



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO DE LA CUENCA DEL
RÍO PERROS DE LA RH 22 USANDO UN MODELO LLUVIA ESCURRIMIENTO
DISTRIBUIDO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RAMIREZ AMBRIZ MAURICIO GUILLERMO

TUTOR PRINCIPAL:
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2022.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. DOMÍNGUEZ MORA RAMÓN

Secretario: DR. POZOS ESTRADA ÓSCAR

1er. Vocal: DRA. ARGANIS JUÁREZ MARITZA LILIANA

2do. Vocal: DR. MENDOZA RESÉNDIZ ALEJANDRO

3er. Vocal: DR. ARAGÓN HERNÁNDEZ JOSÉ LUIS

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México

TUTOR DE TESIS

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por todo el amor y apoyo infinito en cada etapa de mi vida.

A mi familia, la base de mi desarrollo humano.

A mi tutora de tesis, Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez y al Dr. Ramón Domínguez Mora, por su tiempo, conocimientos, paciencia y su gran calidez humana.

Al M.I. Eliseo Carrizosa por su apoyo y conocimientos brindados en mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería, Eduardo, Olaf, Silvia, Adam, Magaly, Paty, Mau, Carolina, Ceci, Coco, Roberto, Mario, Juan, Sinuhé, Edgar, por todas las risas y vivencias compartidas.

A mi amigo Omar, por el tiempo que me permitió compartir a su lado, gracias por todas las experiencias y alegrías vividas. Te extrañaré mucho.

Al Instituto de Ingeniería, por permitir mi formación profesional y conocer excelentes seres humanos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme realizar mis estudios profesionales.

DEDICATORIA

A mis padres, Juana y Mauricio.

A mi hermano Miguel Ángel.

A mi amigo Omar.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	4
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS	7
2.1. HIDROLOGÍA.....	7
2.2. PRECIPITACIÓN	7
2.3. ESCURRIMIENTO	7
2.4. PÉRDIDAS DE ESCURRIMIENTO.....	8
2.5. INFILTRACIÓN	8
2.6. PERIODO DE RETORNO.....	10
2.7. HIETOGRAMA	12
2.8. HIDROGRAMA.....	12
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO.....	16
3.1. FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA)	16
3.1.1. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE FRA.....	17
3.2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	19
3.2.1 DISTRIBUCIÓN GUMBEL	19
3.2.2. DISTRIBUCIÓN DOBLE GUMBEL	21
3.3. ARCVIEW 3.2.....	22
3.4. MODELO MPE	23
3.4.1. PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CUENCA.....	23
3.4.2.- ESCURRIMIENTO DIRECTO.....	25
3.4.3.- PÉRDIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	27
3.4.4.- MODELO DE TRANSFERENCIA DE ESCURRIMIENTO, MÉTODO DE CLARK MODIFICADO.....	28
3.4.5.- CALIBRACIÓN.....	32
3.5.- MODELO IBER	32
3.5.1.- MÓDULO HIDRODINÁMICO.....	32
3.5.2.- MÓDULO DE TURBULENCIA.....	33
3.5.3.- MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	33
3.5.4.- FRICCIÓN DE FONDO.....	34
3.5.5.- INFILTRACIÓN	34
CAPÍTULO 4. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	38
4.1. ZONA DE ESTUDIO	38
4.1.1. REGIONES HIDROLÓGICAS.....	39
4.1.2. ESTADO DE OAXACA.....	39
4.1.3. CLIMA.....	40

4.1.4. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN.....	41
4.1.5. USO DE SUELO	42
4.1.6. EDAFOLOGÍA	42
4.2. REGIÓN HIDROLÓGICA NO. 22 “TEHUANTEPEC”	43
4.2.1. CUENCA DEL RIO LOS PERROS	44
4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE).....	45
4.4. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	47
4.5. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	48
4.6. REGISTROS CLIMATOLGICOS E HIDROMETRICOS	50
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN.....	53
5.1. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS.....	53
5.1.1. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	53
5.1.2. PROCESO ARCVIEW 3.2.....	53
5.1.3. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS	68
5.2. SELECCIÓN DEL EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO.....	82
5.2.1. CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DE LA CUENCA.....	92
5.3. CREACIÓN DE ARCHIVO DE LLUVIA Y ESCURRIMIENTO.....	93
5.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)	96
5.5. GENERACIÓN DE TORMENTAS ESTADÍSTICAS	103
5.5.1. FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA PARA LA RH 22	105
5.5.2. DISTRIBUCIÓN DE AJUSTE PARA LA REGIÓN DEL ISTMO.....	133
5.5.3. FACTOR DE CONECTIVIDAD PARA LA ZONA DE ESTUDIO	135
5.5.4. TORMENTAS ESTADISTICAS.....	141
5.6. AVENIDAS DE DISEÑO	144
CAPITULO 6. MODELACIÓN BIDIMENSIONAL.....	146
6.1. DEPURACIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT).....	146
6.2. MODELO IBER	153
CAPITULO 7. ANALISIS DE RESULTADOS.....	167
CONCLUSIONES.....	187
REFERENCIAS	190

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Hietogramas de alturas de precipitación e intensidades.	12
Figura 2.2. Diseño del hidrograma.	12
Figura 2.3. Tramos seleccionados dibujados posteriormente en papel semilogarítmico.	14
Figura 2.4. Componentes de un hidrograma.	15
Figura 3.1. Método de Clark Modificado. (Domínguez et al., 2008).....	30
Figura 4.1. Regiones Hidrológicas.	39
Figura 4.2. Ubicación del Estado de Oaxaca.	40
Figura 4.3. Clima en el estado de Oaxaca. Fuente INEGI.	41
Figura 4.4. Uso de suelo cuenca río Los Perros.....	42
Figura 4.5. Edafología de la cuenca del río Los Perros.	43
Figura 4.6. Región hidrológica número 22 “Tehuantepec”.....	44
Figura 4.7. Cuenca del río Los Perros.	45
Figura 4.8. Modelo Digital de Terreno, RH22 y cuenca río Los Perros.....	46
Figura 4.9. Estaciones climatológicas, cuenca del río Los Perros.....	48
Figura 4.10. Estación hidrométrica. Cuenca del río Los Perros, Oaxaca.	49
Figura 5.1. Corrección de celdas a través del <i>Fill Sinks</i>	54
Figura 5.2. Resultado de aplicación del <i>Fill Sinks</i> (Corrección de celdas).	55
Figura 5.3. Direcciones del flujo en celdas.	55
Figura 5.4. Archivo de salida, <i>Flow Direction</i>	56
Figura 5.5. Acumulación del Flujo en contraste con la Dirección del Flujo.....	56
Figura 5.6. Archivo de salida, <i>Flow Accumulation</i>	57
Figura 5.7. Archivo de salida, <i>Stream Definition</i>	58
Figura 5.8. Archivo de salida, <i>Stream Segmentation</i>	59
Figura 5.9. Archivo de salida, <i>Watershed Delineation</i>	60
Figura 5.10. Archivo de salida, <i>Watershed Polygon Processing</i>	61
Figura 5.11. Archivo de salida, <i>Stream Segment Processing</i>	62
Figura 5.12. Archivo de salida, <i>Watershed Agregation</i>	63
Figura 5.13. Creación del proyecto de cuenca.	64
Figura 5.14. Proyecto de la cuenca del río Los Perros.	65
Figura 5.15. Unión de las subcuencas.	66
Figura 5.16. Unión de corrientes.....	67
Figura 5.17. Menú <i>Basin Characteristics</i>	67

Figura 5.18. Elementos hidrológicos de la cuenca del río Los Perros.	68
Figura 5.19. Archivo de Proyección de Albers.....	69
Figura 5.20. Menú Hydrologic Parameters.	69
Figura 5.21. Selección del método	70
Figura 5.22. Proyección Albers para parámetros hidrológicos.	70
Figura 5.23. Tamaño de celda.	70
Figura 5.24. Generación del modelo de Clark y SHG1k.....	71
Figura 5.25. Propiedades hidrológicas por celda.	72
Figura 5.26. Longitud de viaje.	72
Figura 5.27. <i>ModClark</i> sobre el tipo y uso de suelo.	73
Figura 5.28. Recorte Número de Curva de la cuenca en estudio.....	74
Figura 5.29. Selección del tema a recortar y tema de referencia.	74
Figura 5.30. Uso de Suelo de la cuenca del río Los Perros.	75
Figura 5.31. Tabla de atributos del Número de Curva, Tipo y Uso de Suelo.....	76
Figura 5.32. Selección del tema <i>ModClark1k</i>	76
Figura 5.33. Selección de la columna <i>Cell_id</i>	77
Figura 5.34. Intersección con el corte (<i>clip1</i>).	77
Figura 5.35. Intersección del corte (<i>Clip1</i>) con el Número de Curva.	77
Figura 5.36. Tabla de atributos de la intersección de los temas del NC y <i>ModClark1k</i>	78
Figura 5.37. Tabla de atributos <i>ModClark1k</i> modificada.	78
Figura 5.38. Intersección con <i>ModClark1k</i>	79
Figura 5.39. Join de los atributos de intersección con <i>ModClark1k</i>	79
Figura 5.40. Unión de atributos finales.	80
Figura 5.41. Formato de exportación, <i>dBASE</i>	80
Figura 5.42. Tabla en formato de Excel para MPE.	81
Figura 5.43. Archivo de celdas para la cuenca del río Los Perros (<i>ModClarkCNPerros.txt</i>).....	82
Figura 5.44. Evento registrado en hidrométrica, año 1974.	84
Figura 5.45. Evento registrado en hidrométrica, año 1997.	85
Figura 5.46. Evento registrado en hidrométrica, año 2002.	86
Figura 5.47. Estaciones consideradas para calibración.....	87
Figura 5.48. Hidrograma y hietograma medidos para el año 1974.	88
Figura 5.49. Hidrograma y hietograma medidos para el año 1997.	89
Figura 5.50. Hidrograma y hietograma medidos para el año 2002.	90

