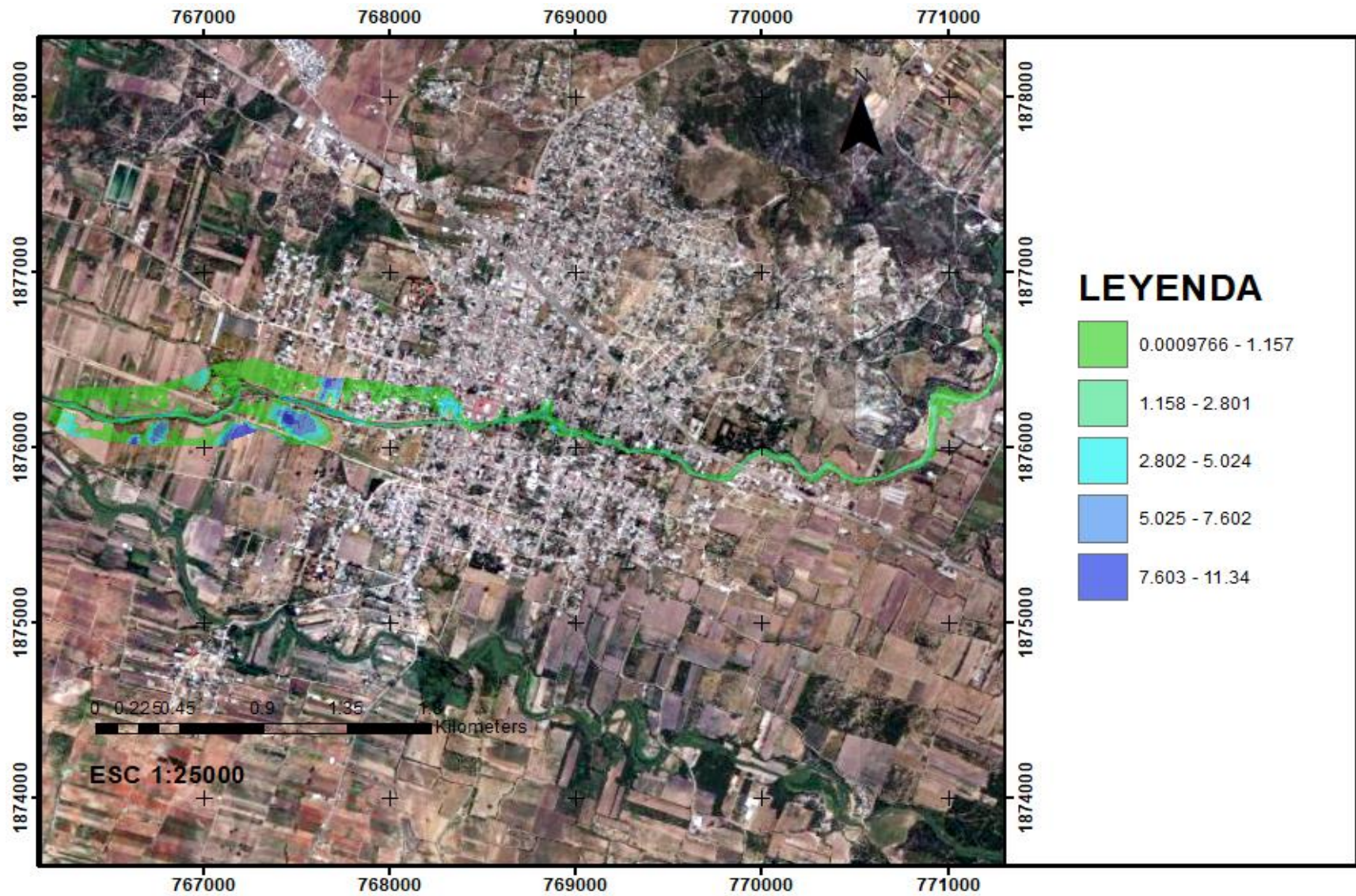


Figura 46 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un período  $Tr$  10 años

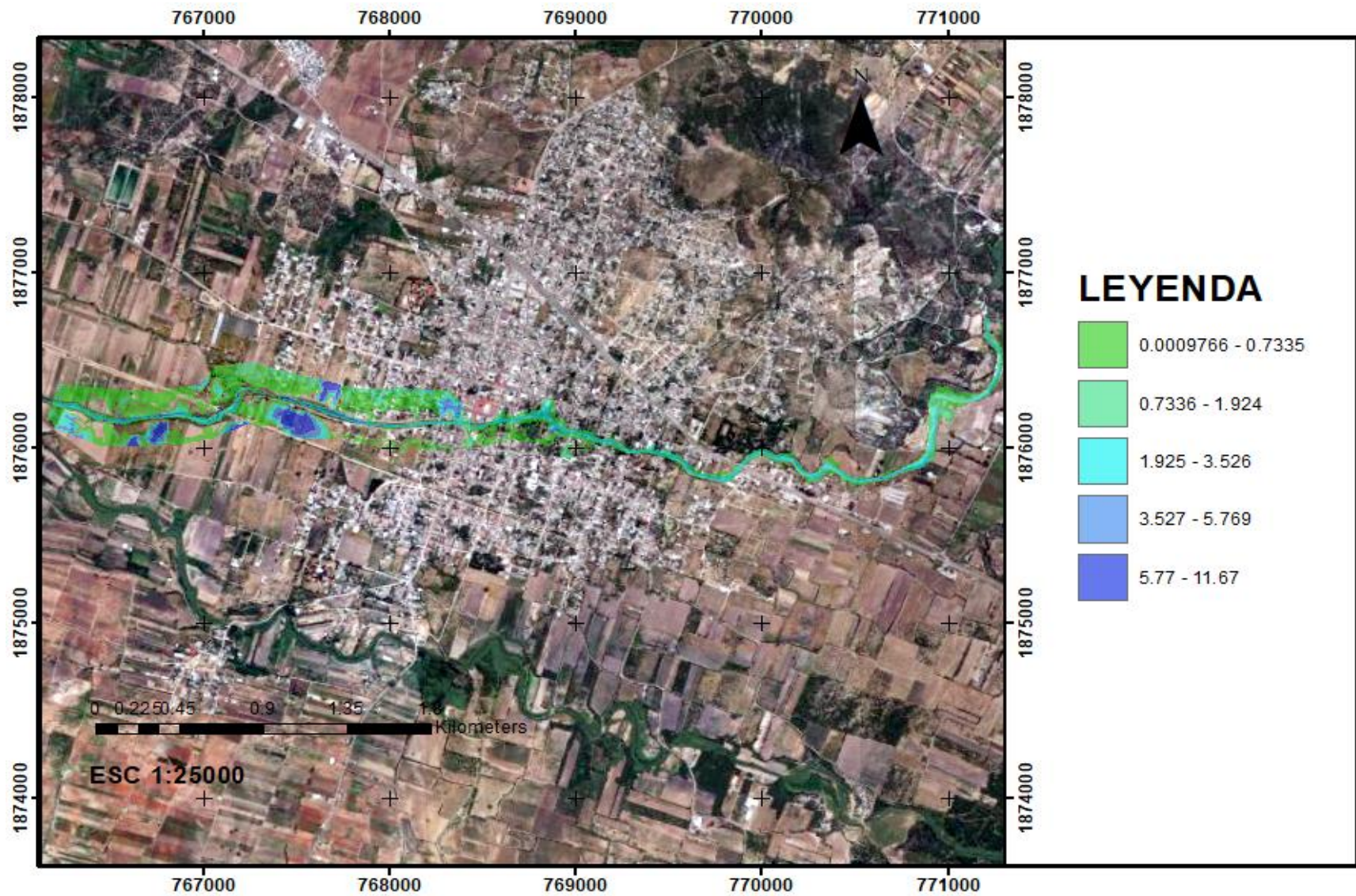


Figura 47 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un período  $T_r$  25 años

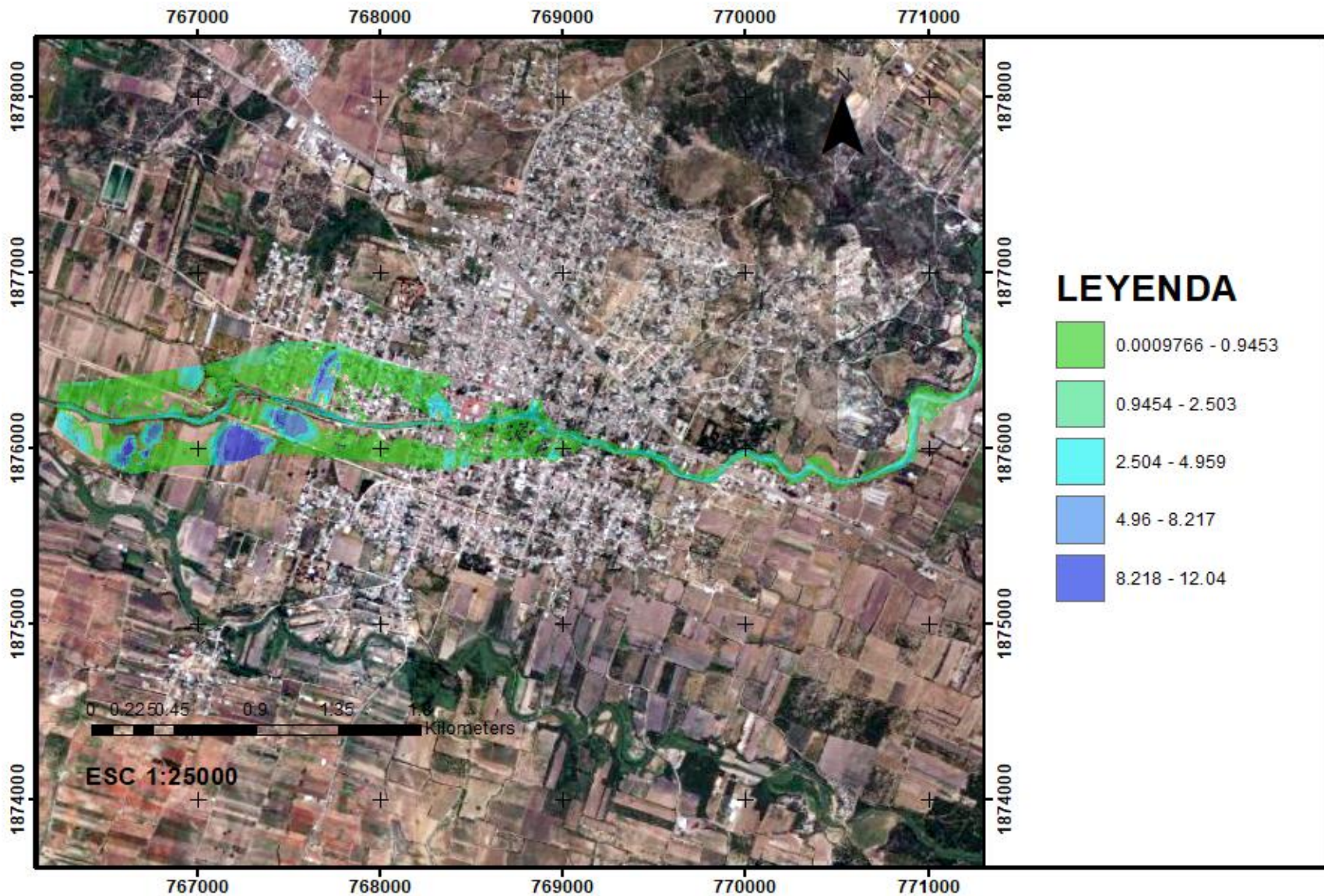


Figura 48 Mapa de inundación de la zona de Tlacolula para un periodo  $Tr$  50 años

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

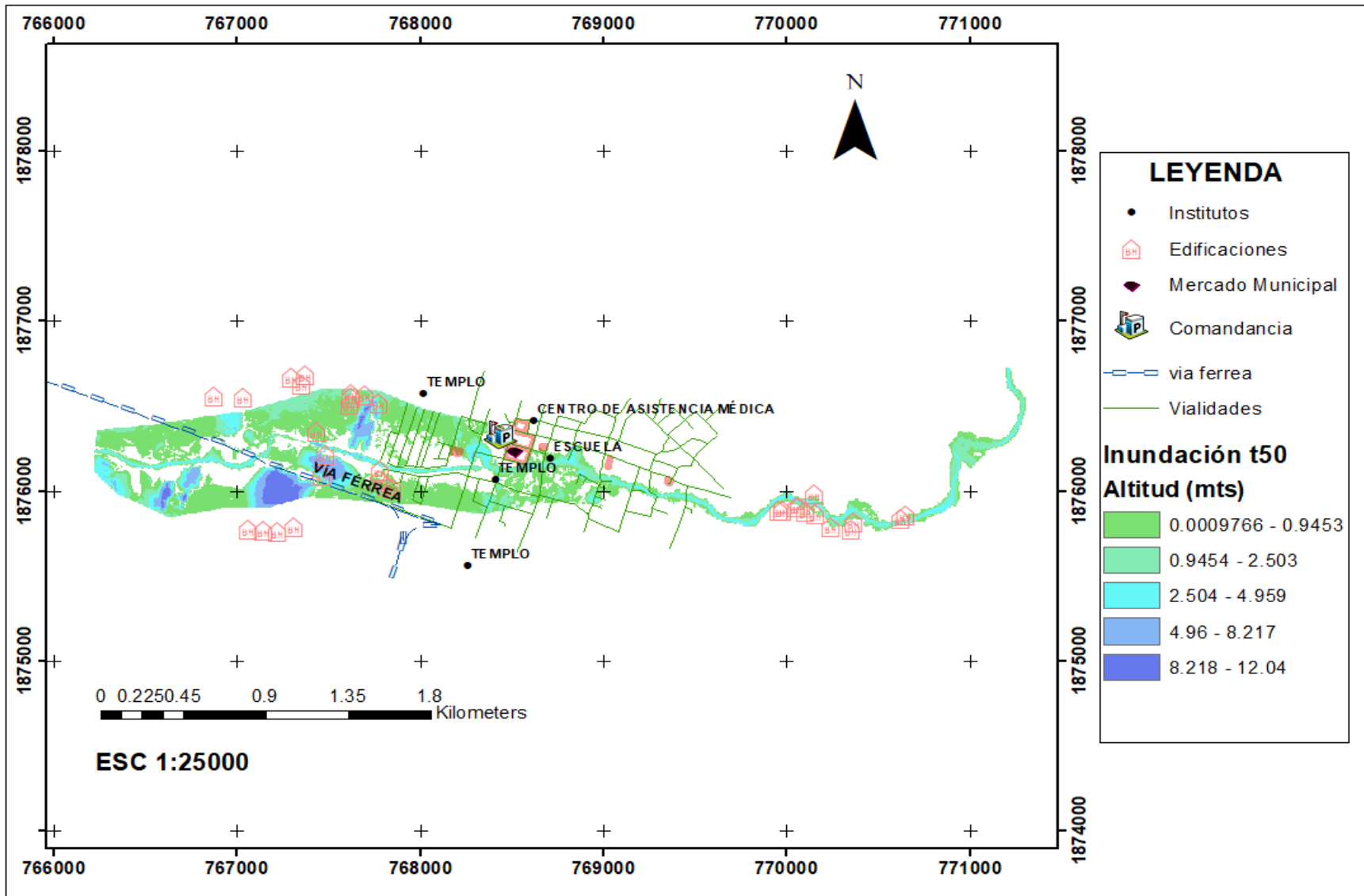


Figura 49 Edificios e instituciones en riesgo por inundación para un Tr de 50 años



*Figura 50 Sitios con posible riesgo de inundación para un Tr de 50 años*

## 4.0 CONCLUSIONES

Se delimitaron dos cuencas para el municipio de Tlacolula de Matamoros, la primera llamada cuenca de Tlacolula con un área de  $546.99 \text{ km}^2$ , con una longitud del cauce principal de  $40.20 \text{ km}$  y un tiempo de concentración de 5.99 horas. La segunda cuenca llamada cuenca de San Luis con un área de  $726.70 \text{ km}^2$ , con una longitud del cauce principal de  $49.09 \text{ km}$  y un tiempo de concentración de 6.36 horas estos parámetros geomorfológicos fueron indispensables para obtener la información de los caudales y mapas de inundación.

Se analizaron 25 estaciones cercanas a la zona de influencia de la cuenca en donde solamente 9 teniendo información del periodo que comprende de 1961 y 1985, estas estaciones fueron seleccionadas para obtener la información de precipitación. Una de las dificultades fue que solamente una estación se encontraba en el área de las cuencas de igual forma no existe cerca de las zonas de estudio una estación hidrométrica.

Las series de lluvia máxima, la función que mejor se ajustó para la mayoría de cada una de las 9 estaciones fue la GVE (función general de valores extremos), teniendo en cuenta que el error estándar de ajuste fue menor del 10%, excepto para una que la mejor función fue Log Pearson, los periodos que se ocuparon para obtener la lluvia media anual fueron 10, 25, 50 y 100 años. Por medio de método de las isoyetas se obtuvieron las lluvias máximas a 24 horas promedio de las cuencas, cuales fueron para la cuenca de Tlacolula 69.72 mm, 82.66 mm, 94.24 mm y 107.20 mm, y para la cuenca de San Luis son 80.69 mm, 96.04 mm, 108.12 mm y 121.93 mm para los periodos de diseño de 10, 25, 50 y 100 años respectivamente.

De las curvas I-D-T se obtuvieron las intensidades para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, para diferentes duraciones de 5, 10, 15, 25, 20, 30, 60, 80, 100, 120 y 1440 minutos, cabe mencionar en donde la intensidad para la cuenca de Tlacolula fue de 4.5 mm/h, y para la cuenca de San Luis se obtuvo una intensidad 4.80 mm/h, para el periodo de 100 años y una duración de 1440 min.

Se obtuvieron los hidrogramas de diseño para los periodos de diseño 5, 10, 25, 50 y 100 años para la cuenca de Tlacolula y de San Luis, en lo cual los tiempos base fueron de 26 horas para la cuenca de Tlacolula y 32 horas para la cuenca de San Luis, teniendo una duración total de 42 y 44 horas

respectivamente de las cuencas, las cuales los caudales picos para la cuenca de Tlacolula fue de  $138.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $242.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $411.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $558.3 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $719.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , para los períodos de retorno que he mencionado arriba y para la cuenca de San Luis se obtuvieron  $302.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $459.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $698.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $896.6 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1107.4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Se generaron los mapas de inundación para la zona centro del valle de Tlacolula en el río seco, para los períodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años, en la cual las calles que presentan más riesgo son afectada Calle Moctezuma, Calle Bugambilias, Calle 2 de abril, Avenida ferrocarril, Calle Genaros, Calle Margaritas, Calle 8 de diciembre y Calle Aurora. En la cual para un período de 5 años la altura máxima de agua fue de 11.44 metros, para el de 10 años una altura máxima de 11.34 metros, pero con una superficie mayor que la del periodo de 5 años, para un período de 25 años la altura fue de 11.87 metros y finalmente para el período de 50 años fue de 12.04 metros, abarcando una superficie total de inundación de 121.57 ha. Los mapas de inundación los riesgos de inundación se pueden disminuir si se considera un manejo hidráulico adecuado en los ríos, bajo un manejo integral de cuencas, en el cual el instituto de hidrología de la Universidad tecnológica (UTM) cuenta con un proyecto.

Cabe recalcar que con esta información es de suma importancia para eventos de inundación, prever desastres y también para la infraestructura hidráulica de la región. Y puede ser como base para ver la disponibilidad de agua en la zona, en base a esta información se podrá estimar sitios de almacenamiento de captación de agua.

## 5.0 REFERENCIAS

- Alvarez, G., Licona, B. M., & Martinez, S. R. (2007). Predicción de lluvias máximas para la República Mexicana mediante modelos probabilístico no estacionarios. *Tecnología y ciencias del agua*, 179-214.
- Aparicio, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología Superficial*. D.F. México: EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V.
- Atlas de riesgos, A. (24 de julio de 2022). *Gobierno Municipal de Tlacolula de Matamoros*. Obtenido de Atlas de riesgos natural: <https://www.tlacolula.gob.mx/atlas-de-riesgos>
- Campos, A. (1984). *Procesos del ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Campos, A. D. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. San Luis Potosí, México, San Luis Potosí, México : Printego.
- Chaves y Binnqüist, M. (2013). La huella hídrica agrícola en los Valles de Etna, Zimatlán y Tlacolula, Oaxaca. *UAM Xochimilco*, 38.
- Chow, A. (2011). 1-h urban design storm for Canada. *Departamento de ingeniería civil*, 293-300.
- Chow, V. (1988). *Applied Hydrology*. New York : McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.
- CONABIO, C. (SUELOS Y VEGETACIÓN). *SUELOS Y VEGETACIÓN*. MÉXICO: CONABIO.
- CONAGUA. (27 de Marzo de 2015). *Diario oficial de la federación*. Obtenido de Diario oficial de la federación: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0)
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valles Centrales*. Oaxaca: SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA.
- CONAGUA, C. (20 de JUNIO de 2023). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua: <https://sina.conagua.gob.mx>
- CONAGUA, C. (26 de JUNIO de 2025). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de CONAGUA.
- Enciclopedia de los Municipios de México, E. (2001). *Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal*. Oaxaca: WaybackMachine.

- Escalante, C. A., & Reyes, L. (2002). *Técnicas estadísticas en Hidrología*. México: UNAM.
- Gobierno Municipal de Tlacolula de Matamoros. (20 de JUNIO de 2010). *Huracán Carlotta*. Obtenido de Atlas de riesgos natural: <https://www.tlacolula.gob.mx/atlas-de-riesgos>
- Gómez, G. (2020). Caracterización de una cuenca, Principios y métodos. Ciudad de México, México, México. Obtenido de Caracterización de una cuenca, Principios y métodos.
- Hernandez, J. (2019). Distribución espacial de variables. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11.
- Hídricos, D. d. (2010). *Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac*. Lima.
- INECC. (s.f.). *PLACC (La Plataforma de Cuencas y Cambio Climático)*. Obtenido de PLACC: <https://placc.inecc.gob.mx/index.html#/>
- INEGI. (21 de Enero de 2020). *EcuRed*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Tlacolula\\_de\\_Matamoros\\_\(M%C3%A9xico\)](https://www.ecured.cu/Tlacolula_de_Matamoros_(M%C3%A9xico))
- INEGI. (s.f.). *INEGI*. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI, I. (2004). *Síntesis de Información geográfica del estado de Oaxaca*. Oaxaca: INEGI.
- INEGI, I. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía : edafología : escala 1:250 000, Serie III*. Obtenido de Guía para la interpretación de cartografía : edafología : escala 1:250 000, Serie III: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825076221.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825076221.pdf)
- INEGI, I. (20 de JUNIO de 2020). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Conjunto de datos vectoriales edafológicos: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (20 de JUNIO de 2020). *INEGI*. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, I. (20 de JUNIO de 2020). *Microdatos del Censo de Población y Vivienda 2020*. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>
- Llamas, J. (1989). *Hidrología general*. Toluca, Estado de México: Printed and made in México.
- MVM Noticias. (18 de Octubre de 2023). *MVM Noticias*. Obtenido de MVM Noticias: <https://mvmnoticias.com/deja-inundaciones-en-tlacolula-onda-tropical-numero-31/>
- RIO, A. (18 de septiembre de 2021). *RIOAXACA*. Obtenido de RIOAXACA: <https://www.rioaxaca.com/2021/09/18/lluvias-en-tlacolula-deja-inundaciones/>

- SCT, S. (1990). *Isoyetas de Intensidad-Duración-Frecuencia*. D.F, México : Subsecretaria de infraestructura.
- SUELOS Y VEGETACIÓN, C. (2020). *SUELOS Y VEGETACIÓN*. México: SUELOS Y VEGETACIÓN .
- TOXTLI , E. (2006). *Estudio geohidrológico de la microcuenca Tilquiapam-Ocotlan de Morelos Oaxaca*. México: UNAM, DIRECCION GENERALES DE BIBLIOTECA.
- Villodas, R. (2008). *Hidrología (unidad cuencas)*. Argentina: Mendoza Argentina.

## 6.0 ANEXOS

### 6.1 Pruebas de independencia y homogeneidad

*Tabla 30 Pruebas de homogeneidad Cuajimoloyas 20023*

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	24	MEDIA	52.846
NÚMERO DE SECUENCIAS	14	NÚMERO DE CAMBIOS	9
COMO (S-C)	5	RAÍZ	9
LA MUESTRA NO ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	12	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	12
MEDIA	49.25	MEDIA	56.442
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	12.224	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	21.489
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			-0.965
GRADOS DE LIBERTAD	22	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.07
CÓMO TD<T STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>METODO DE CRAMER</b>			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	14	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	54.771	MEDIA	54.114
TAO60	0.1101	TAO30	0.0722
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	3.45	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	0.6585
GRADOS DE LIBERTAD	19	GRADOS DE LIBERTAD	2.093
COMO T60>T NO ES HOMOGÉNEO		COMO T30>T ES HOMOGÉNEO	

Figura 51 Gráfica de independencia Cuajimoloyas 20023

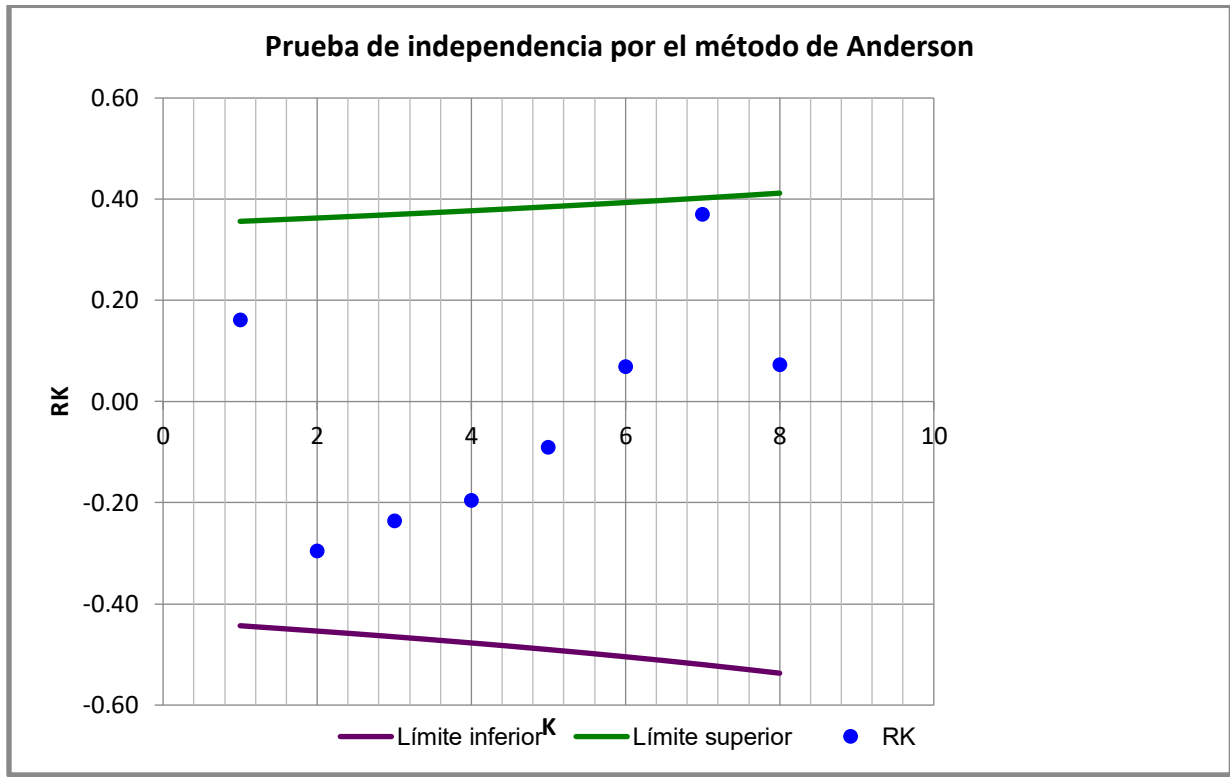


Tabla 31 Pruebas de independencia Ayutla 20007

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	20	MEDIA	73.54
NÚMERO DE SECUENCIAS	9	NÚMERO DE CAMBIOS	10
COMO (S-C)	-1	RAÍZ	4.4
LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	10	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	10
MEDIA	72.33	MEDIA	74.75
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	20.735	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	21.568
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			-0.243
GRADOS DE LIBERTAD	18	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.1
CÓMO TD < T STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE CRAMER			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	12	NÚMERO DE VALORES	6
MEDIA	75.008	MEDIA	70.95
TAO60	0.072118	TAO30	-0.125
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	1.9366	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	0.9751
GRADOS DE LIBERTAD	16	GRADOS DE LIBERTAD	2.12
COMO T60<T ES HOMOGÉNEO		COMO T30<T ES HOMOGÉNEO	

Figura 52 Gráfica de independencia de Ayutla 20007

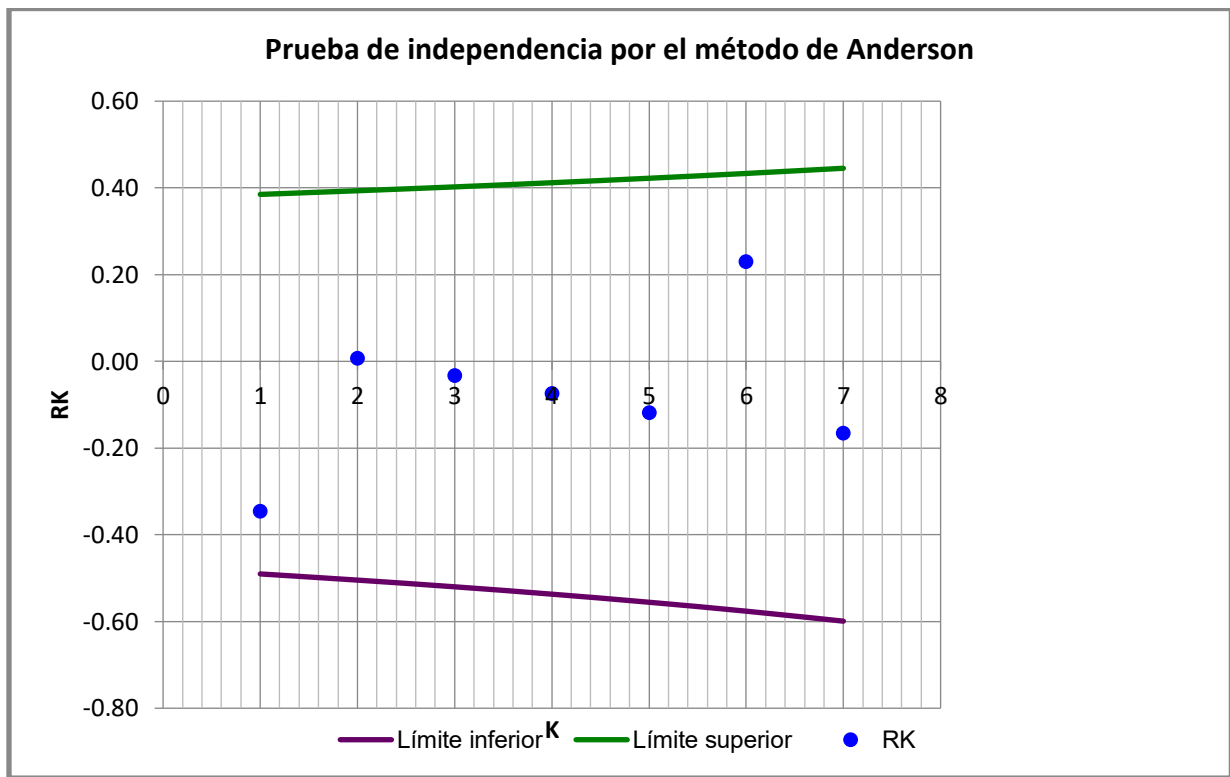


Tabla 32 Pruebas de homogeneidad Totolapan 20170

MÉTODO HELMER			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	25	MEDIA	43
NÚMERO DE SECUENCIAS	13	NÚMERO DE CAMBIOS	11
COMO (S-C)	2	RAÍZ	4.9
LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE T DE STUDENT			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	12	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	13
MEDIA	37.92	MEDIA	47.69
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	16.02	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	19.64
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			-1.3
GRADOS DE LIBERTAD	23	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.07
COMO $TD < T$ STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE CRAMER			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	15	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	45.33	MEDIA	54.29
TAO60	0.13	TAO30	0.62
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	4.5	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	6.47
GRADOS DE LIBERTAD	20	GRADOS DE LIBERTAD	2.08
COMO $T60 > T$ NO ES HOMOGÉNEO		COMO $T30 > T$ NO ES HOMOGÉNEO	