Figura 5.51. Estaciones para calibración del evento del año 1997.	91
Figura 5.52. Perfil del cauce, cuenca del río Los Perros.	92
Figura 5.53. Archivo de Precipitación para calibración.	95
Figura 5.54. Archivo de escurrimiento para calibración.	96
Figura 5.55. Pestaña para el ingreso de la Información.	97
Figura 5.56. Ingreso de la información inicial.	97
Figura 5.57. Ingreso del archivo de celdas y de lluvia.	98
Figura 5.58. Pestaña de precipitación media.	98
Figura 5.59. Cálculo de la precipitación media.	99
Figura 5.60. Obtención del hietograma.	99
Figura 5.61. Ingreso del archivo de escurrimiento.	100
Figura 5.62. Pestaña de Escurrimientos.	100
Figura 5.63. Parámetros de calibración.	101
Figura 5.64. Hidrograma observado y calculado.	102
Figura 5.65. Tabla resumen volumen y caudal calculado/medido.	102
Figura 5.66. Regiones para el estado de Oaxaca.	106
Figura 5.67. Ubicación Geoespacial de las estaciones.	107
Figura 5.68. Elipses 1 y 2 para la RH 22.	117
Figura 5.69. Procesamiento de máximos para las elipses, CLICOM Instituto de Ingeniería.	117
Figura 5.70. Obtención de Simultaneidad para las elipses, CLICOM Instituto de Ingeniería.	118
Figura 5.71. Elipses 3 y 4 para la RH 22.	118
Figura 5.72. Elipses 5 y 6 para la RH 22.	119
Figura 5.73. Región Hidrológica 22 completa.	119
Figura 5.74. Ecuación de ajuste Área vs FRA, RH 22.	124
Figura 5.75. Error estándar de ajuste para elipse 3, registro simultáneo.	125
Figura 5.76. Error estándar de ajuste para elipse 3, registro no simultáneo.	125
Figura 5.77. Ajuste Gumbel para FRA-A-Tr.	128
Figura 5.78. Ajuste Doble Gumbel para FRA-A-Tr.	131
Figura 5.79. Distribución Gumbel, para región del Istmo. [Estudio para regionalizar los gastos generados por Avenidas Máximas, Instituto de Ingeniería UNAM, CENAPRED, 2017].	133
Figura 5.80. Factores de Convectividad. [Baeza, 2007, Actualización, Labrada M. 2018].	135
Figura 5.81. Ubicación de la zona de estudio para Factor de Convectividad.	136
Figura 5.82. Ecuación Polinomial de interpolación, R=045.	139

Figura 5.83. Hietograma de diseño, Tr 50 años.	141
Figura 5.84. Hietograma de diseño, Tr 100 años.	141
Figura 5.85. Hietograma de diseño, Tr 500 años.	142
Figura 5.86. Hietograma de diseño, Tr 1000 años.	142
Figura 5.87. Hietograma de diseño, Tr 5000 años.	142
Figura 5.88. Hietograma de diseño, Tr 10000 años.	143
Figura 5.89. Generación de avenida de diseño, Tr 20 años.	144
Figura 5.90. Hidrogramas de diseño para distintos periodos de retorno.	145
Figura 6.1. Sección del río con influencia de elevaciones de árboles.	146
Figura 6.2. Diferencias de elevaciones corroboradas, Global Mapper.	147
Figura 6.3. Selección de partes a depurar.	147
Figura 6.4. Extracción de las partes a depurar del ráster.	148
Figura 6.5. Identificación de espacios.	148
Figura 6.6. Llenado de vacíos utilizando el promedio de los valores más cercanos.	149
Figura 6.7. Generación de buffer de 15 metros.	149
Figura 6.8. Interpolación de la nueva elevación con las elevaciones originales.	150
Figura 6.9. Resultado de la interpolación.	150
Figura 6.10. Comparación de elevaciones originales con elevaciones depuradas.	151
Figura 6.11. Elevaciones originales del terreno.	152
Figura 6.12. Elevaciones con un proceso de depurado.	152
Figura 6.13. Importación archivo Shapefile.	153
Figura 6.14. Modelo colapsado de la zona de estudio.	154
Figura 6.15. Asignación n de Manning forma automática.	154
Figura 6.16. Asignación de los Usos de Suelo.	155
Figura 6.17. Ruta para ingresar las condiciones de frontera.	156
Figura 6.18. Hidrograma ingresado para un Tr de 20 años.	157
Figura 6.19. Asignación de entrada del hidrograma.	157
Figura 6.20. Asignación de salida del hidrograma.	158
Figura 6.21. Ruta para definición de las precipitaciones.	158
Figura 6.22. Hietograma Tr 20 años.	159
Figura 6.23. Asignación de la precipitación Tr 20 años.	159
Figura 6.24. Asignación del número de curva, método SCS.	160
Figura 6.25. Ruta para generación de malla.	161

Figura 6.26. Asignación del tamaño de malla.	162
Figura 6.27. Generación de malla para la zona de estudio.	162
Figura 6.28. Importar elevación para el modelo.	163
Figura 6.29. Modelo de terreno para la zona de estudio.....	164
Figura 6.30. Ingreso de tiempo de simulación.	164
Figura 6.31. Inicio de la simulación.	165
Figura 6.32. Ventana de proceso y término de simulación.....	165
Figura 6.33. Vista general de la zona de estudio con nivel de calado.....	166
Figura 6.34. Vista de la entrada del hidrograma.....	166
Figura 7.1. Sección del río Los Perros, Ciudad Ixtepec, Oaxaca.	167
Figura 7.2. Sección del río Los Perros, Ciudad Ixtaltepec, Oaxaca.	168
Figura 7.3. Sección del río Los Perros con obra de protección, Juchitán, Oaxaca.	168
Figura 7.4. Sección del río Los Perros con bordes en cauce, Juchitán, Oaxaca.....	168
Figura 7.5. Resultado en el tiempo 57600 s, para un TR 20 años.	169
Figura 7.6. Avenida TR 20 años, Ciudad de Ixtepec.	170
Figura 7.7. Velocidades TR 20 años, Ciudad Ixtepec.	171
Figura 7.8. Mapa de profundidad de agua para TR 20 años, Ciudades de Ixtaltepec y Juchitán, Oaxaca.....	172
Figura 7.9. Mapa de velocidades TR 20 años, Ciudades de Ixtaltepec y Juchitán, Oaxaca.	172
Figura 7.10. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtepec para un TR 50 años.	173
Figura 7.11. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 50 años.....	174
Figura 7.12. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 50 años.....	175
Figura 7.13. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtepec para un TR 50 años.	176
Figura 7.14. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 50 años.	177
Figura 7.15. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 50 años.	178
Figura 7.16. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtepec para un TR 100 años.....	179
Figura 7.17. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.....	180

Figura 7.18. Afectación en zona urbana, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.....	180
Figura 7.19. Tipo de vivienda, ciudad Ixtaltepec.....	181
Figura 7.20. Cauce del río Los Perros en condición actual, ciudad Ixtaltepec.	181
Figura 7.21. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 100 años.....	182
Figura 7.22. Afectación en zona urbana, Ciudad Juchitán para un TR 100 años.	183
Figura 7.23. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtepec para un TR 100 años.	184
Figura 7.24. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.....	185
Figura 7.25. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 100 años.	186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Estaciones climatológicas.	47
Tabla 4.2. Estación hidrométrica, Cuenca río Los Perros, Oaxaca.	49
Tabla 4.3. Registros de las estaciones climatológicas.	50
Tabla 4.4. Registro de la estación hidrométrica 22017.	51
Tabla 4.5. Registros de climatológicas e hidrométrica.	52
Tabla 5.1. Registro de la hidrométrica 22017, gastos máximos instantáneos.	83
Tabla 5.2. Estaciones contempladas para calibración.	86
Tabla 5.3. Estaciones para calibración del evento del año 1997.	90
Tabla 5.4. Resumen de pendiente media del cauce.	92
Tabla 5.5. Precipitaciones registradas a 24 hrs.	94
Tabla 5.6. Precipitaciones obtenidas a 1 hr.	94
Tabla 5.7. Registro de escurrimiento a 24 hrs.	94
Tabla 5.8. Registro de escurrimiento a 1 hr.	95
Tabla 5.9. Parámetros de Calibración.	103
Tabla 5.10. Factores de Reducción por Área obtenidos por Sánchez (2017).	104
Tabla 5.11. Estaciones contempladas para la RH 22, estudio CENAPRED.	107
Tabla 5.12. Registro de las estaciones climatológicas contempladas, Región Istmo.	108
Tabla 5.13. Registro de la estación climatológica contemplada, Región Pacífico.	110
Tabla 5.14. Registro de las estaciones climatológicas contempladas, Región Altiplano.	112
Tabla 5.15. Registro de la estación climatológica contemplada, Región Golfo.	114
Tabla 5.16. Lluvia máxima diaria.	120
Tabla 5.17. Ejemplo de máximos diarios simultáneos y no simultáneos, FRA para cada año de registro en común (elipse 3).	121
Tabla 5.18. Análisis de Simultaneidad y obtención del FRA para la elipse 3.	122
Tabla 5.19. Áreas de cada Elipse para la RH 22.	123
Tabla 5.20. Valores de lluvia extrapolados a diferentes periodos de retorno para registros simultáneos y no simultáneos, ajuste Gumbel.	126
Tabla 5.21. FRA por periodo de retorno, ajuste Gumbel.	127
Tabla 5.22. FRA para cada área y periodo de retorno, ajuste Gumbel.	128
Tabla 5.23. Valores de lluvia extrapolados a diferentes periodos de retorno para registros simultáneos y no simultáneos, ajuste Doble Gumbel.	129
Tabla 5.24. FRA por periodo de retorno, ajuste Doble Gumbel.	130
Tabla 5.25. FRA para cada área y periodo de retorno, ajuste Doble Gumbel.	130

Tabla 5.26. Ecuación del FRA para cada periodo de retorno, ajuste Gumbel.....	132
Tabla 5.27. Ecuación del FRA para cada periodo de retorno, ajuste Doble Gumbel.	132
Tabla 5.28. Factores regionales, región Istmo. [Estudio para regionalizar los gastos generados por Avenidas Máximas, Instituto de Ingeniería UNAM, CENAPRED, 2017].	134
Tabla 5.29. Relación $K = PdTP1T$ modificada en función de R y la duración d. [Modificada de Luna, 2013].....	137
Tabla 5.30. Interpolación para valores del factor k para cada 10 minutos, R=0.45.....	140
Tabla 5.31. Precipitaciones medias asociadas a periodos de retorno.	143
Tabla 5.32. Caudal de pico total para cada periodo de retorno.	145
Tabla 6.1. Gastos a ingresar al modelo.	156

RESUMEN

En este trabajo se realiza la estimación de avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno para la región hidrológica número 22, en específico para la cuenca del río Los Perros, que transita por tres ciudades principales como lo son las ciudades de Ixtepec, Ixtaltepec y Juchitán de Zaragoza, estas ciudades mencionadas pertenecen al estado de Oaxaca. Este río en los últimos años, ha registrado varios problemas de desbordamiento e inundación, que provoca afectaciones a los habitantes de esta zona.