Figura 53 Gráfica de independencia Totolapan 20170

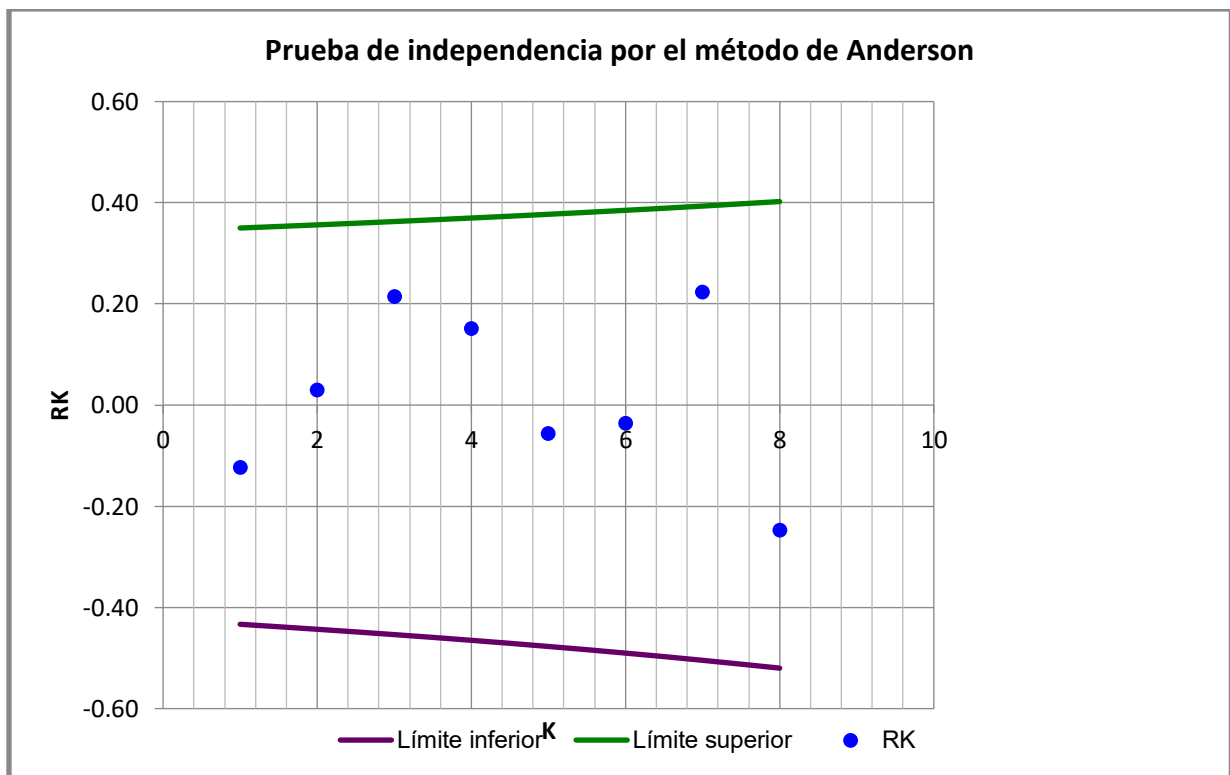


Tabla 33 Pruebas de homogeneidad villa de hidalgo 20179

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	19	MEDIA	59.47
NÚMERO DE SECUENCIAS	9	NÚMERO DE CAMBIOS	9
COMO (S-C)	0	RAÍZ	4.2
LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	9	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	10
MEDIA	60.27	MEDIA	58.67
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	23.94	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	16.13
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			0.163
GRADOS DE LIBERTAD	17	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.11
COMO TD<T STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE CRAMER</b>			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	11	NÚMERO DE VALORES	6
MEDIA	62.23	MEDIA	61.95
TAO60	0.16	TAO30	0.13
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	3.96	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	1.02
GRADOS DE LIBERTAD	15	GRADOS DE LIBERTAD	2.13
COMO T60>T NO ES HOMOGÉNEO		COMO T30<T ES HOMOGÉNEO	

Figura 54 Gráfica de independencia Villa de Hidalgo 20179

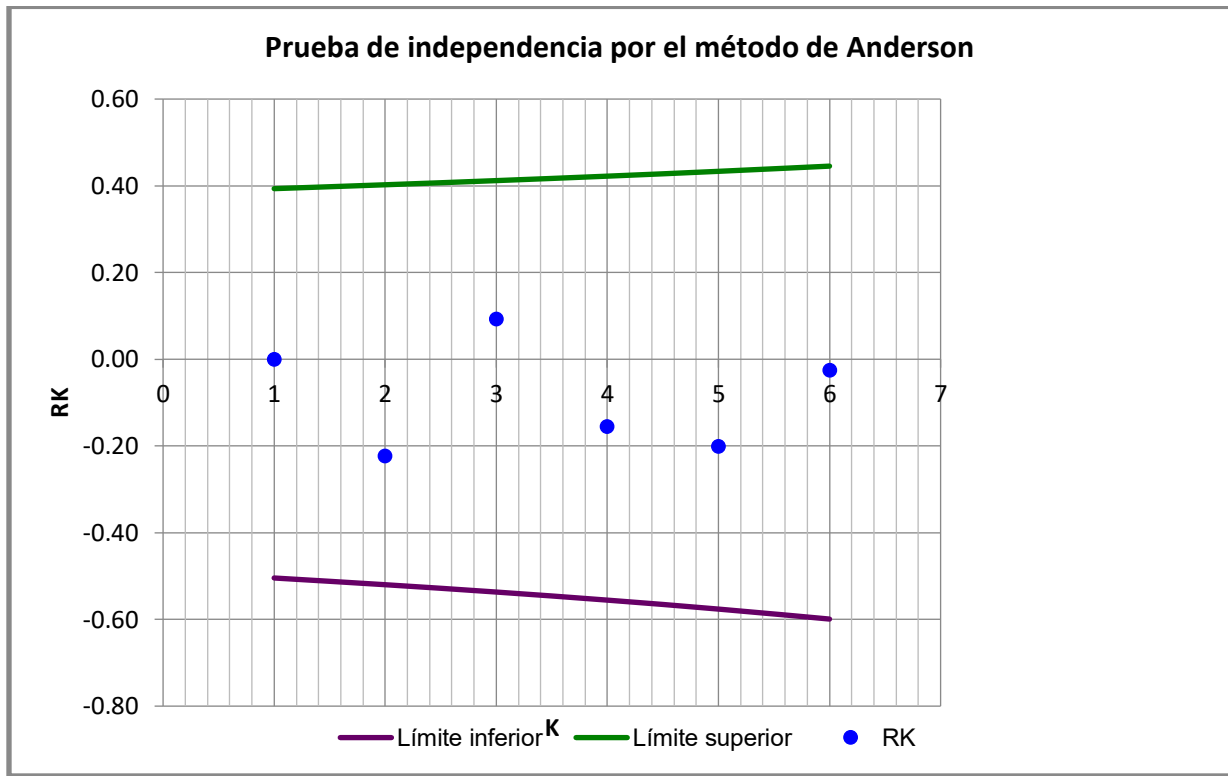


Tabla 34 Pruebas de homogeneidad San Jerónimo Taviche 20109

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	24	MEDIA	57.19
NÚMERO DE SECUENCIAS	13	NÚMERO DE CAMBIOS	10
COMO (S-C)	3	RAÍZ	4.8
LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	12	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	12
MEDIA	64.58	MEDIA	49.79
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	28.31	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	19.88
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			1.42
GRADOS DE LIBERTAD	22	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.07
CÓMO $TD < T$ STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE CRAMER			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	14	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	51.036	MEDIA	50.71
TAO60	-0.25	TAO30	-0.26
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	8.25	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	2.4
GRADOS DE LIBERTAD	19	GRADOS DE LIBERTAD	2.09
COMO T60>T NO ES HOMOGÉNEO		COMO T30>T NO ES HOMOGÉNEO	

Figura 55 Grafica de independencia San jerónimo Taviche 20109

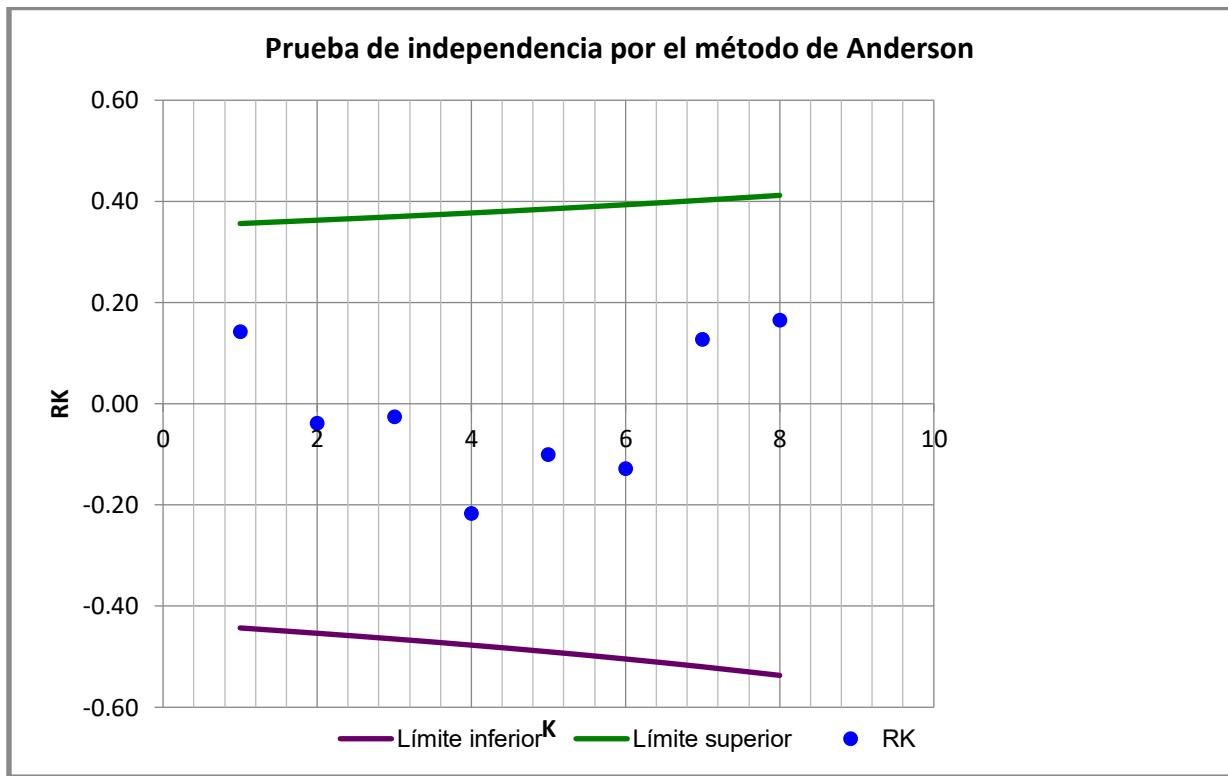


Tabla 35 Pruebas de homogeneidad Boquilla Número Uno 20009

MÉTODO HELMER			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	25	MEDIA	44.776
NÚMERO DE SECUENCIAS	15	NÚMERO DE CAMBIOS	9
COMO (S-C)	6	RAÍZ	4.9
LA MUESTRA NO ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE T DE STUDENT			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	12	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	13
MEDIA	32.93	MEDIA	55.71
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	12.51	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	13.3
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			-4.22
GRADOS DE LIBERTAD	23	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.07
CÓMO $TD < T$ STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE CRAMER			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	15	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	52.2	MEDIA	62.13
TAO60	0.43	TAO30	1.01
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	20.71	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	14.98
GRADOS DE LIBERTAD	20	GRADOS DE LIBERTAD	2.086
COMO $T60 > T$ NO ES HOMOGÉNEO		COMO $T30 > T$ NO ES HOMOGÉNEO	

Figura 56 Gráfica de independencia Boquilla Número Uno 20009

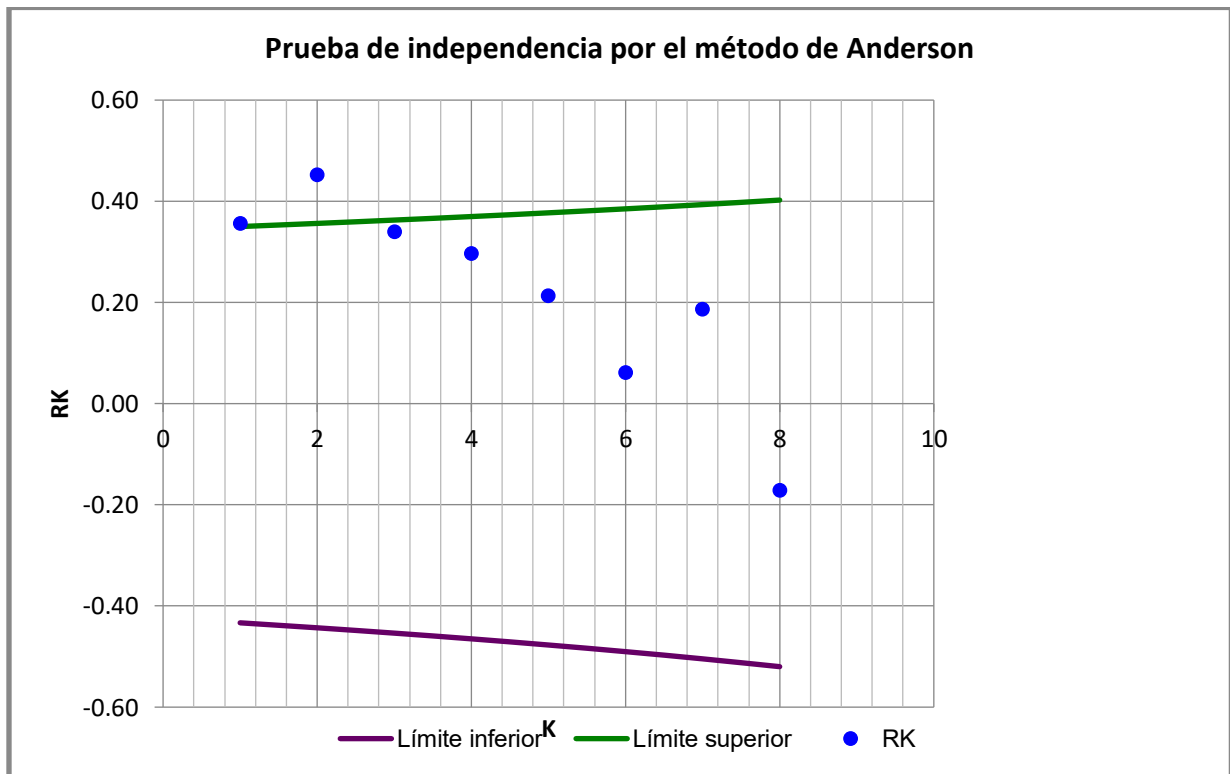


Tabla 36 Pruebas de homogeneidad Zoquitlán 20191

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	22	MEDIA	50.45
NÚMERO DE SECUENCIAS	12	NÚMERO DE CAMBIOS	9
COMO (S-C)	3	RAÍZ	4.6
LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	11	N NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	11
MEDIA	47.98	MEDIA	52.91
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	19.55	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	16.02
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			-0.62
GRADOS DE LIBERTAD	20	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.09
CÓMO TD<T STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE CRAMER</b>			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	13	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	52.2	MEDIA	47
TAO60	0.099	TAO30	-0.2
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	2.91	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	1.86
GRADOS DE LIBERTAD	18	GRADOS DE LIBERTAD	2.1
COMO T60>T NO ES HOMOGÉNEO		COMO T30<T ES HOMOGÉNEO	

Figura 57 Gráfica de independencia Zoquitlán 20191

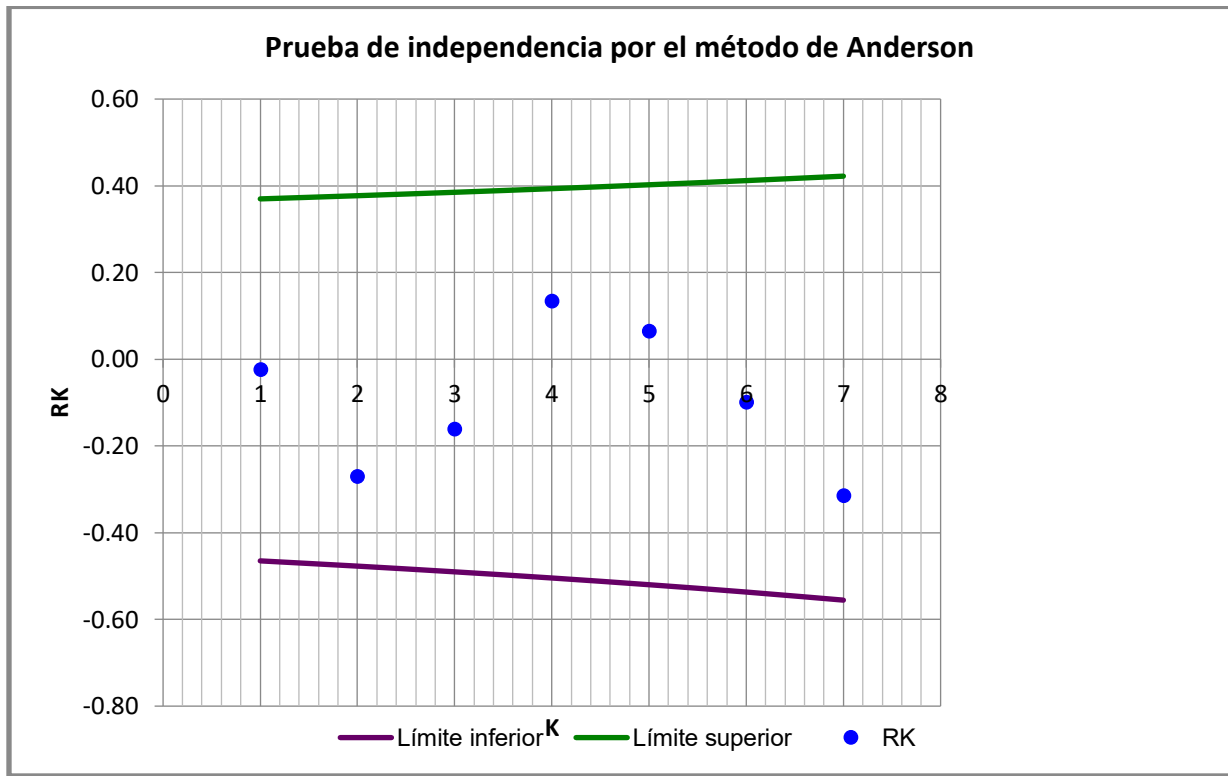


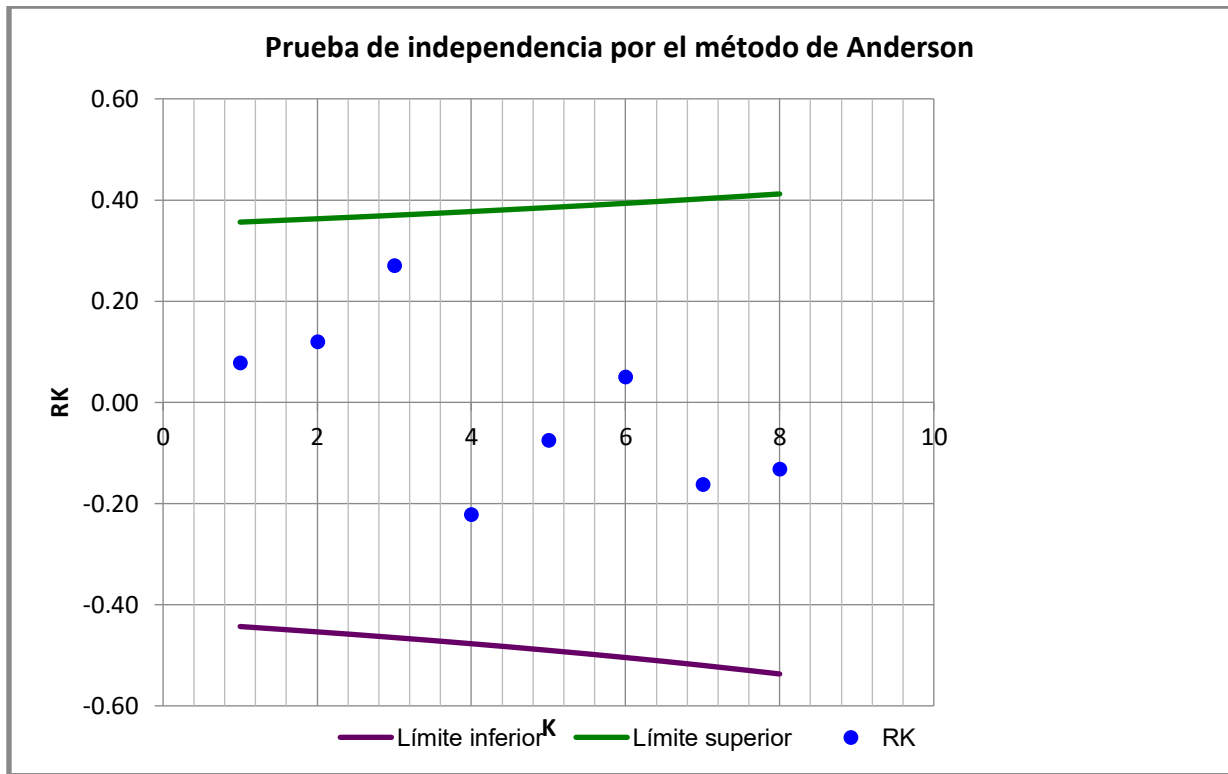
Tabla 37 Pruebas de independencia San Carlos Yautepec 20184

<b>MÉTODO HELMER</b>			
NÚMERO DE DATOS DE LA MUESTRA	24	MEDIA	55.95
NÚMERO DE SECUENCIAS	12	NÚMERO DE CAMBIOS	11
COMO (S-C)	1	RAÍZ	4.8
LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

<b>MÉTODO DE T DE STUDENT</b>			
NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 1	12	NÚMERO DE CONJUNTO DE VALORES 2	12
MEDIA	56.64	MEDIA	55.25
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	16.87	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	17.74
VALOR ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA TD			0.189
GRADOS DE LIBERTAD	22	VALOR DE LA T DE STUDENT	2.07
CÓMO TD < T STUDENT ENTONCES LA MUESTRA ES HOMOGÉNEA			

MÉTODO DE CRAMER			
BLOQUE 1 (60% DE LA MUESTRA)		BLOQUE 2 (30% DE LA MUESTRA)	
NÚMERO DE VALORES	14	NÚMERO DE VALORES	7
MEDIA	55.25	MEDIA	60.14
TAO60	-0.04	TAO30	0.25
ESTADÍSTICO DE PRUEBA T60	1.26	ESTADÍSTICO DE PRUEBA T30	2.3
GRADOS DE LIBERTAD	19	GRADOS DE LIBERTAD	2.09
COMO T60<T ES HOMOGÉNEO		COMO T30>T NO ES HOMOGÉNEO	

Figura 58 Gráfica de Independencia San Carlos Yautepec 20184



6.2 Lluvias máximas a 24 horas

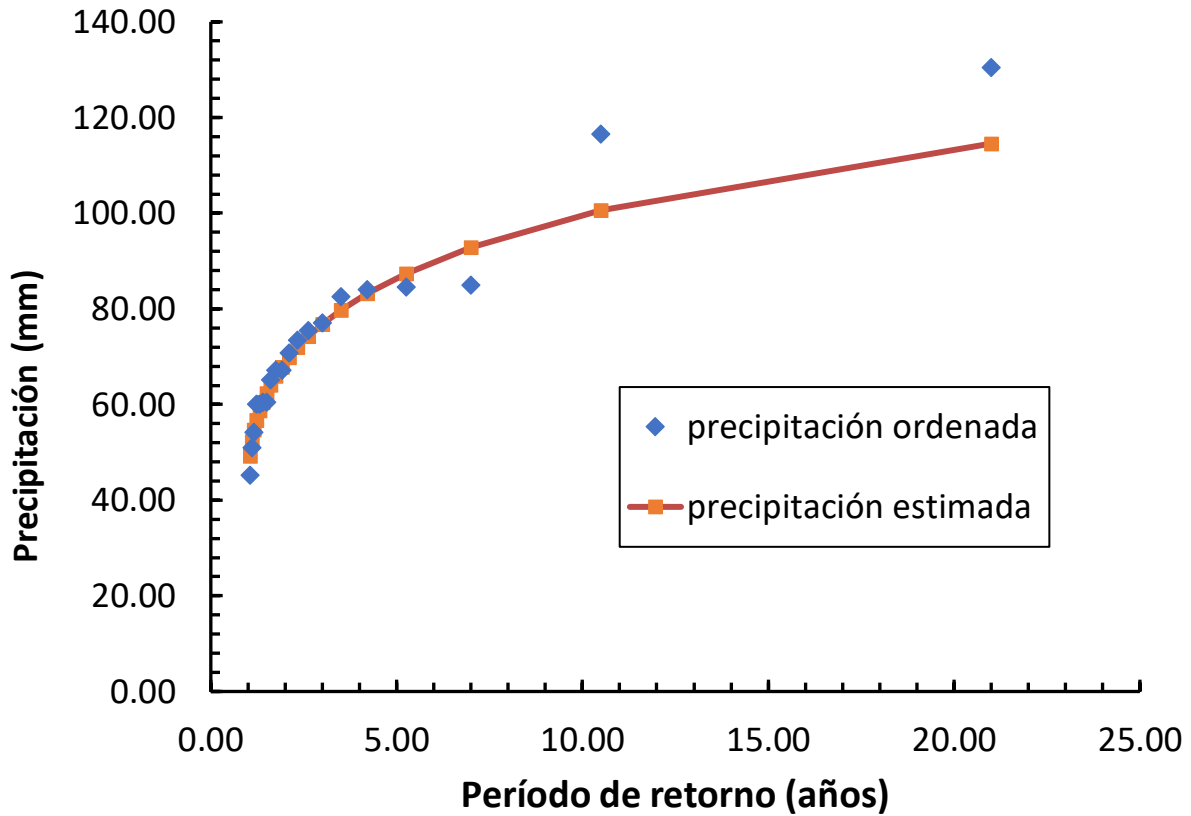


Figura 59 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20007

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	68.78
5	86.48
10	99.67
20	113.54
25	118.21
50	133.47
100	150.01
200	168.01
500	194.28
1000	216.25
2000	240.22
5000	275.28
10000	304.61

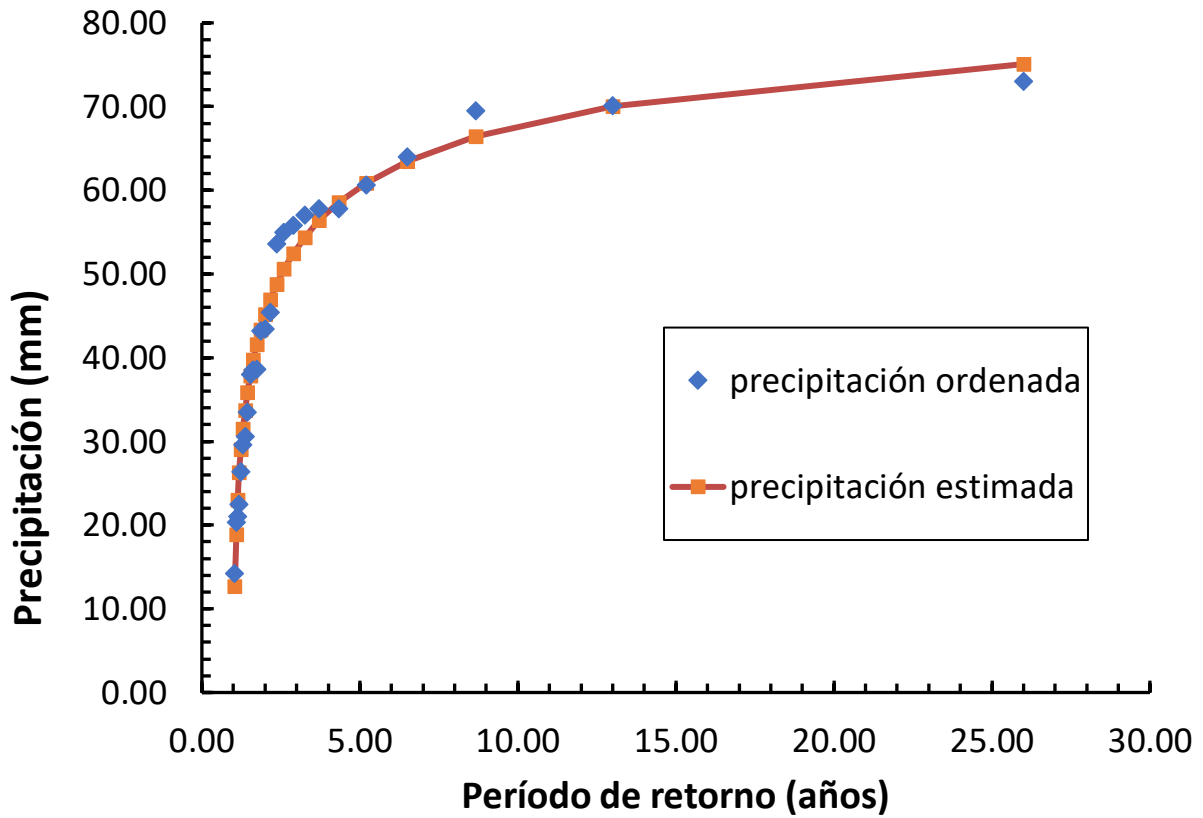


Figura 60 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20009

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	45.16
5	60.39
10	67.77
20	73.32
25	74.83
50	78.81
100	81.95
200	84.44
500	86.97
1000	88.43
2000	89.59
5000	90.77
10000	91.46