Los métodos utilizados en este estudio se basan en la estimación de Factores de Reducción por Área que permite determinar la lluvia de diseño en grandes áreas, considera la relación entre las lluvias máximas anuales simultáneas y las máximas anuales no simultáneas que se registran en las estaciones climatológicas. Del mismo modo se apoya en Factores de Convectividad que relaciona la lluvia de 24 horas con la de una hora y con apoyo en Chen a duraciones menores a 24 horas, así como también en estudios de regionalización de lluvia y de funciones de distribución de probabilidad.

Las tormentas estadísticas que se obtienen del presente estudio y con apoyo en herramientas computacionales como el Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE), se obtienen avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno y con el modelo bidimensional IBER se simula las avenidas de diseño en el cauce del río Los Perros. Posteriormente se observa el comportamiento del río con las avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno, se simulan los TR de 20, 50 y 100 años respectivamente para su análisis de inundación de la zona de estudio.

Palabras clave: Factor de reducción por área, factor de convectividad, función de distribución de probabilidad, tormentas estadísticas, avenidas de diseño, modelo bidimensional.

ABSTRACT

In this work we estimate the design floods associated with different return periods for hydrological region number 22, specifically for the Los Perros river basin, which flows through three main cities such as the cities of Ixtepec, Ixtaltepec and Juchitán de Zaragoza, these cities belong to the state of Oaxaca. In recent years, this river has registered several problems of overflowing and flooding, which has affected the inhabitants of this area.

The methods used in this study are based on the estimation of Reduction Factors by Area that allow the determination of the design rainfall in large areas, considering the relationship between the maximum annual simultaneous rainfall and the maximum annual non-simultaneous rainfall registered in the climatological stations. It is also supported by Convectivity Factors that relate 24-hour rainfall to one-hour rainfall and supported by Chen at durations shorter than 24 hours, as well as by rainfall regionalisation studies and probability distribution functions.

The statistical storms obtained from the present study and with the support of computational tools such as the Runoff Forecasting Model, design floods associated with different return periods are obtained and the two-dimensional IBER model is used to simulate the design floods in the Los Perros riverbed. Subsequently, the behaviour of the river is observed with the design floods associated with different return periods, and the 20, 50 and 100 year TRs are simulated respectively for the flood analysis of the study area.

Key words: Reduction factor by area, convective factor, probability distribution function, statistical storms, design floods, two-dimensional model.

INTRODUCCIÓN

La estimación de avenidas de diseño es un problema fundamental para la hidrología superficial, esto se debe a que la determinación de las avenidas es de suma importancia, tanto para el adecuado desarrollo en la etapa de construcción de una obra, como para garantizar la seguridad de la misma. México se caracteriza por tener un enorme historial de estudios hidráulicos e hidrológicos y es a partir de datos hidrométricos y climatológicos que se estiman las avenidas, apoyado en métodos de lluvia-escorrimento; debido a que los registros de escurrimiento suelen ser escasos, estos métodos permiten determinar el escurrimiento utilizando características propias de la cuenca y de los datos de precipitación.

En la actualidad existen varias herramientas de cómputo que contribuyen en la aplicación de modelos de parámetros distribuidos. Se habla de modelos bidimensionales que ayudan a la estimación del escurrimiento apoyados en los datos de precipitación y de escurrimiento que se pueden obtener de la página del Clima Computarizado (CLICOM) y del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) respectivamente.

El programa *IBER* de modelo de flujo bidimensional desarrollado por el Instituto FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña de Barcelona, España, utiliza el método de volúmenes finitos y que tiene un módulo hidrológico para el desarrollo de avenidas en zonas inundables.

Este modelo mencionado se apoya con el programa *Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE)*, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que tiene como finalidad la obtención de los hidrogramas de escurrimiento de una cuenca, el programa usa el modelo de parámetros distribuidos que considera de una forma sencilla las pérdidas por evapotranspiración presentadas en el intervalo de tiempo de una tormenta a otra.

La cuenca analizada en este estudio se localiza en la Región Hidrológica 22 Tehuantepec, ubicada en el estado de Oaxaca, el río Los Perros en los últimos años ha registrado varios desbordamientos del cauce principal; este río cruza varias zonas urbanas, por lo que un incremento del tirante del río ocasiona serios problemas en las comunidades y daños considerables; el realizar estudios y pronósticos de las avenidas que puedan llegar a suscitarse, ayuda a reducir desastres de categorías mayores. Para llevar a cabo este análisis es importante contar con datos hidrológicos confiables para determinar avenidas de diseño que serán ocupadas para evaluar el riesgo en esta región.

En eventos registrados en la zona de estudio se encuentran los siguientes años:

En el año 2010 se desbordó el río en la ciudad de Juchitán por las intensas lluvias provocadas por la depresión tropical número 11-E, protección civil evacuó a por lo menos un ciento de personas.

En el año 2012 desbordó el río ocasionado por la construcción de un vado que disminuyó la altura de los bordos de protección de la corriente, este informe fue realizado por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur (OCPS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

En el año del 2017 se presentó un desbordamiento en la ciudad de Juchitán por las intensas lluvias provocadas por la tormenta tropical Beatriz, las autoridades reportaron la crecida del río y protección civil evacuó a varias familias de la zona para evitar un desastre mayor.

En el año 2021 por las tormentas tropicales que golpearon a Oaxaca que interactuaron con la onda tropical número 3, causaron desbordamiento de ríos y arroyos en especial el río Los Perros, en donde el desbordamiento se presentó en la parte alta del Istmo, 33 comunidades ubicadas en la Sierra Mixe-Zapoteca quedaron incomunicadas y al menos 1 000 viviendas afectadas en la ciudad de Juchitán de Zaragoza.

JUSTIFICACIÓN

Al registrar eventos hidrometeorológicos en los que el río Los Perros se ha desbordado surge la necesidad de realizar un estudio hidrológico de la zona que permita obtener avenidas ocasionadas por dichos eventos. Este estudio deberá ser sustentado principalmente con los registros de lluvia y escurrimientos, como también de estudios previos que aporten una mayor confiabilidad en los resultados a obtener.

El objetivo principal de esta tesis es estimar avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno, que posteriormente nos servirán para modelar la zona urbana por donde transita el río Los Perros y observar las afectaciones que se presentan.

Es importante mencionar que actualmente los sistemas computacionales aportan un gran apoyo en la estimación y análisis de avenidas de diseño, como por ejemplo conocer la planicie de inundación, estos sistemas con los que se apoya la presente tesis son de análisis bidimensional que considera diferentes direcciones de flujo, los cuales permiten conocer las zonas propensas a sufrir afectaciones importantes.

OBJETIVOS

En la realización del presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

- Recopilar información que garantice una adecuada estimación de avenidas de diseño, con 15 años de registro mínimo en estaciones climatológicas e hidrométrica de la zona de estudio.
- Analizar *Modelos Digitales de Elevación (MDE)* con apoyo de *Sistemas de Información Geográfica (SIG)* para obtener la cuenca de aportación a la zona de análisis y las características fisiográficas de la misma.
- Seleccionar un evento hidrometeorológico registrado en la estación hidrométrica como también en las estaciones climatológicas, que permitan calibrar un modelo lluvia-escurrimiento.
- Calibrar el *Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE)* con los registros de las estaciones contempladas.
- Estimar el *Factor de Reducción por Área (FRA)* de la región hidrológica número 22 para su uso posterior en tormentas estadísticas.
- Obtener avenidas de diseño a diferentes periodos de retorno para la cuenca de aportación de la zona urbana del río Los Perros.
- Simular las avenidas de diseño con apoyo de programa computacional (Iber)

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

La República Mexicana cuenta con diferentes estudios de estimación de avenidas de diseño, Martínez (2017) contempla estudios de regionalización, (Hincapié, 2016) considera además las políticas de operación de sistemas de presas, (Becerril, 2018) utiliza los análisis estadísticos y la mayorización de tormentas históricas; en otros estudios, se actualizan las avenidas de diseño de los ríos más caudalosos del país, por ejemplo, Ramírez (2011) actualizó las avenidas de las presas que se encuentran en la trayectoria del río Grijalva. Estas actualizaciones también se han realizado para las diferentes presas que se encuentran distribuidas a lo largo y ancho de la República, Castillo (2019) actualizó las avenidas de diseño de la presa Luis Donald Colosio “Huites” localizada al sureste del estado de Sinaloa, Reyes (2012) actualizó las de la presa del río Yaqui perteneciente al estado de Sonora, esto por mencionar algunos estudios.

La mayor importancia recae en la información climatológica e hidrométrica existente en los años en que se realizaron los estudios, así como las características fisiográficas de las diferentes zonas, aplicando en su mayoría las relaciones lluvia-escorrimento, análisis de los volúmenes de escurrimento y las diferentes técnicas estadísticas.

En la ingeniería hidráulica es necesario el cálculo del caudal o gasto de diseño, que para su correcta estimación es necesario contar con un buen registro, en la mayoría de los casos los registros (climatológicos e hidrométricos) son escasos, para esto, se recurre a diferentes métodos y a diferentes herramientas que ayudan a estimar de una forma adecuada.