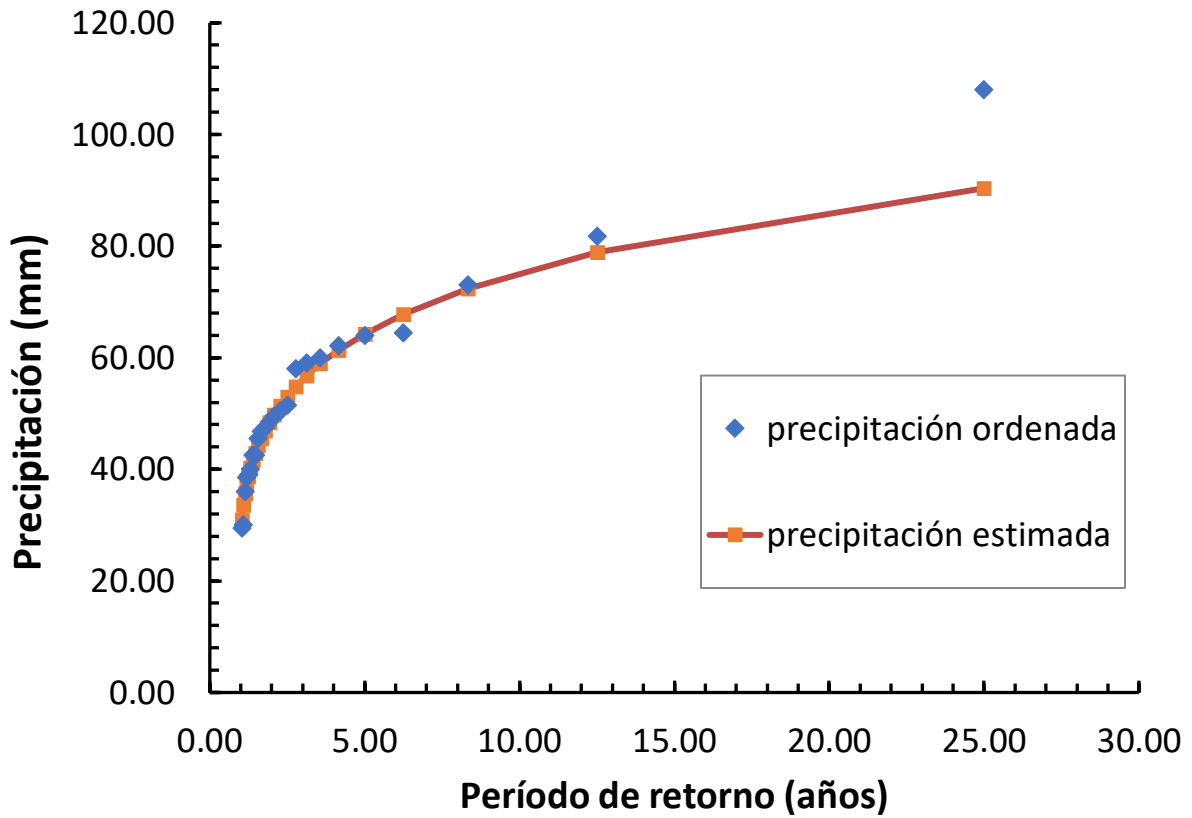


Figura 61 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20023

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	49.06
5	64.26
10	75.27
20	86.61
25	90.37
50	102.50
100	115.37
200	129.10
500	148.66
1000	164.64
2000	181.72
5000	206.11
10000	226.05

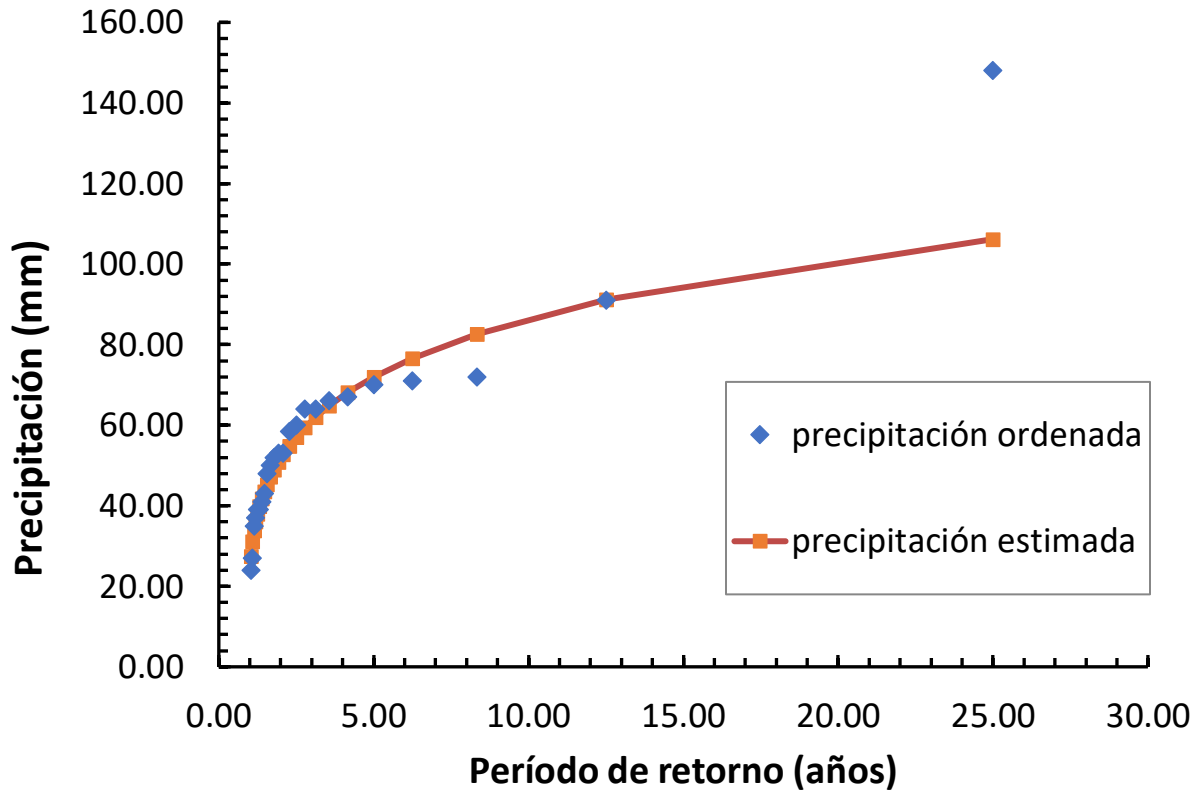


Figura 62 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20109

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	51.78
5	72.46
10	87.711
20	103.62
25	108.947
50	126.261
100	144.882
200	164.98
500	194.06
1000	218.17
2000	244.25
5000	282.07
10000	313.43

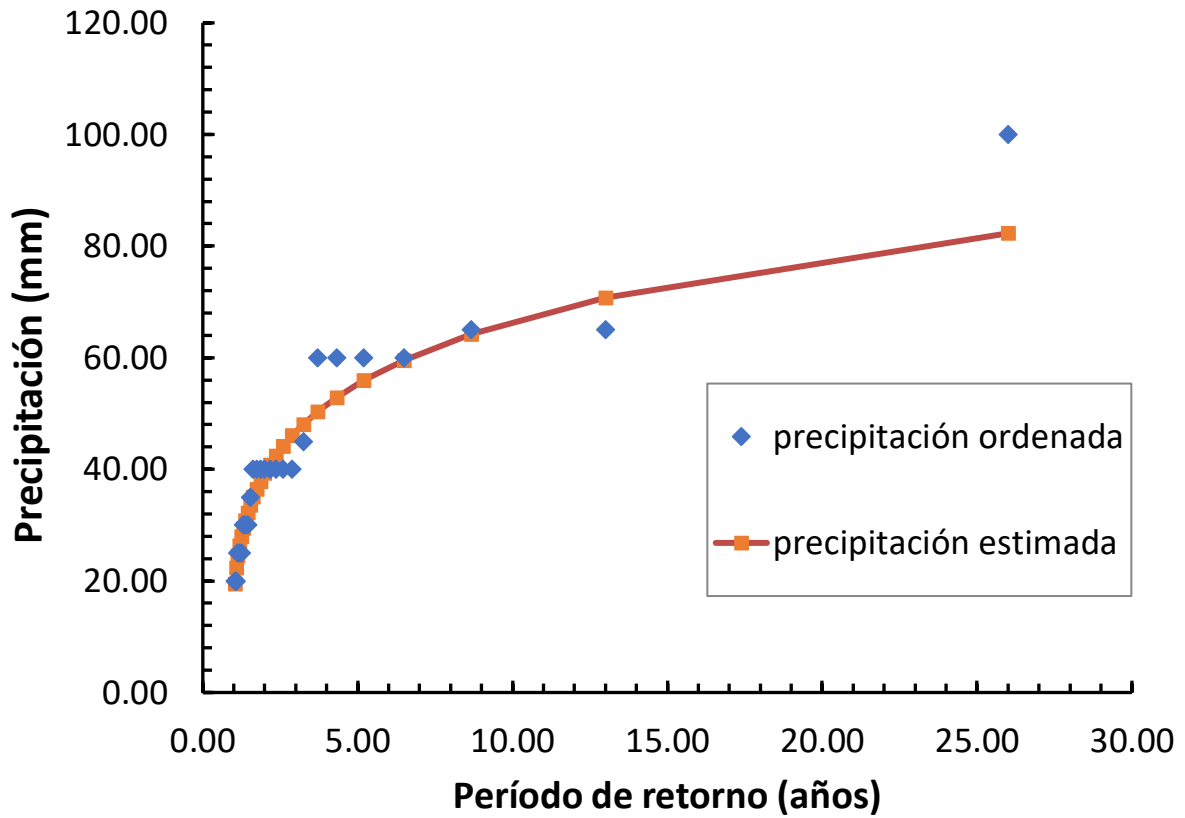


Figura 63 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20170

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	39.32
5	55.27
10	66.53
20	77.90
25	81.63
50	93.48
100	105.83
200	118.75
500	136.76
1000	151.16
2000	166.25
5000	187.35
10000	204.21

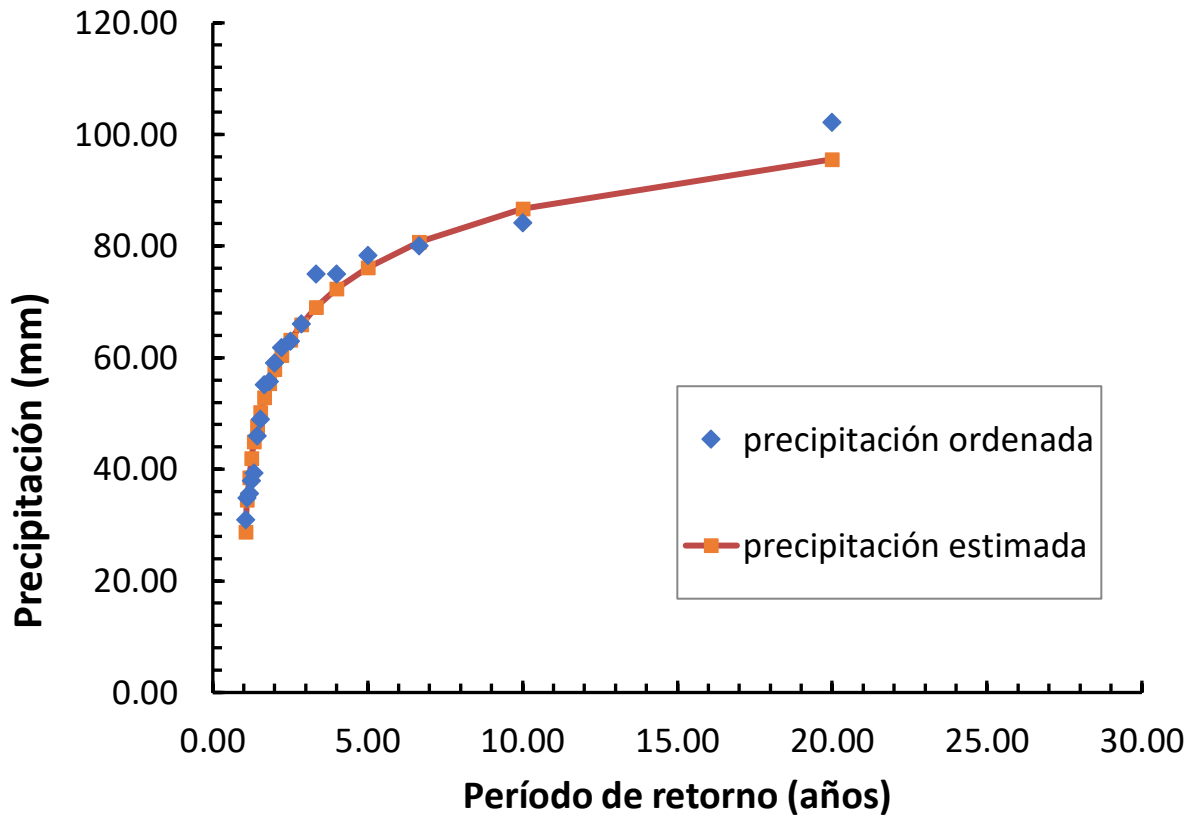


Figura 64 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20179

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	57.86
5	76.19
10	86.64
20	95.55
25	98.17
50	105.67
100	112.33
200	118.28
500	125.17
1000	129.76
2000	133.86
5000	138.64
10000	141.82

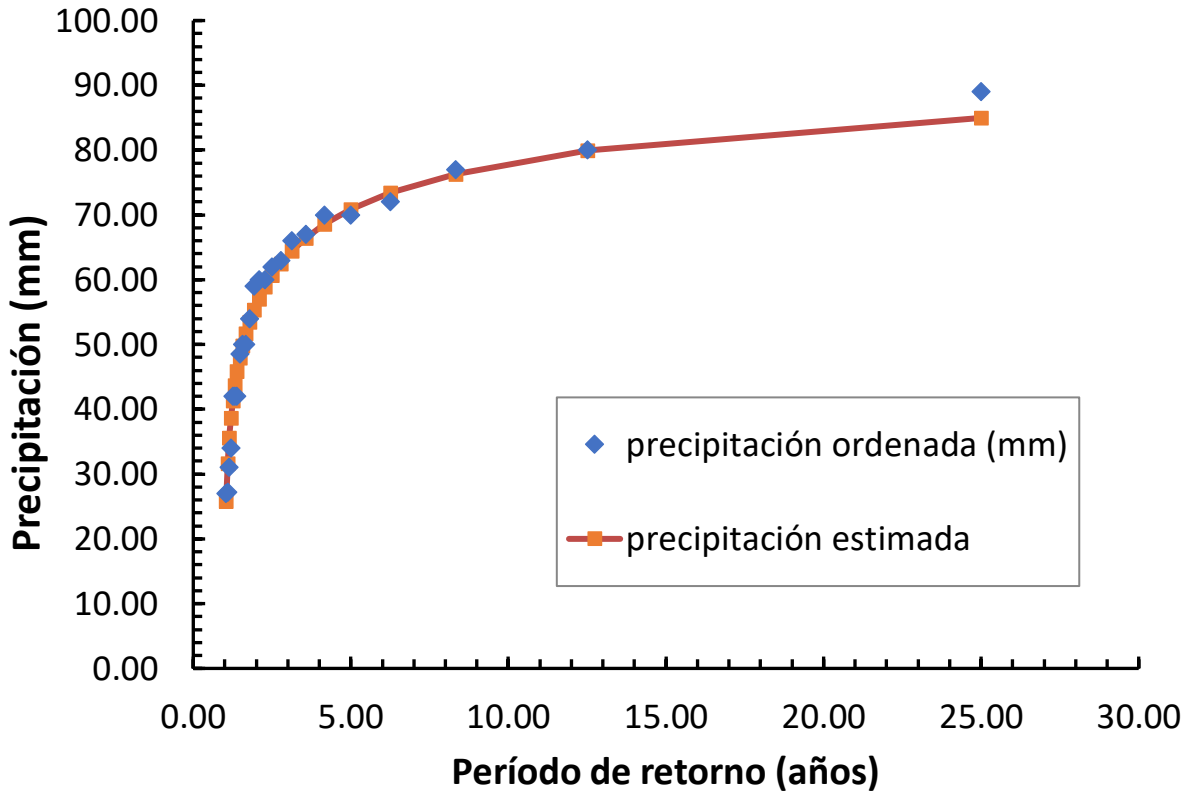


Figura 65 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20184

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	56.189
5	70.838
10	78.021
20	83.484
25	84.973
50	88.941
100	92.098
200	94.623
500	97.208
1000	98.722
2000	99.937
5000	101.185
10000	101.916

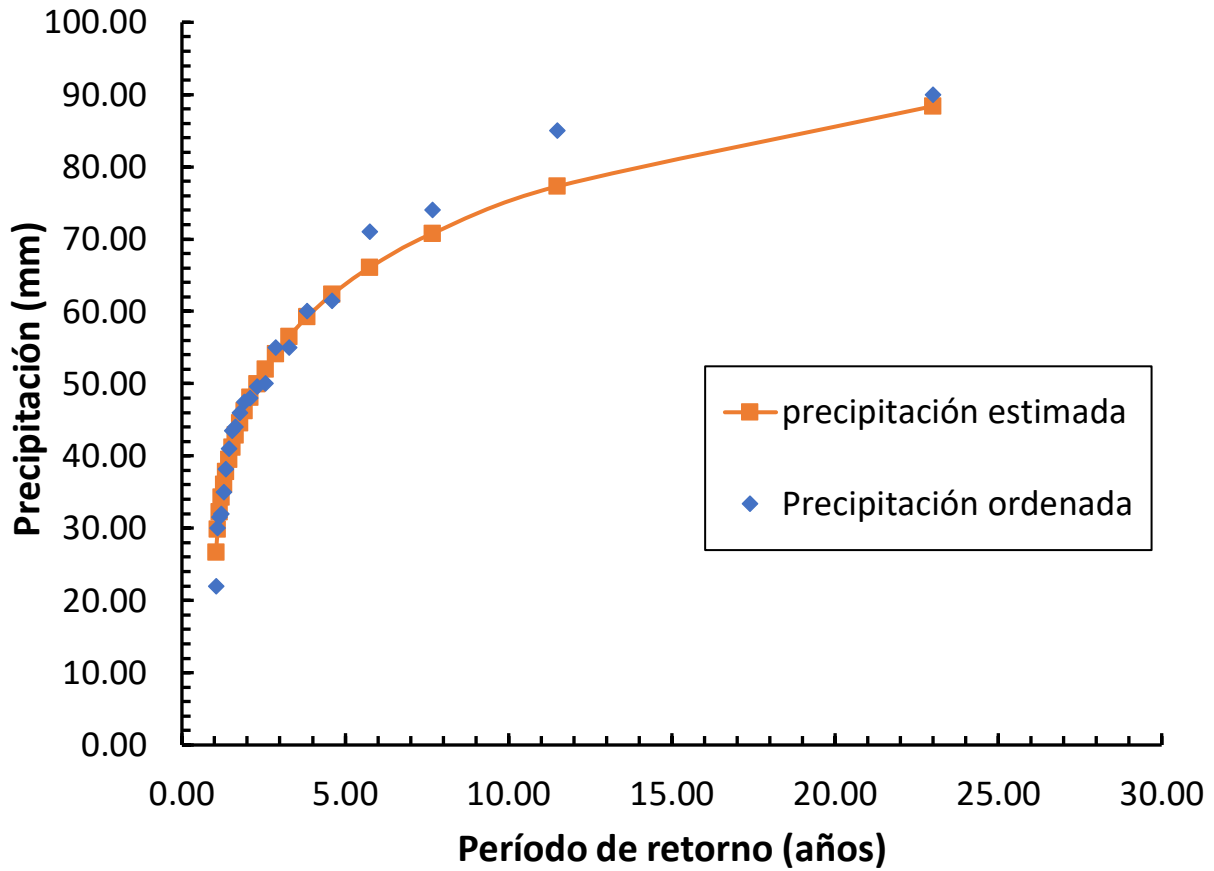


Figura 66 Análisis de frecuencias de la lluvia máxima a 24 horas de la estación GVE 20191

Eventos de diseño	
T(años)	precipitación (mm)
2	47.14
5	63.74
10	75.059
20	86.16
25	89.74
50	100.96
100	112.43
200	124.24
500	140.47
1000	153.28
2000	166.60
5000	185.04
10000	199.68