Con el trascurso del tiempo se ha avanzado en la recopilación de datos, pero en específico en los modelos, que son utilizados para la estimación de los gastos y las descargas de cuencas rurales y urbanas. Que para el caso de las cuencas urbanas es necesario contemplar cada elemento constituyente del sistema de drenaje.

Para la obtención del gasto, Ponce (2019) menciona modelos de estimación del escurrimento, los cuales divide en dos: los de parámetros concentrados y los de parámetros distribuidos.

El primer modelo *Parámetros Concentrados*, se basa en la hipótesis de sistema lineal, transformando una serie temporal de entrada, en una serie de salida. La característica principal de estos modelos es que consideran una distribución espacial uniforme de lluvia en la cuenca. Los más comunes son: Fórmula Racional, Método de las Envolventes, Hidrograma Unitario (Tradicional y Curva S), Métodos Matriciales (Hidrograma Unitario Instantáneo), Hidrograma Unitario Sintético (Triangular, Chow y Adimensional).

El segundo grupo de modelos, de *Parámetros Distribuidos*, se basa en los principios físicos de conservación de la materia, que mantiene el balance de agua entre la lluvia, los escurrimientos, la evaporación e infiltración. Con herramientas de información geográfica (SIG) divide el sistema en celdas de área constante y forma regular, asignándoles parámetros y factores uniformes, como el tipo y uso de suelo y la pendiente, entre otros. La composición contempla a su vez dos submodelos conceptuales, el de producción de escurrimiento y el de traslación del escurrimiento.

Las herramientas computacionales son de gran utilidad, con equipos de cómputo más eficientes en los tiempos de simulación y de cálculo. Los programas se pueden agrupar en categorías, tales como son los modelos hidrológicos y los modelos hidráulicos principalmente, sin excluir los modelos hidrogeológicos.

El modelo *MIKE SHE*, es un modelo hidrológico que usa una discretización de la cuenca en celdas. Usa dos módulos, los cuales son el unidimensional y el bidimensional, donde en el primero representa el flujo vertical no saturado y el segundo la escorrentía saturada.

El *Sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS)*, del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, está diseñado para simular procesos hidrológicos de cuencas, que incluye procedimientos tradicionales como eventos de infiltración, hidrogramas unitarios, y enrutamiento hidrológico. Contempla a la vez los módulos para la evapotranspiración, derretimiento de nieve y cálculo de la saturación del suelo.

El *Sistema de Modelamiento de Precipitación-Escorrentía (PRMS)*, es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos, que representa los procesos físicos de una cuenca hidrográfica. Desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para evaluar los efectos de varias combinaciones de geomorfología, tipo y uso de suelo, vegetación y parámetros climáticos sobre la respuesta hidrológica de la cuenca.

El modelo *Distributed Basin Simulator (DBSIM)*, realiza una parametrización de los procesos de generación de escurrimientos de una forma más física que en el caso de los modelos conceptuales (Garrote y Bras, 1995).

Los programas *EPANET* y *SWMM* (Environmental Protection Agency EPA, EEUU, 1971) son modelos hidráulicos, el primero se utiliza para el abastecimiento y distribución de agua y la calidad de la misma, el segundo se desarrolla para la parte de drenaje y alcantarillado, estas dos herramientas son muy utilizadas debido a que es un software libre y no conlleva una gran inversión.

El modelo *International River Interface Cooperative (iRIC)* (iniciada por el profesor Yasuyuki Shimizu y el Dr. Jonathan Nelson, Japón, 2007) se desarrolló con la finalidad de proporcionar un entorno completo de simulación del cauce del río de forma gratuita, cuyos resultados pueden ser importados con fines de análisis, mitigación y prevención de desastres, mediante la visualización de los resultados de la simulación.

El modelo *HEC-RAS*, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos y considerado como un modelo hidráulico, simula los flujos de un río y utiliza la topografía para evaluar el tirante, las velocidades y las zonas inundadas.

En conclusión, existen variedad de modelos (hidrológicos e hidráulicos) que ayudan a la simulación de flujos y a la obtención de parámetros, esenciales para el desarrollo de los diversos proyectos de la ingeniería hidráulica.

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. HIDROLOGÍA

Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente.

La hidrología es una rama de la ingeniería civil, comúnmente llamada ingeniería hidrológica o hidrología aplicada, incluyendo partes de la hidrología a diseños y operaciones de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua (Aparicio, 2017).

2.2. PRECIPITACIÓN

Las gotas de lluvia constituyen el estímulo al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. El origen de la precipitación requiere que una parte de la atmósfera se enfríe hasta que el aire se sature con el vapor de agua, originándose la condensación. El enfriamiento de la atmósfera se logra por la elevación del aire. De acuerdo con la condición que provoca dicha elevación la precipitación puede ser por convección, orográfica y ciclónica (Springall, 1970).

2.3. ESCURRIMIENTO

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 2017).

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Los caminos se dividen en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Aparicio, 2017).

Escurrecimiento superficial: Es el flujo natural sobre el terreno, junto con el escurrimiento de corrientes, forma el escurrimiento superficial (Aparicio, 2017).

Escurrecimiento subsuperficial: Se le denomina a una parte del agua de precipitación que se infiltra, este escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él (Aparicio, 2017).

Escorrimento subterráneo: Se le denomina a la otra parte del agua de precipitación que se infiltra, y que llega hasta los niveles inferiores del freático (Aparicio, 2017).

2.4. PÉRDIDAS DE ESCURRIMIENTO

En la hidrología las pérdidas de escurrimiento se deben a factores que afectan directamente al volumen de agua que llueve en la cuenca y el que escurre por su salida; estos factores son principalmente, la evaporación, la infiltración, la retención y la intercepción. Estos tres últimos, son procesos difíciles de estimar por separado; se acostumbra a calcularse por conjunto y se denomina como infiltración, que es la parte más importante de las pérdidas.

2.5. INFILTRACIÓN

Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. En general el volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escurrimiento durante una tormenta, especialmente en cuencas con grado de urbanización relativamente bajo (Aparicio, 2017). La velocidad de infiltración es decreciente con el tiempo, esto es por la saturación que adquiere el suelo, que al inicio de una tormenta el suelo incrementa de forma rápida la infiltración y posterior al incremento, tiende a valores constantes, escurriendo sólo la diferencia.

La estimación de la infiltración puede ser realizada mediante distintos métodos entre los que destacan: La capacidad de infiltración media, coeficiente de escurrimiento y número de curva. Los procedimientos antes mencionados no consideran las variaciones en las características de la cuenca, sino que les asigna un valor único.

El criterio de la capacidad de infiltración media, hace la suposición que el suelo tiene una capacidad de infiltración constante durante toda la precipitación, de tal manera que, siempre que llueve con una intensidad menor que dicha capacidad, se infiltra todo lo que llueve, y cuando llueve con una intensidad mayor que la capacidad de infiltración, la diferencia escurre.

Para calcular la capacidad de infiltración correspondiente a una tormenta dada, se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo.
2. Se calcula la lámina de lluvia en exceso; como el cociente entre el volumen de escurrimiento directo y el área de la cuenca.
3. Se supone un valor del índice de infiltración denominado (ϕ) constante en el hidrograma de la tormenta y se determina la lámina de lluvia en exceso con dicho hidrograma. Si esta altura es igual a la calculada en el paso 2, el valor de (ϕ) es el correcto, si no se cumple, se propone otro y se repite el cálculo.

El criterio del coeficiente de escurrimiento supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de la precipitación, de tal manera que el volumen escurrido (V_{ED}), es igual al producto del volumen llovido (V_{LL}), por un coeficiente (C_E) llamado coeficiente de escurrimiento. Por tanto, éste se determina con:

$$C_E = \frac{V_{ED}}{V_{LL}} \quad (1)$$

El criterio del número de curva (Aparicio, 2017) establece una relación entre la precipitación total y la altura de lluvia en exceso de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{(P - \frac{508}{CN} + 5.08)^2}{p + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (2)$$

Donde

CN .-Número de Curva que puede calcularse con la ecuación (2) o con la ecuación (3), cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvias y escurrimientos, o bien con base en el tipo y uso de suelo como se verá más adelante.

P .-Precipitación total, cm

P_e .-Precipitación efectiva, cm

Si se dispone de la información de varias tormentas para las que se conoce la precipitación total p y la precipitación efectiva pe el valor del número de curva se despeja de la ecuación (2), lo que resulta:

$$CN = \frac{2540}{25.4 + 5p - 10pe - 5\sqrt{pe * (4pe - 5p)}} \quad (3)$$

Es importante recordar que la capacidad de infiltración media (ϕ), el coeficiente de escurrimiento (C_E) y el número de curva (CN), son indicadores que no son invariantes en una cuenca.

MÉTODO UNITED STATES SOIL CONSERVATION SERVICES (USSCS)

La relación entre el coeficiente de escurrimiento y la altura de precipitación total de una tormenta está dada por:

$$C_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P^2 + 0.8SP} \quad (4)$$

Donde P es la altura de precipitación de la tormenta y S es un parámetro por determinar, con las mismas unidades de P .

El parámetro S se puede estimar si se conocen varias parejas de valores (P, C_e); el valor de S puede tomarse como el que hace que la variancia del error cometido al calcular C_e con la ecuación (4), con respecto al coeficiente de escurrimiento real, sea mínima (Aparicio, 2017).

2.6. PERIODO DE RETORNO

El tiempo transcurrido entre eventos sucesivos que exceden un cierto valor, es una variable aleatoria cuyo valor medio es llamado periodo de retorno (T) o intervalo de recurrencia. La relación entre la probabilidad de excedencia y el periodo de retorno es la siguiente:

$$P = \frac{1}{T} \quad (5)$$

En donde P es la probabilidad de excedencia de un evento. Los términos frecuencia y periodo de retorno son a menudo usados indistintamente, aunque estrictamente hablando, frecuencia es el recíproco del periodo de retorno.

Usualmente, cuando se tienen datos de un cierto periodo, y se desea aplicar algún método estadístico para extrapolar dichos datos a periodos de retorno mayores al de las mediciones, es necesario asignar un valor de T a cada dato registrado. La siguiente expresión (conocida como fórmula de Weibull) se utiliza para asignar periodos de retorno a una serie de datos.

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (6)$$

Donde:

m es el número de orden en una lista de mayor a menor de los datos

n es el número de datos.

La probabilidad de no excedencia \bar{P} es la probabilidad complementaria de la probabilidad de excedencia P (probabilidad de que un evento con periodo de retorno se presente), se define como:

$$\bar{P} = 1 - \frac{1}{T} \quad (7)$$

La probabilidad de no excedencia de un evento en n años sucesivos es:

$$\bar{P}^n = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (8)$$

Por lo tanto, la probabilidad, o riesgo, que un evento pueda ocurrir al menos una vez en n años sucesivos se determina como:

$$R = 1 - \bar{P}^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (9)$$

2.7. HIETOGRAMA

El hietograma es la representación en barras de la variación de la altura de lluvia o de la intensidad de la lluvia en el tiempo. Si el intervalo seleccionado es pequeño, digamos 5 minutos, entonces la información proporcionada de la tormenta será muy detallada; conforme aumenta el valor del intervalo, el detalle se pierde. La Figura 2.1 muestra los hietogramas de alturas de precipitación e intensidades (Breña, 2006).

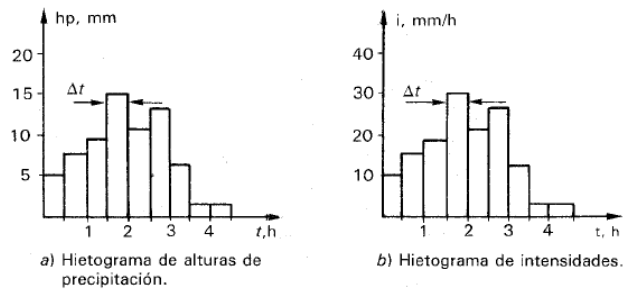


Figura 2.1. Hietogramas de alturas de precipitación e intensidades.

2.8. HIDROGRAMA

El hidrograma es una representación gráfica o tabular de la variación en el tiempo de los gastos que se escurren por un cauce. El gasto (Q) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (m^3/s) que escurre por un cauce (Breña, 2006). El hidrograma está compuesto por escurrimiento base (valor casi constante al cual tiende la curva de recesión) y escurrimiento directo (volumen que no se infiltra durante una tormenta). Figura 2.2.

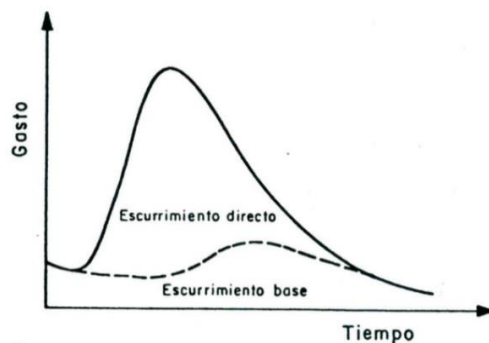


Figura 2.2. Diseño del hidrograma.

Los principales elementos de un hidrograma Figura 2.4 son:

- A. **Punto de levantamiento o inicio:** Es el punto donde el agua de la tormenta empieza a salir de la cuenca, este se produce inmediatamente después del inicio de la tormenta.
- B. **Punto de inflexión anterior al gasto máximo:** Este punto se presenta cuando inicia el flujo sobre el terreno.
- C. **Punto de gasto pico:** Es el punto más alto producido por la tormenta, así como el más importante del hidrograma para fines de diseño.
- D. **Punto de inflexión posterior al gasto máximo:** Este punto se presenta cuando termina el flujo sobre el terreno, posteriormente el escurrimiento ocurre por canales.
- E. **Punto en que termina el escurrimiento directo:** De este punto en adelante el escurrimiento solo es de escurrimiento base, excluye al generado por una tormenta.

Con base en los puntos anteriores se definen los siguientes conceptos:

Tiempo base (t_b): Tiempo que dura el escurrimiento directo desde el punto base (A) hasta el final de este (E).

Tiempo pico (t_p): Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento o inicio (A) hasta el punto del gasto pico del hidrograma (C).

Tiempo de retraso (t_r): Es el tiempo que hay entre el centroide del hidrograma de lluvia en exceso y el punto del gasto pico del hidrograma (C).

Curva de recesión del escurrimiento superficial: Es el segmento del hidrograma entre los puntos (D) y (E).

Curva de recesión del escurrimiento base: Es el segmento del hidrograma posterior al punto (E).

Para separar el escurrimiento directo (proviene directamente de la tormenta) del escurrimiento base (producto del flujo subterráneo), los métodos más utilizados son los siguientes:

Método A: La frontera se define trazando una recta horizontal que parte del punto de inflexión del inicio del escurrimiento directo (A), y concluye hasta donde corte al hidrograma.

Método B: La frontera se define trazando una recta entre los puntos (A) y (E). Para encontrar el punto (E) se obtiene la curva de vaciado del escurrimiento base, analizando primero una serie de hidrogramas y seleccionando tramos en los que solo exista escurrimiento base; los tramos seleccionados se dibujan en papel semilogarítmico, representando en el eje aritmético el tiempo y en el logarítmico el gasto, y se desplazan horizontalmente tratando de definir una sola curva (Figura 2.4).

Si en alguno de los tramos seleccionados existiera escurrimiento directo, éste se manifiesta en la gráfica con un cambio de pendiente; en tal caso el tramo debe ser excluido.

La curva de vaciado deducida se superpone al hidrograma por analizar, se hace coincidir en el extremo derecho y se determina el punto (E) como aquél en que la curva se separa del hidrograma.

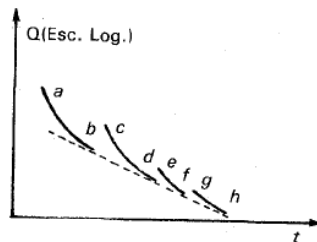


Figura 2.3. Tramos seleccionados dibujados posteriormente en papel semilogarítmico.

La curva de vaciado puede ajustarse a una ecuación del tipo:

$$Q = Q_0 e^{-Kt} \quad (10)$$

Eligiendo dos puntos de la curva de vaciado, Q_0 y K pueden determinarse fácilmente resolviendo el sistema de ecuaciones.

Método C: La frontera se traza mediante los siguientes pasos:

1. Se traza una línea horizontal a partir del punto de inflexión (A), hasta la proyección del punto (C) que corresponde al gasto pico.
2. Se calcula N (Aparicio, 2017) como:

$$N = 0.827 A^{0.2} \quad (11)$$

Donde

N Tiempo de vaciado del escurrimiento directo, en días.

A Área de la cuenca, en km^2 .

3. A partir del punto C' se toma una distancia horizontal igual a N para definir el punto (E).

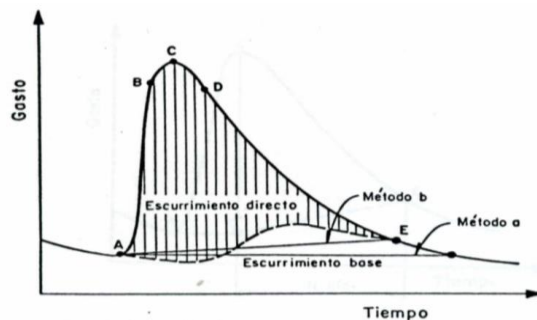


Figura 2.4. Componentes de un hidrograma.

El volumen total de escurrimiento se puede obtener como el área bajo la curva del hidrograma, es decir $\int_{t_0}^t Q dt$, el volumen de escurrimiento directo es entonces $\int_{t_0}^t (Q - Q_b) dt$ (Aparicio, 2017).

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1. FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA (FRA)

En un área determinada no se presentan, generalmente, lluvias máximas en diferentes puntos al mismo tiempo, es decir, de forma simultánea. La simultaneidad se define como la correcta medición de un evento hidrológico máximo en un mismo tiempo y en diferentes lugares (Torres, 2013).

Los modelos hidrológicos tradicionales consideran los máximos anuales puntuales, lo cual lleva a sobreestimar la precipitación.

El Factor de Reducción por Área (FRA) es un coeficiente que sirve para convertir precipitaciones puntuales con una duración y un periodo de retorno, dando como resultado precipitaciones areales de la misma duración y periodo de retorno de una región específica.

Este factor define la magnitud de la altura de lluvia como una función del área donde ocurre, y se utiliza cuando se desea conocer la precipitación media del área de estudio (Mena, 2004). Esta precipitación se obtiene al aplicar el FRA de la siguiente manera:

$$P_a = FRA * P_p \quad (12)$$

P_a , precipitación areal en mm en la zona para la duración y el periodo de retorno en estudio.

FRA , Factor de Reducción por Área en función de la duración de la lluvia, área de interés y periodo de retorno.

P_p , Precipitación media en mm de los valores puntuales para el área, el periodo de retorno y la duración de interés.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado estudios de regionalización de lluvias máximas anuales para toda la república mexicana (CENAPRED, 2017). Los resultados permiten estimar de manera muy confiable lluvias puntuales para cualquier cuenca de México. Asimismo, existen estudios elaborados por diversos autores en los que han estimado el FRA en diferentes zonas de la República Mexicana. Esto permite pasar de hietogramas puntuales a hietogramas promedio de cada cuenca para obtener los valores de precipitación asociados a cualquier periodo de retorno para duraciones de un día para cualquier sitio del territorio mexicano (Carrizosa, et al, 2016).

3.1.1. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE FRA

El caudal de diseño del cual depende el dimensionamiento de las obras hidráulicas puede estimarse mediante métodos hidrometeorológicos o a través del análisis estadístico de caudales máximos. En el primer caso debe calcularse la tormenta de diseño asociada a un periodo de retorno y convertirla en avenida a través de un modelo lluvia – escurrimiento. En el segundo, deben ser analizados datos de caudales máximos registrados en una estación hidrométrica ubicada en la zona de estudio.