6.3 Mapa de Isoyetas

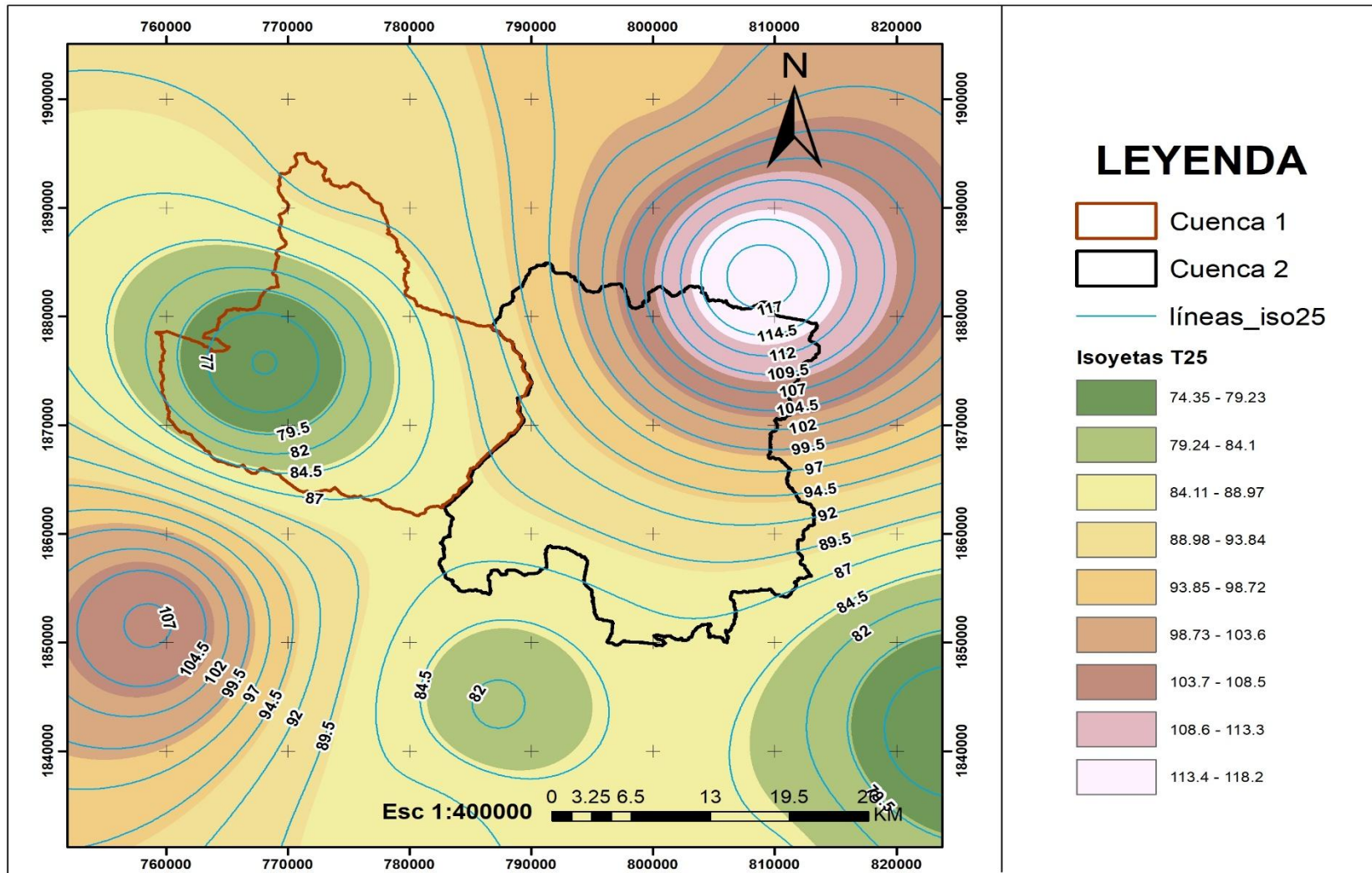


Figura 67 Mapa de Isoyetas Tr25 años

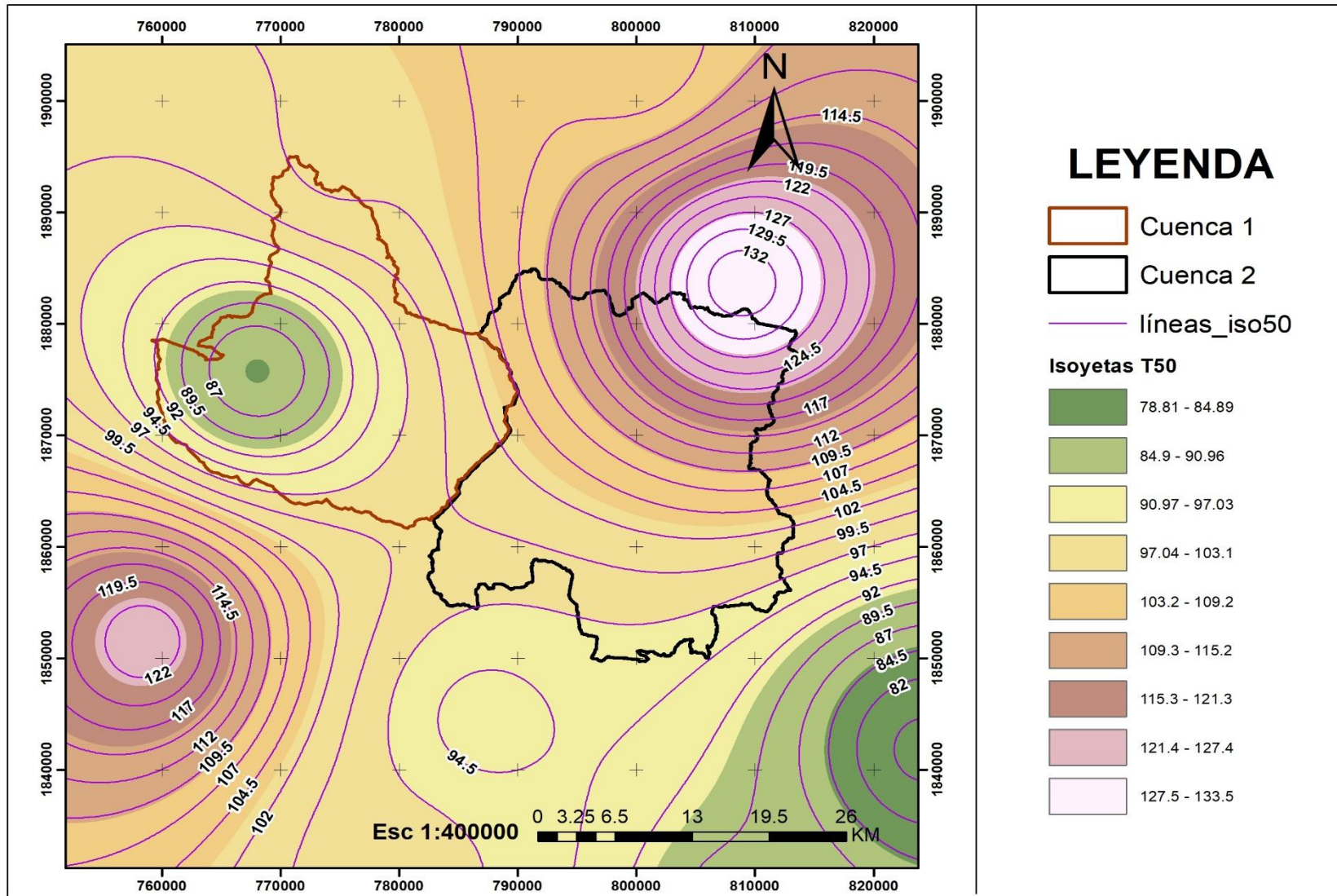


Figura 68 Mapa de Isoyetas Tr50 años

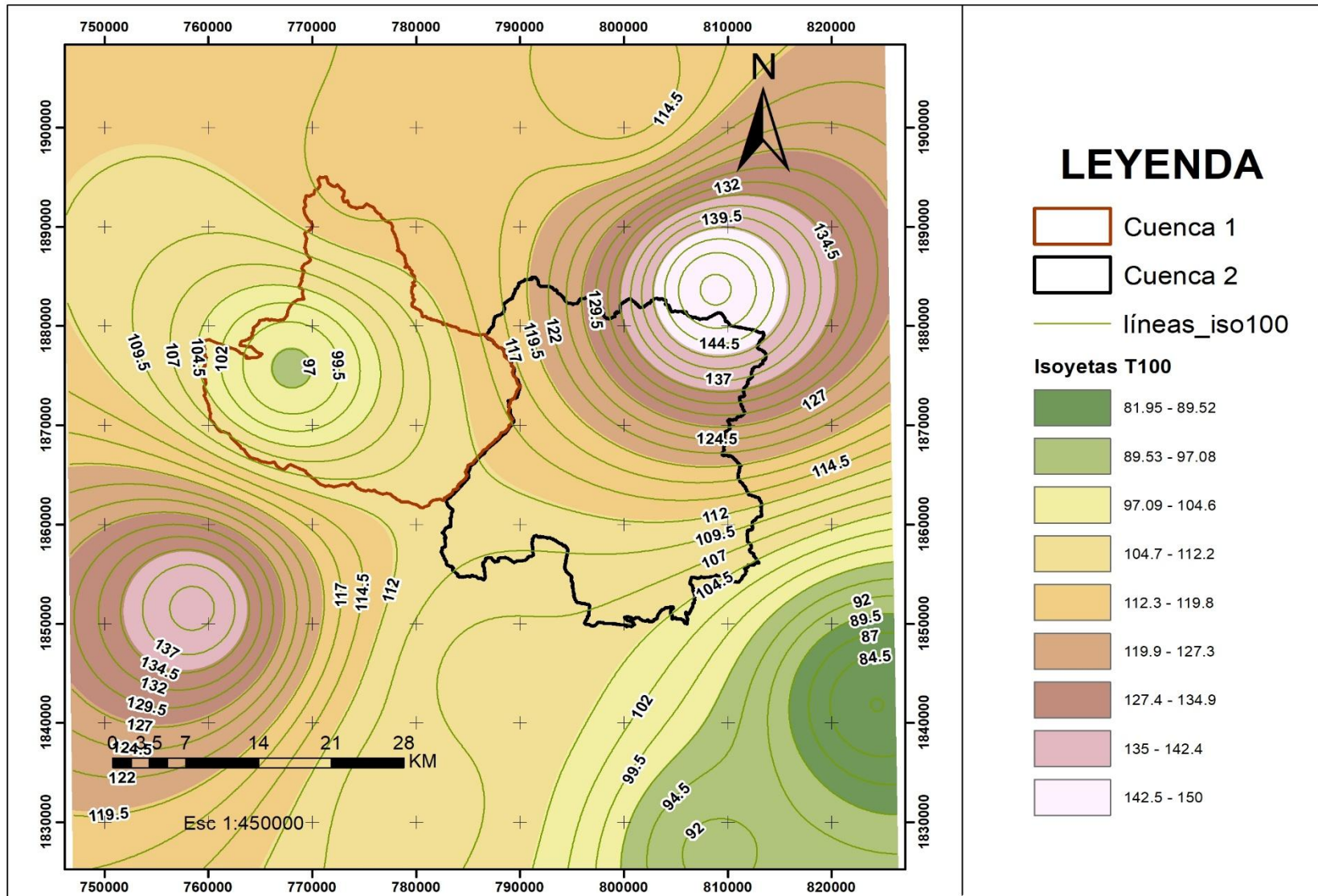


Figura 69 Mapa de Isoyetas Tr100 años

### 6.4 Hietogramas de diseño

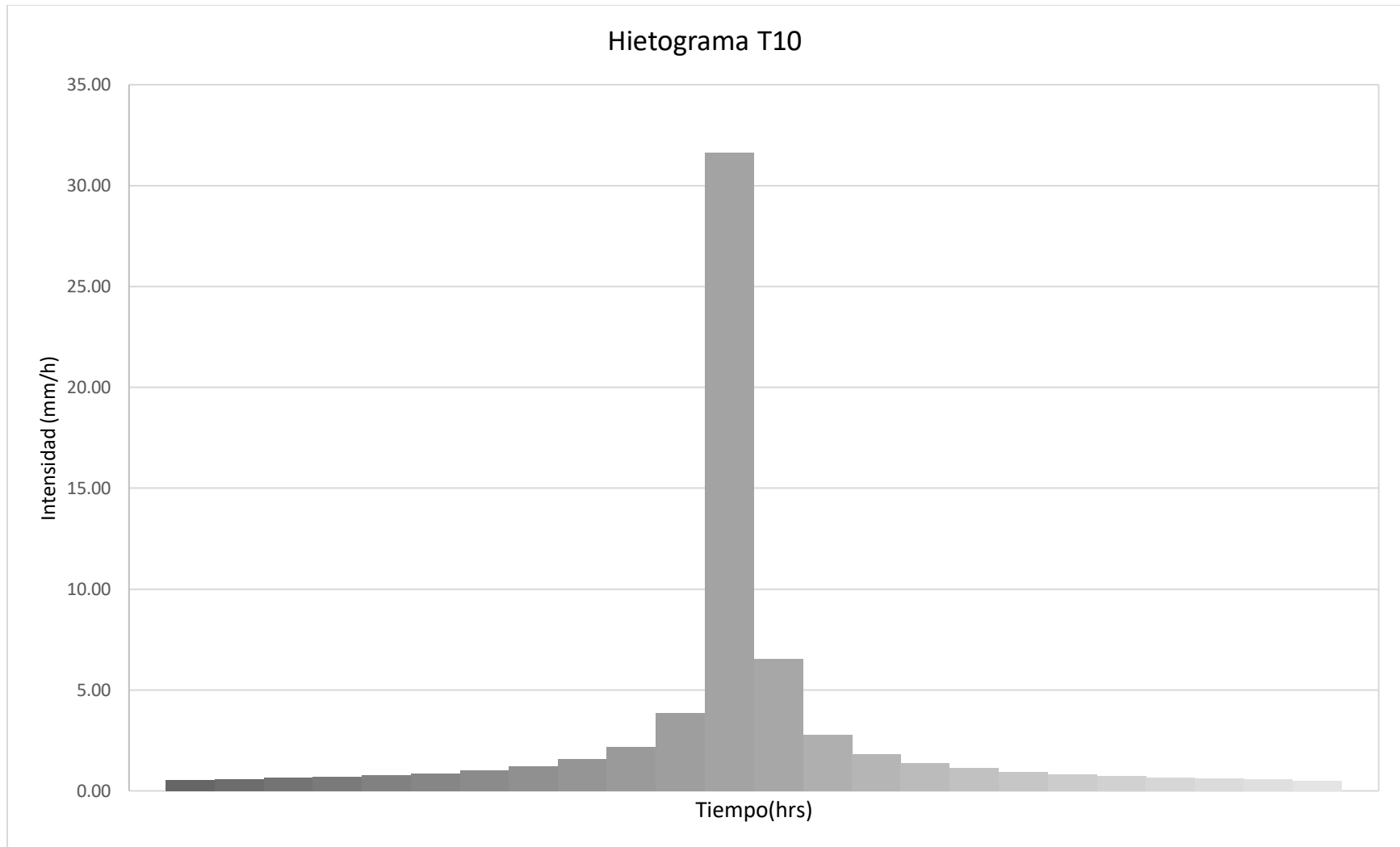


Figura 70 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 10 años

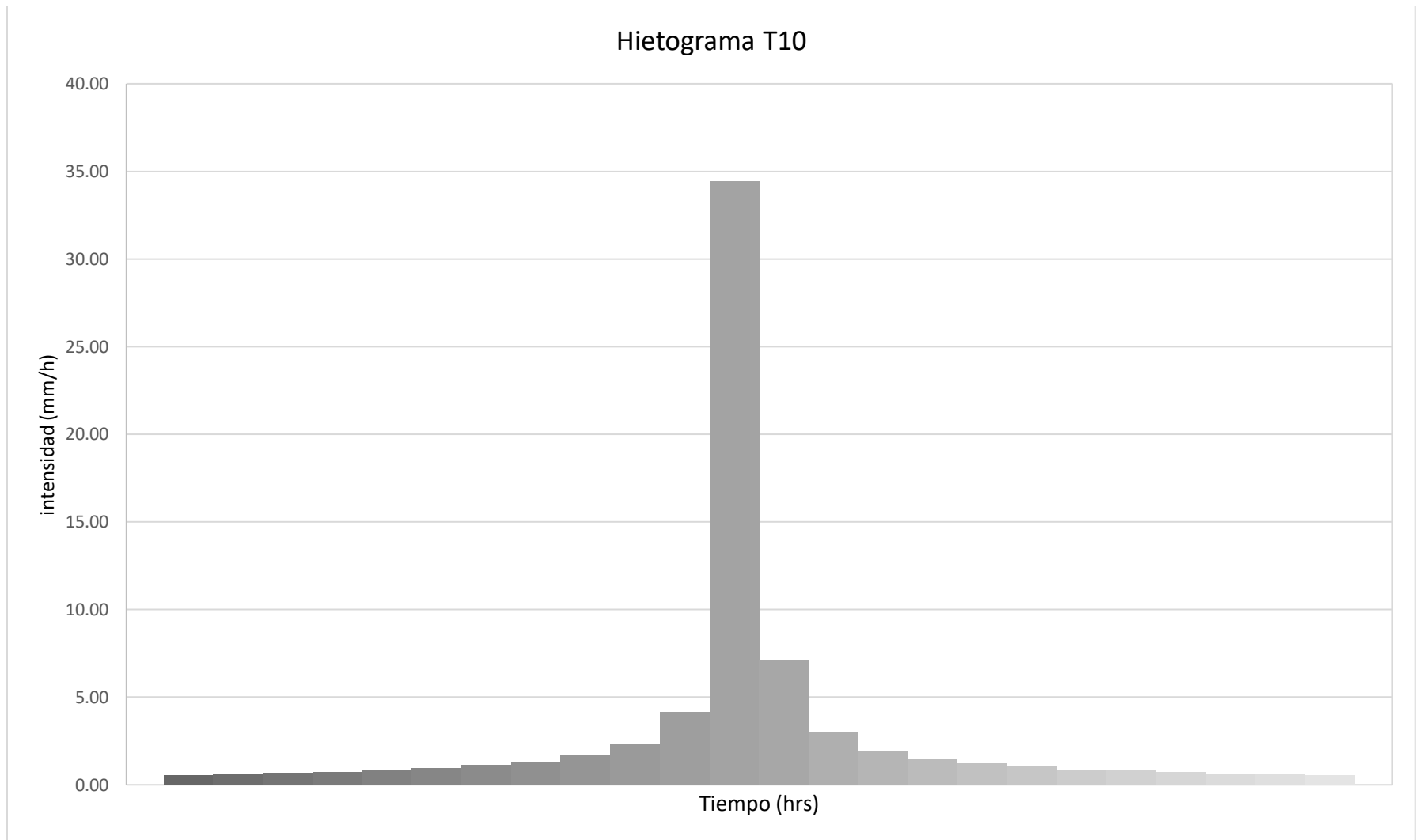


Figura 71 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 10 años

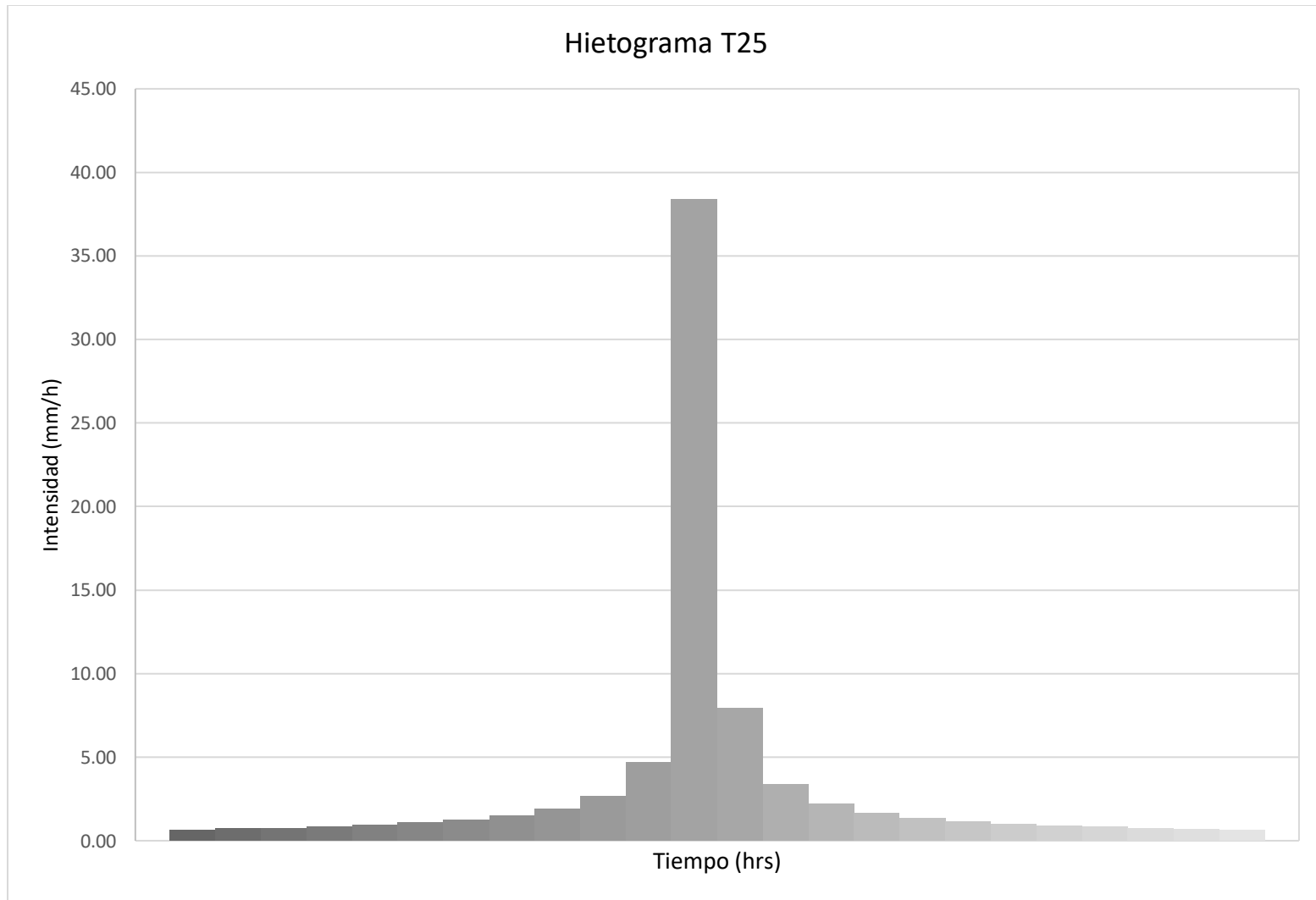
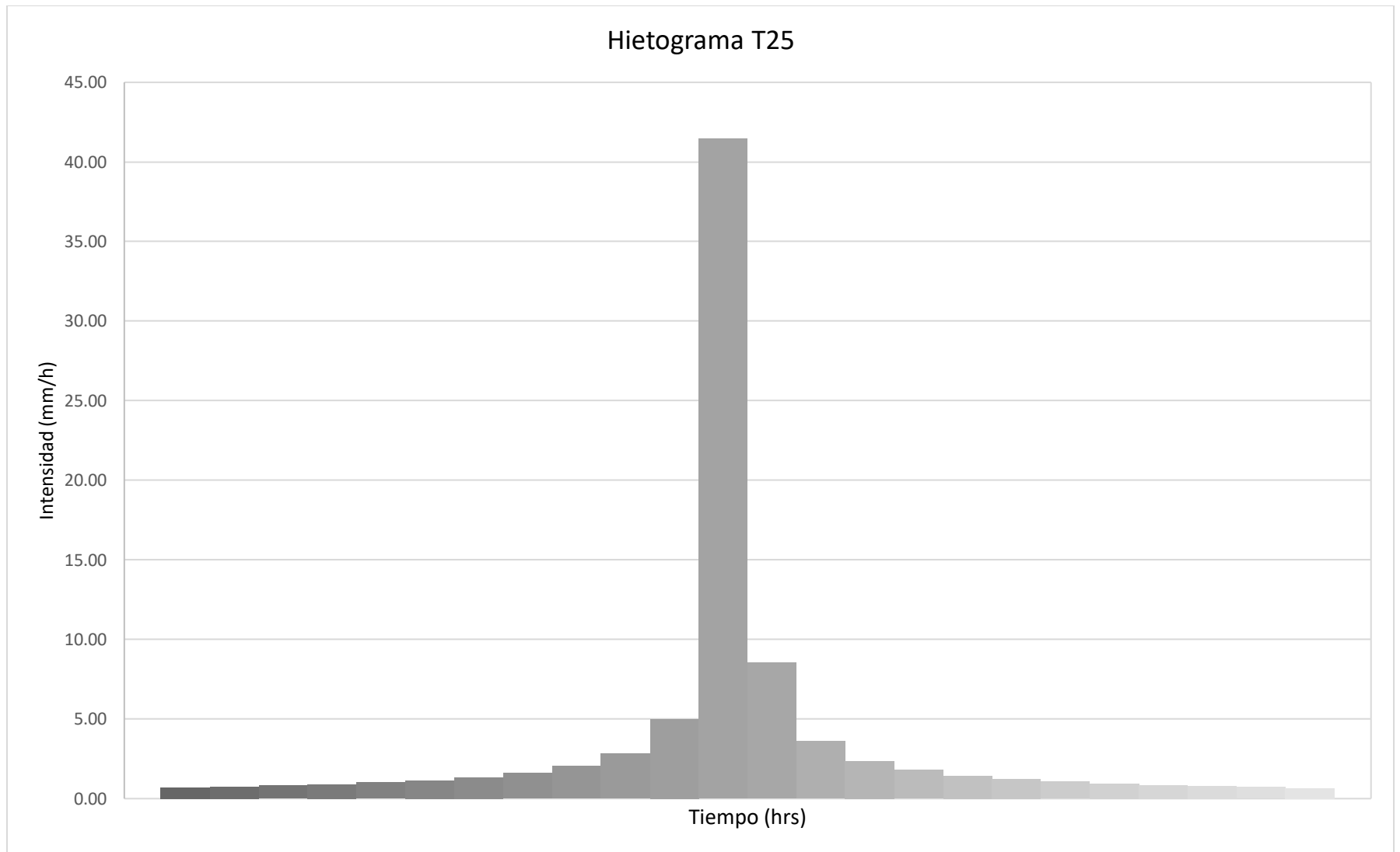
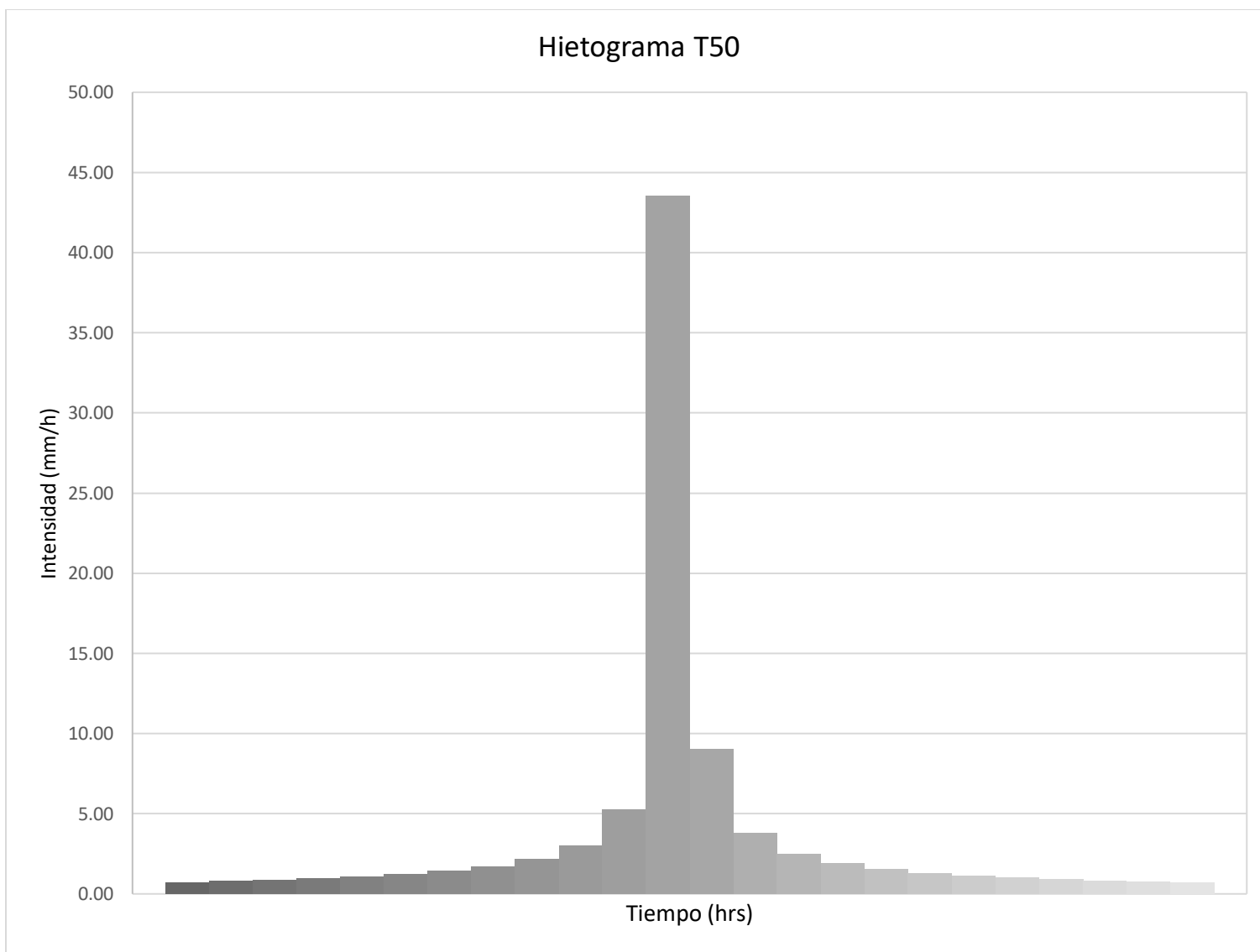