En la mayoría de las ocasiones no se cuenta con información suficiente de caudales en el sitio de estudio, y en el caso de contar con ellos, éstos no son lo suficientemente extensos y confiables. Por esta razón, es común la utilización de modelos lluvia – escurrimiento. Para la aplicación de estos modelos se utilizan máximos anuales puntuales lo cual tiende a sobre estimar la precipitación al no considerar el efecto de la no simultaneidad de las lluvias, es decir, el hecho de que las lluvias máximas no se presentan al mismo tiempo en todas las estaciones consideradas (Guichard et al., 2006). Los factores de Reducción por Área son utilizados para convertir una *lluvia puntual* en una *lluvia areal* a fin de obtener los eventos de diseño necesarios para la construcción de estructuras hidráulicas.

El concepto del FRA surge en los Estados Unidos, en la década de los años 60 (US Weather Bureau, 1957; Hershfield, 1962). En los años 70, dichos factores empezaron a utilizarse en el Reino Unido (NERC, 1975; Bell, 1976). Hershfield en 1962 identificó dos tipos de FRA, los de centro de tormenta y los de área geográfica fija.

REGISTRO SIMULTÁNEO

El registro simultáneo es aquel en donde las estaciones contempladas cuentan con el registro de una tormenta registrada en un día o varios días. Para su cálculo se promedian las precipitaciones de cada día del año de las estaciones que están dentro del círculo (mínimo tres estaciones), en seguida, se obtiene el valor máximo de estos promedios. Este procedimiento se repite para cada año de registro común con el que cuenten las estaciones. El valor obtenido será el registro simultáneo máximo para cada año.

REGISTRO NO SIMULTÁNEO

El registro no simultáneo es aquel que en una tormenta dada las estaciones no registran el evento de lluvia, pero otras si cuentan con ese registro. Para cada estación se obtiene el máximo anual. El registro no simultáneo de máximos, se obtiene al promediar los máximos anuales para cada estación y este proceso se repite para cada año de registro en común.

OBTENCIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA

Al obtener los registros simultáneos y los registros no simultáneos, se obtiene un FRA para cada año de registro con el siguiente cociente.

$$FRA = \frac{P_S}{P_{NS}} \quad (13)$$

FRA, Factor de Reducción por Área para cada año de registro en común.

P_S , Promedios máximos simultáneos. Se obtienen al promediar las precipitaciones máximas diarias de cada estación para cada año de registro en común.

P_{NS} , Promedios máximos no simultáneos. Se obtienen al promediar las precipitaciones diarias máximas (sin importar si se presentan en diferentes días) para cada año de registro en común.

3.2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Al asignar un periodo de retorno a un evento hidrológico a una obra de diseño, generalmente es necesario, para conocer dicho evento de diseño, hacer extrapolaciones a partir de eventos registrados, pues rara vez este periodo es menor al periodo de datos.

Por ejemplo, puede ser necesario determinar un gasto de diseño con periodo de retorno de 1 000 años a partir de 25 años de registro. Si los gastos máximos anuales registrados se dibujan contra sus respectivos periodos de retorno, generalmente se observa alguna tendencia más o menos definida. El problema radica en cómo extender esta tendencia hasta el periodo de retorno deseado. Una posibilidad es extrapolar los datos a ojo, es decir, gráficamente. Aunque este método puede dar buenos resultados si se aplica por una persona con experiencia, tiene la desventaja de la subjetividad; esto es, si veinte ingenieros diferentes lo aplican, es probable que el resultado sean veinte gráficas diferentes.

Para eliminar cualquier subjetividad, se debe buscar una función de distribución que se ajuste mejor a los datos medidos, y usar esta función para la extrapolación.

En la estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas; de hecho, existen tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema en particular. Por lo tanto, es necesario escoger, de esas funciones, las que se adapten mejor al problema bajo análisis (Aparicio, 2017).

A continuación, se presentan algunas de las funciones de distribución de probabilidad más comunes en hidrología:

3.2.1 DISTRIBUCIÓN GUMBEL

La función de densidad Gumbel (Escalante, 2008) se escribe de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)}} \quad (14)$$

Donde:

v= Parámetro de ubicación

α = Parámetro de escala

Variable reducida Gumbel

$$y_i = \frac{x_i - v}{\alpha} \quad (15)$$

Estimadores por momentos

$$v = \bar{x} - 0.45S \quad (16)$$

$$\hat{\alpha} = 0.78S \quad (17)$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad (18)$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad (19)$$

El criterio de convergencia:

$$\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0 \quad \frac{-R}{\hat{\alpha}} \approx 0 \quad (20)$$

Incrementos:

$$\delta_{v_i} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_i}{n} \quad (21)$$

$$v_{j+1} = v_j + \delta_{v_i} \quad (22)$$

$$\delta_{\alpha_i} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_i}{n} \quad (23)$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta_{\alpha_i} \quad (24)$$

Estimadores por momentos L

$$\hat{\nu} = \lambda_1 - 0.577216\alpha \quad (25)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\lambda_2}{\ln(2)} \quad (26)$$

Los eventos de diseño se obtienen con:

$$\hat{X}_T = \nu - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (27)$$

3.2.2. DISTRIBUCIÓN DOBLE GUMBEL

Cuando existe un proceso en el cual se observa que los datos se comportan como dos poblaciones, la función Doble Gumbel generalmente es la que mejor se ajusta.

La función de densidad Doble Gumbel se escribe de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{p}{\alpha_1} e^{\left\{ -e^{-\left[\frac{x-M_1}{\alpha_1} \right]} \right\}} e^{-\left[\frac{x-M_1}{\alpha_1} \right]} + \frac{(1-p)}{\alpha_2} e^{\left\{ -e^{-\left[\frac{x-M_2}{\alpha_2} \right]} \right\}} e^{-\left[\frac{x-M_2}{\alpha_2} \right]} \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (28)$$

Dónde:

Primera población

M1= Ubicación

α_1 = Escala

Segunda población

M2= Ubicación

α_2 = Escala

Estimadores

$$\ln L(x, \theta) = \sum_{i=1}^n \ln\{f(x)\} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial M_1} = \frac{p}{\alpha_2^2} = 0 \quad \frac{\partial \ln L}{\partial M_2} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha_1} = 0 \quad \frac{\partial \ln L}{\partial \alpha_2} = 0 \quad \frac{\partial \ln L}{\partial p} = 0 \quad (31)$$

Los eventos de diseño se obtienen con:

$$\hat{X}_T = pe^{-\left\{e^{\left[\frac{X_T - M_1}{\alpha_1}\right]}\right\}} + (1 - p)e^{\left\{e^{\left[\frac{X_T - M_1}{\alpha_1}\right]}\right\}} - \left[1 - \frac{1}{T}\right] \quad (32)$$

El programa AX, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el CENAPRED (Jiménez, 1992) permite realizar ajustes de algunas funciones de distribuciones de probabilidad. El programa muestra cual es el mejor ajuste mostrando la distribución de menor error cuadrático. Asimismo, muestra una gráfica con los datos y la distribución de probabilidad asignada.

3.3. ARCVIEW 3.2

ArcView es un programa, desarrollado por el *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) de Redlands, California, que se utiliza para analizar sistemas de información geográfica (SIG). Se diferencia de Arc/Info, en que está diseñado para desarrollar información de SIG, mientras que ArcView lo está para interactuar con información que ya ha sido creada (ESRI, 2005).

Todas las actividades de ArcView están organizadas en un Project (.apr), que puede consistir en *Views* (vistas), *Tables* (tablas), *Charts* (gráficas), *Layouts* (presentaciones), y *Scripts* (programas). Los *Scripts* deben desarrollarse en lenguaje Avenue.

Las funciones de ArcView incluyen: presentar temas en una vista, presentar las correspondientes tablas, relacionar las tablas mediante campos clave, crear gráficas para presentar información geográfica y crear presentaciones para exhibir la información contenida en las vistas, gráficas y tablas

Recientemente se ha solido emigrar a Argis/Arcmap de ESRI, y también existen softwares libres que realizan varias funciones de estos programas, como por ejemplo QGIS.

3.4. MODELO MPE

El programa computacional Modelo para Pronóstico de Escurrimiento (MPE) fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, (Domínguez et al. 2008), con el objetivo de obtener el Hidrograma de Escurrimiento de una cuenca con el modelo de parámetros distribuidos considerando de una manera más sencilla las pérdidas por evapotranspiración que se presentan en el intervalo de tiempo de una tormenta a otra y ajustándose a la información disponible para su análisis.

El programa con la información adecuada obtiene:

1. El área de la cuenca
2. La precipitación media de la cuenca
3. El hietograma de precipitación
4. Las pérdidas
5. La lluvia en exceso
6. El gasto total, directo, base y máximo
7. El Hidrograma de escurrimiento de la cuenca.

3.4.1. PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA EN LA CUENCA

La distribución de la lluvia se obtiene interpolando la precipitación registrada en la red de estaciones pluviográficas, con el método de Shepard.

MÉTODO DE SHEPARD

Este método consiste en obtener una media pesada de los valores registrados en N sitios próximos al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto por interpolar a los puntos con datos que lo rodean. El método de Shepard es parecido al del inverso de la distancia, pero introduce procedimientos de mínimos cuadrados.

La función $hp: z = hp(x, y)$ para $(x, y) \in B$, donde B es una región arbitraria del plano x, y ; se interpola para los puntos x_j, y_j dados por la función:

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N W_j(x, y) hp_j \quad (33)$$

Donde el factor de peso de cada estación se determina como:

$$W_j(x, y) = \frac{\frac{1}{r_j^\mu}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^\mu}} \quad (34)$$

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (35)$$

Donde

$\phi(x, y)$ Punto por interpolar.

N Número de estaciones de lluvia.

W_j Factor de peso en la estación j .

hp_j Lluvia en la estación j .

$r_j(x, y)$ Distancia desde el punto (x, y) a la estación j .

μ Coeficiente de calibración.

Se recomienda que $2 \leq \mu \leq 6$

La ecuación (33) se le llama método global o general de Shepard, al considerar todos los puntos N . En algunas ocasiones es necesario limitar el número de datos por interpolar. Shepard ha indicado una modificación para el cálculo de $W_j(x, y)$, la cual utiliza solamente los puntos (x_j, y_j) de un círculo de radio R alrededor del punto (x, y) . A este procedimiento se le llama método local de Shepard, donde W se determina con los parámetros de Franke-Little:

$$\xi_j = \left\{ \begin{array}{ll} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x, y) < R \\ 0 & \text{para } r_j(x, y) \geq R \end{array} \right\} \quad (36)$$

Donde

R .-Distancia máxima a considerar para hacer la interpolación

$r_j(x, y)$. –Distancia desde el punto (x, y) a la estación j

La ecuación para determinar el factor de peso w resulta:

$$W_j(x, y) = \frac{\xi_j^u(x, y)}{\sum_{i=0}^N \xi_j^u(x, y)} \quad (37)$$

3.4.2.- ESCURRIMIENTO DIRECTO

El método empleado es el de las Abstracciones o Número de Curva del SCS (*Soil Conservation Service*), siendo un método sencillo para el cálculo de la precipitación efectiva en función de la precipitación acumulada, también se considera la cobertura del suelo, el uso del mismo y las condiciones de humedad.

MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA

Este método de número de curva del Soil Conservation Service (SCS-CN) se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales. La primera establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial. La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (38)$$

$$\frac{p_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (39)$$

$$I_a = \lambda S \quad (40)$$

Donde

P Precipitación total

I_a Infiltración inicial

F_a Infiltración acumulada

P_e Precipitación efectiva

S Infiltración potencial máxima

La versión actual del método supone que $I_a = 0.2S$ para aplicaciones prácticas. En la forma más extendida del método se determina a partir de las ecuaciones (38), (39) y (40).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}; I_a \leq P \quad (41)$$

Sustituyendo $I_a = 0.2S$ en la ecuación (41)

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (42)$$

El valor de S , en centímetros se obtiene de

$$S = \frac{2540 - (25.4xCN)}{CN} \quad (43)$$

Obteniendo de la sustitución de la ecuación (43) se llega a la ecuación presentada por Aparicio, 2017, definida como ecuación (2).

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

Donde

P_e Precipitación efectiva, en cm.

P Precipitación acumulada total, en cm.

CN Número de curva que depende del tipo y uso de suelo de la cuenca.

$$0 \leq CN \leq 100$$

3.4.3.- PÉRDIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN

Las pérdidas por evapotranspiración contemplan la parte de lluvia que no llega a infiltrarse, que, a su vez por el clima y la temperatura, se evapora; el parámetro contempla las pérdidas que se presentan de una tormenta a otra. De lo contrario, al presentarse el segundo evento de lluvia, el suelo se encontraría saturado y el escurrimiento se presentaría del total de lluvia, lo cual no es cierto, el método para calcular estas pérdidas se apoya en el factor de olvido.

FACTOR DE OLVIDO

Este factor es utilizado para considerar el secado del suelo posterior a presentarse una lluvia, es una contribución que tiene el modelo MPE, se hace una modificación al método SCS, en el cálculo de la precipitación acumulada se multiplica por el factor de olvido, esto hace que la importancia de las lluvias antecedentes vaya disminuyendo conforme transcurre el tiempo. Al usar el factor de olvido, se calcula la precipitación acumulada neta.

$$P_{an} = P_1 * f x^{n-1} + P_2 * f x^{n-2} + \dots P_n * f x^{n-n} \quad (44)$$

Donde

P_{an} Precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo n , en cm.

P_n Precipitación en el intervalo de tiempo n , en cm.

f_x Factor de olvido, menor que 1.

3.4.4.- MODELO DE TRANSFERENCIA DE ESCURRIMIENTO, MÉTODO DE CLARK MODIFICADO

La transferencia del escurrimiento desde cualquier punto de la cuenca hasta su salida se puede modelar por medio de una agregación simple, usando un hidrograma unitario distribuido. El método que se usa con frecuencia es el hidrograma unitario distribuido de Clark modificado (Figura 3.4), que consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda inicial hasta la celda de salida, combinado un mapa de isócronas (curvas de igual tiempo de viaje) con la regulación en un embalse lineal.

Este método requiere la estimación de dos parámetros para determinar el hidrograma de la cuenca; el tiempo de concentración T_c y el coeficiente de atenuación por almacenamiento k .

El tiempo de concentración T_c se define como el tiempo que le toma a la precipitación excedente alcanzar la salida de la cuenca desde su punto de vista hidráulicamente más remoto. Es una medida de retraso puro. Sin tomar en cuenta el efecto de almacenamiento. En la bibliografía existen varias ecuaciones para calcular el tiempo de concentración T_c ; la ecuación empleada por el modelo MPE es la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.000325 x \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (45)$$

Donde:

T_c Tiempo de concentración, h

L Longitud del cauce principal, m

S Pendiente del cauce principal

El coeficiente de atenuación por almacenamiento k , es una medida de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural.

$$k = 0.6T_c \quad (46)$$

Donde

k El coeficiente de almacenamiento, en horas.

T_c Tiempo de concentración, en horas.

Al escurrimiento transitado se le aplica el método de Muskingum, para considerar el tiempo de retraso o por almacenamiento.

$$S_{prisma} = k O \quad (47)$$

$$S_{cuña} = k x (I - O) \quad (48)$$

$$S = k[x I + (1 - x)O] \quad (49)$$

Donde

S Almacenamiento en el tramo considerado (en unidades de volumen)

I Caudal de entrada en ese tramo

O Caudal de salida de ese tramo

k y x Constantes para ese tramo del cauce.

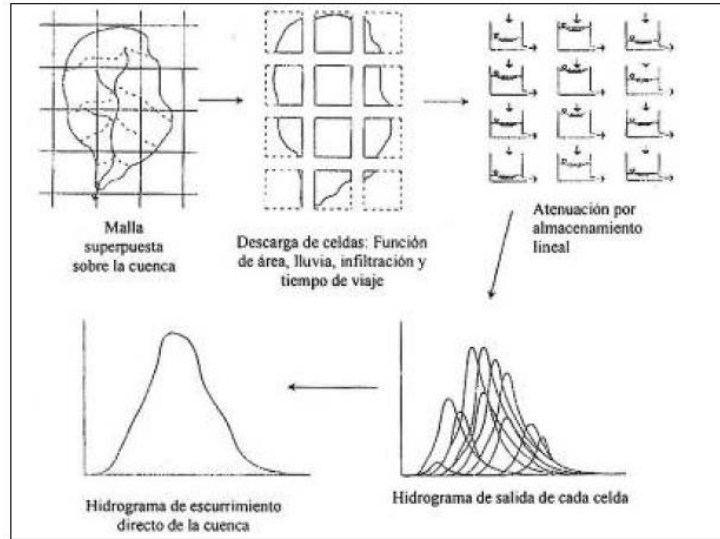


Figura 3.1. Método de Clark Modificado. (Domínguez et al., 2008)

Aplicado a dos intervalos de tiempo:

$$S_1 = k[xI_1 + (1 - x)O_1] \quad (50)$$

$$S_2 = k[xI_2 + (1 - x)O_2] \quad (51)$$

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \quad (52)$$

$$C_0 = \left(\frac{-kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (53)$$

$$C_1 = \left(\frac{kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (54)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (55)$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (56)$$

Despreciando el almacenamiento en cuña $x = 0$, resulta:

$$C_0 = C_1 = \left(\frac{0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad (57)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - 0.5\Delta t}{k + 0.5\Delta t} \right) \quad (58)$$

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (59)$$

Donde los valores de O y de I se encuentran en unidades de caudal, (m^3/s).

En el SIG se obtiene las longitudes de viaje de cada celda, que posteriormente son convertidas por el MPE en tiempos de viaje para crear las isócronas que requiere el método de Modificado de Clark para la transferencia del escurrimiento:

$$T_t = T_c \left(\frac{Lv_N}{Lv_n} \right) \quad (60)$$

Donde:

T_c Tiempo de concentración, h

T_t Tiempo de tránsito o tiempo de viaje desde la celda que se analiza, h

Lv_N Longitud de viaje de la celda más lejana

Lv_n Longitud de viaje de la celda que analiza

3.4.5.- CALIBRACIÓN

Los modelos hidrológicos deben ser calibrados y verificados antes de utilizarse en análisis y diseños de ingeniería.

Para cada cuenca en particular será necesario calibrar los parámetros Ia, S y fx (llamados parámetros de pérdidas) y los parámetros Tc, k (llamados parámetros de forma), y comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.

3.5.- MODELO IBER

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de mareas en estuarios. (Bladé et al., 2014).

El modelo Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

3.5.1.- MÓDULO HIDRODINÁMICO

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como *2D Shallow Water Equations (2D-SWE)* o *Ecuaciones de Saint Venant bidimensionales*. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad, cumpliéndose habitualmente en el flujo de ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios.

3.5.2.- MÓDULO DE TURBULENCIA

Un gran número de estudios en ingeniería hidráulica implica el análisis de flujos en lámina libre, muchos de los cuales pueden considerarse flujos poco profundos, refiriéndonos con el término poco profundo a una relación entre dimensiones vertical y horizontal pequeño. Prácticamente la totalidad de flujos en lámina libre son turbulentos. En cualquier río pueden observarse pequeños remolinos que aparecen y desaparecen con un movimiento aparentemente caótico, mostrando la complejidad del movimiento turbulento.

Una de las principales características de Iber es la inclusión de diversos modelos de turbulencia tipo RANS, los cuales se resuelven en el módulo de turbulencia. Se incluyen los siguientes modelos de turbulencia para aguas someras, por orden creciente de complejidad:

- Viscosidad turbulenta constante
- Modelo parabólico
- Modelo de longitud de mezcla
- Modelo k- ϵ de Rastogi y Rodi (Rastodi y Rodi, 1978).

La inclusión de modelos de turbulencia de diferente complejidad permite seleccionar el más adecuado en cada caso de estudio, teniendo en cuenta la complejidad del flujo y del modelo.