Figura 72 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 25 años



*Figura 73 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 25 años*



*Figura 74 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 50 años*

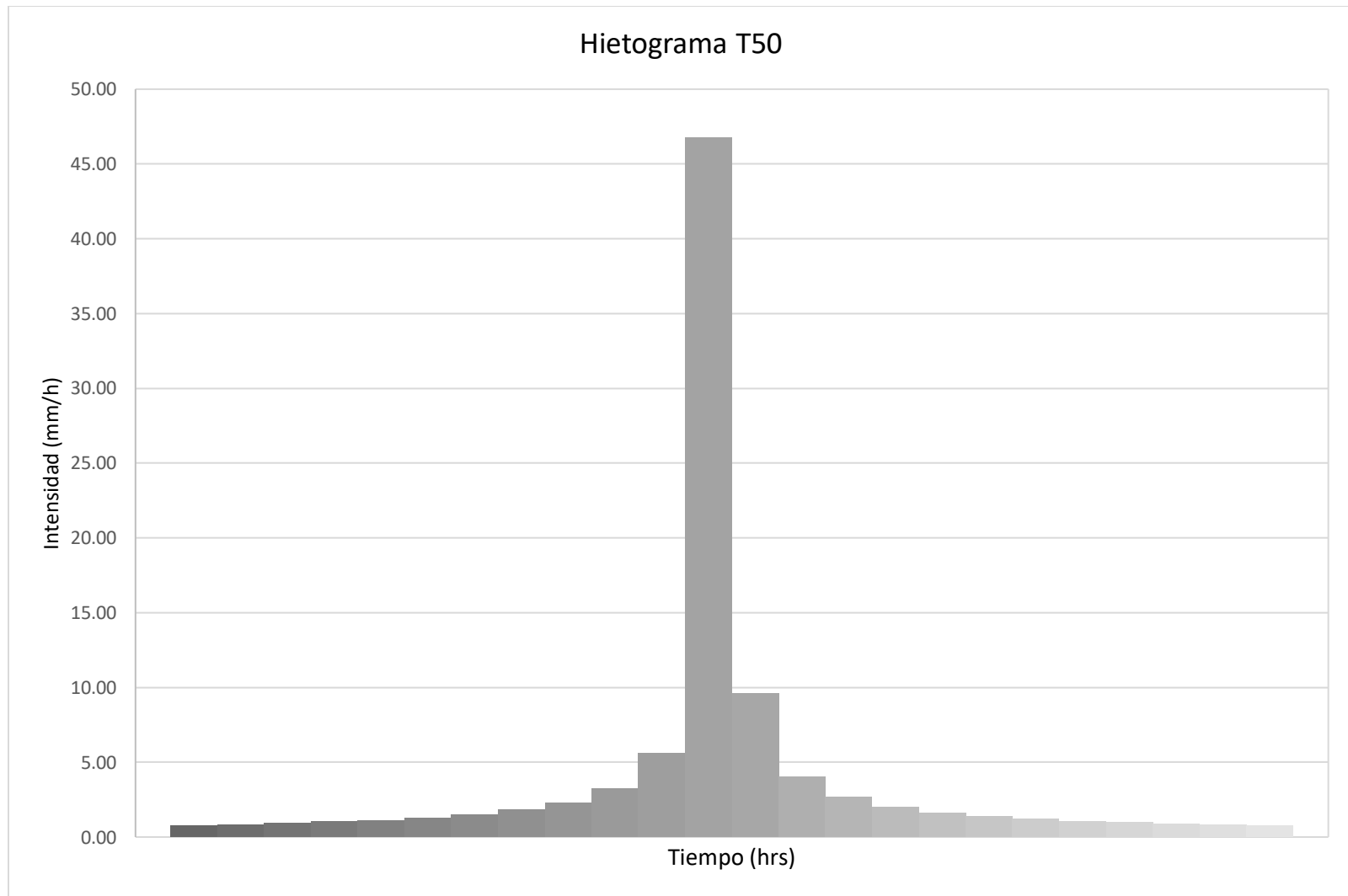
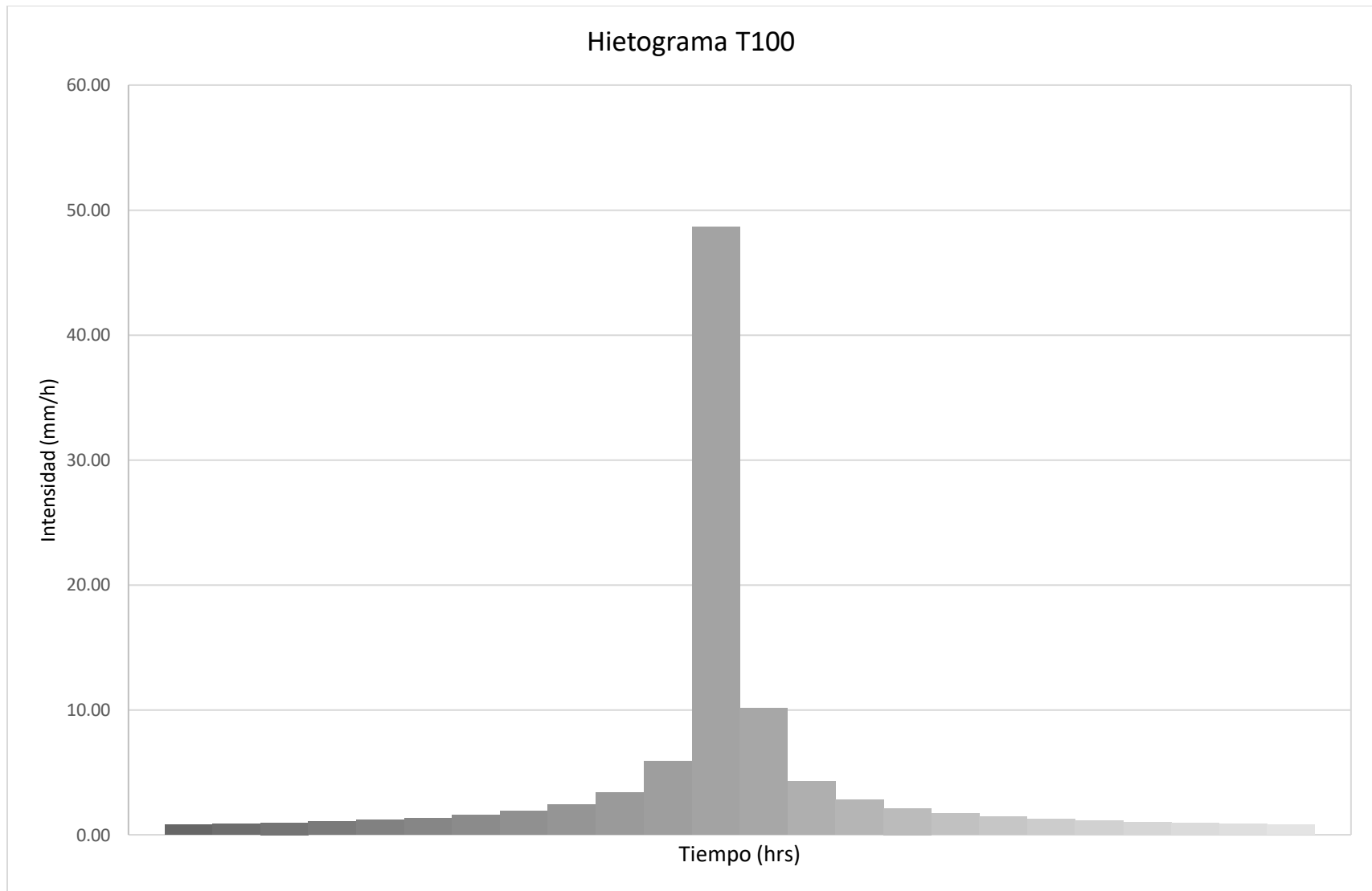


Figura 75 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 50 años



*Figura 76 Hietograma de diseño cuenca de Tlacolula período de 100 años*

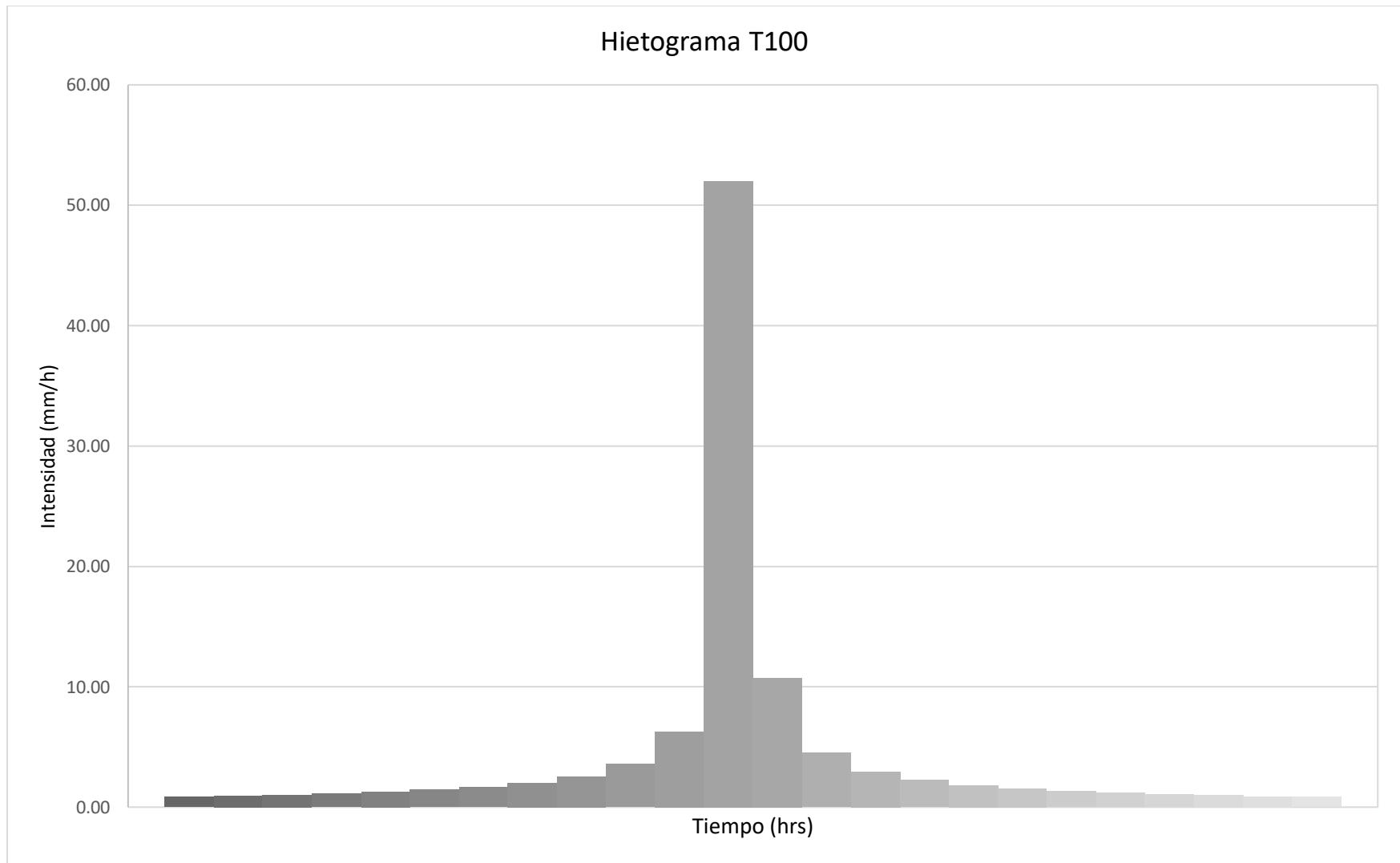


Figura 77 Hietograma de diseño cuenca de San Luis período de 100 años

## 6.5 Tipos de suelo curva número

A continuación, se muestran los tipos de suelos y su respectiva descripción de los suelos que se presentan en las cuencas de Tlacolula y de San Luis.

Cambisol (CM, Del latín *cambiare*, cambiar) son suelos jóvenes con un cambio apreciable en su contenido de arcilla o entre sus capas u horizontes; son moderada a alta susceptibilidad a la erosión; por lo general este tipo de suelos son buenos para para fines agrícolas y son muy usados de forma intensamente en la agricultura. (INEGI, 2015).

Luvisol (lv) Suelos con acumulación de arcilla en el subsuelo. La arcilla es de alta actividad en CIC (mayor de  $24\text{cmolc kg}^{-1}$ ), lo que representa buenas posibilidades de fertilidad para la agricultura en general. (INEGI, 2015).

Litosol (li, Del griego *lithos*, piedra.) es un suelo restringido por roca dura y continua a menos de 10 cm de profundidad en donde el caso más excesivo es el afloramiento rocoso, que en este caso se denomina nudilitico y tecnolítico. (INEGI, 2015).

Cromico (cr, del griego *Kromos*, color) son suelos que tiene una capa de color roja de más de 30 cm de espesor. (INEGI, 2015).

Eutríco (eu, Del griego *eu*, bueno.) es un tipo de suelo saturado con calcio, sodio, magnesio y potasio en la mayor parte de la solución; El estado éutríco puede considerarse un indicador adicional de buena fertilidad del suelo. Los suelos éutrícos son particulares de clima seco o semiseco debido a la baja precipitación. (INEGI, 2015).

Vertico (vt, Del latín *vertere* dar vuelta.) es un arquetipo de suelo con más de 30% de arcilla expandible (con abundantes grietas en seco) en algún horizonte de 25 cm de espesor. Tienen alta fertilidad y están asentados en las zonas agrícolas más productivas del país. (INEGI, 2015).

Húmico (hu, Del latín *humus*, tierra) es un suelo rico en carbono orgánico que tiene un promedio de 1% o más en sus primeros 50 cm de profundidad; cuando tiene más de 5% a este se denomina hiperhúmico. (INEGI, 2015).

Háplico (ha) Suelos sin desarrollo que no presentan rasgos de evolución o calificador de suelo notable. (INEGI, 2015).

Pélico (pe) vertisol que tiene un color negro o café oscuro. (INEGI, 2015).

Calcárico (ca, Del latín calcarius, con cal.) Suelo con más de 2% de carbonato de calcio. No tiene las propiedades específicas del horizonte cálcico. (INEGI, 2015)