3.5.3.- MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El módulo de transporte sólido resuelve las ecuaciones de transporte de sedimentos no-cohesivos en régimen no estacionario. Se resuelven tanto las ecuaciones de transporte de fondo como las ecuaciones de transporte en suspensión, modelándose el acoplamiento entre la carga de fondo y la carga en suspensión mediante un término de sedimentación/resuspensión. El módulo de transporte de sedimentos utiliza el campo de velocidades, calados y de turbulencia proporcionado por los módulos hidrodinámicos y de turbulencia. El caudal sólido de fondo se calcula mediante una formulación empírica, pudiéndose elegir entre la formulación de Meyer-Peter Muller y la de Van Rijn. El transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación de transporte turbulento promediada en profundidad.

Para fines del presente trabajo se utilizará en mayor parte el módulo hidrodinámico para flujo a superficie libre. La herramienta Iber contempla los siguientes procesos como son: la fricción de fondo y la infiltración.

3.5.4.- FRICCIÓN DE FONDO

El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido; la fricción de fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia. Ambos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de fricción U_f , que no es más que una forma de expresar la tensión tangencial de fondo con unidades de velocidad.

$$U_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (61)$$

Donde:

τ_b Es el módulo de la fuerza de fricción de fondo, (N/m²)

ρ Es la densidad del agua, (kg/m³)

3.5.5.- INFILTRACIÓN

En la simulación de procesos de precipitación es necesario considerar la infiltración de agua en el terreno no saturado para el cálculo del escurrimiento superficial. El modelado de la infiltración de agua superficial en el terreno es especialmente importante en la simulación de la transformación de lluvia-escurrimiento.

La infiltración se considera en el modelo mediante un término negativo en la ecuación de conservación de masa.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = -i \quad (62)$$

Donde i es la tasa de infiltración real, calculada como el mínimo entre la tasa de infiltración potencial f (capacidad de infiltración del terreno en cada instante, que depende de las condiciones y características del suelo), y la cantidad de agua superficial disponible para infiltrarse.

$$i = \min\left(f, \frac{h}{\Delta t}\right) \quad (63)$$

Para calcular la infiltración potencial se implementan 3 modelos de infiltración comúnmente utilizados, que son los que se describen a continuación:

MODELO DE GREEN-AMPT

La tasa de infiltración, expresada en m/s , se calcula en cada celda utilizando la formulación de Green-Ampt (Chow, 1988), en la cual se asume que existe un frente saturado que separa la región de suelo saturada, inmediatamente bajo el terreno, y la región de suelo no-saturada, en la cual existe una succión.

A medida que la infiltración aumenta, el frente saturado desciende y la anchura de la región saturada L aumenta. La tasa de infiltración potencial f se calcula con la siguiente expresión:

$$f = k_s \left(1 + \frac{(h + \Psi)\Delta\theta}{L_0\Delta\theta + F} \right) \quad (64)$$

$$F = \int_0^t f \, dt \quad (65)$$

$$L = L_0 + \frac{F}{\Delta\theta} \quad (66)$$

$$\Delta\theta = \phi - \theta_i \quad (67)$$

Donde:

k_s La permeabilidad saturada del suelo

h Tirante o profundidad

ψ La succión en la región de suelo no saturada

$\Delta\theta$ El cambio en la humedad del suelo a medida que el frente de saturación avanza

θ_i La humedad inicial del suelo

ϕ La porosidad total del suelo

L El espesor de la región de suelo saturada

La tasa de infiltración real es igual a la tasa de infiltración potencial siempre y cuando haya suficiente agua superficial para infiltrarse.

Los parámetros a introducir por el usuario para este modelo son:

- Permeabilidad saturada del suelo (k_s)
- Succión en la región del suelo no-saturado(ψ)
- Porosidad efectiva (drenable) del suelo (θ_e)
- Saturación efectiva inicial del suelo (S_e) definido como:

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_e} \quad (68)$$

Siendo θ_r la capacidad de retención (humedad no drenable) del suelo y θ_i la humedad inicial del suelo. La porosidad del suelo ϕ es igual a la porosidad drenable más la capacidad de retención del suelo ($\phi = \theta_e + \theta_r$). A partir de la porosidad efectiva y de la saturación efectiva inicial del suelo, se calcula el cambio en el contenido de humedad del suelo a medida que el frente de saturación avanza como:

$$\Delta\theta = \phi - \theta_i = \phi - \theta_r - \theta_e S_e = \theta_e(1 - S_e) \quad (69)$$

Todos los parámetros de la ecuación de Green-Ampt se pueden introducir espacialmente (diferentes para cada elemento de la malla cálculo).

HORTON

En el modelo de Horton se calcula la tasa de infiltración potencial como:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)\exp(-kt) \quad (70)$$

Siendo t el tiempo desde el comienzo de la precipitación. Los parámetros que ingresa el usuario son:

f_c .-La tasa de infiltración a tiempo infinito

k .-La constante de variación temporal de la tasa de infiltración potencial

Las constantes antes mencionadas se pueden introducir para cada elemento de la malla de cálculo.

LINEAL

El modelo lineal considera una abstracción inicial P_0 (volumen por unidad de área), y a continuación unas pérdidas continuas constantes (volumen por unidad de área y por unidad de tiempo). El valor tanto de la abstracción como de las pérdidas continuas puede variar de elemento a elemento.

CAPÍTULO 4. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

4.1. ZONA DE ESTUDIO

El estado de Oaxaca es uno de los estados de la República Mexicana que en época de lluvia es afectado en su mayoría, esto se debe a su ubicación geográfica a la cual pertenece, en específico en la cuenca del río Los Perros se presentan afectaciones por el desbordamiento de éste, como el documentado en el año 2019, ocasionado por el ciclón tropical 17-E2, cuando el río desbordó y afectó a varias poblaciones cercanas, ciudades como Juchitán se vieron afectadas, así también poblaciones como Santa María Xadani y en los cultivos agrícolas lo cual ocasionó severas pérdidas económicas.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Organismo de Cuenca Pacífico Sur (OCPS), fue la encargada de evaluar el comportamiento de los puntos críticos del afluente, principalmente el de los bordos que se colapsaron en el segmento ubicado en Santa María Xadani. Al hacer un balance de daños estos fueron mitigados y reducidos por trabajos preventivos realizados por comités ciudadanos, que desarrollaron trabajos de desazolve a lo largo de 7 km del río, evitando un desastre mayor.

Es por ello que es necesario tener un buen programa de prevención de desastres, por tal motivo, los estudios hidrológicos resultan ser de alta importancia para diseñar estructuras acordes a las avenidas que puedan suscitarse en la zona, en este trabajo se realizará tanto la obtención de la avenida de diseño como la simulación del sitio de estudio para poder evaluar de una mejor forma las estructuras y trabajos para poder reducir y mitigar las afectaciones que pueda generar un evento hidrometeorológico.

La información disponible resulta ser de gran importancia, por lo que en los temas siguientes se desarrolla la información de la zona como del estado en general.

4.1.1. REGIONES HIDROLÓGICAS

Las cuencas son unidades del terreno, definidas por la división natural de las aguas debida a la conformación del relieve. Para propósitos de administración de las aguas nacionales, la CONAGUA ha definido 731 cuencas hidrológicas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH) (Figura 4.1).

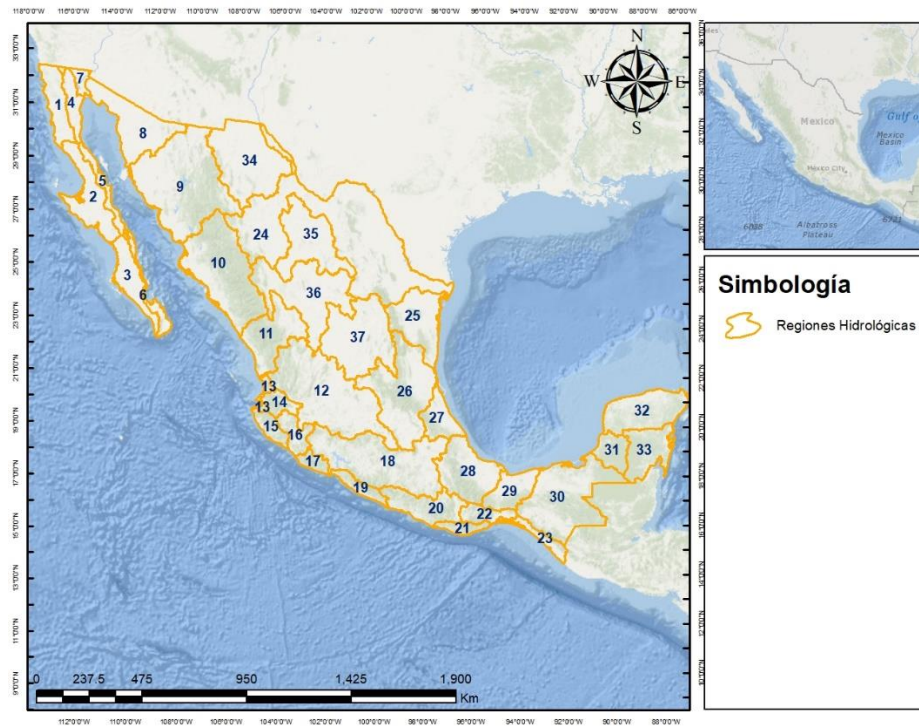


Figura 4.1. Regiones Hidrológicas.

4.1.2. ESTADO DE OAXACA

El estado de Oaxaca es uno de los 32 estados que integran la República Mexicana representando el 4.78% de la superficie total del país, cuenta con un total de 570 municipios siendo el estado con mayor número de municipios.

Entre los principales ríos destacan; el Atoyac-Verde, Santo Domingo, Tehuantepec, Colotepec, Grande, Mixeco, Los Perros, Joquila, Tenango, Ayutla, Sarabia, por mencionar algunos. También cuenta con lagunas como lo son; la laguna Superior, Inferior, la Oriental, la Pastoria, Chacahua, Corralero, Miniyua y Mar Muerto.

Oaxaca cuenta con las presas Miguel Alemán (Temascal), Miguel de la Madrid Hurtado (Cerro de Oro), Presa Benito Juárez y la Presa Yosocuta. (INEGI, 2017).

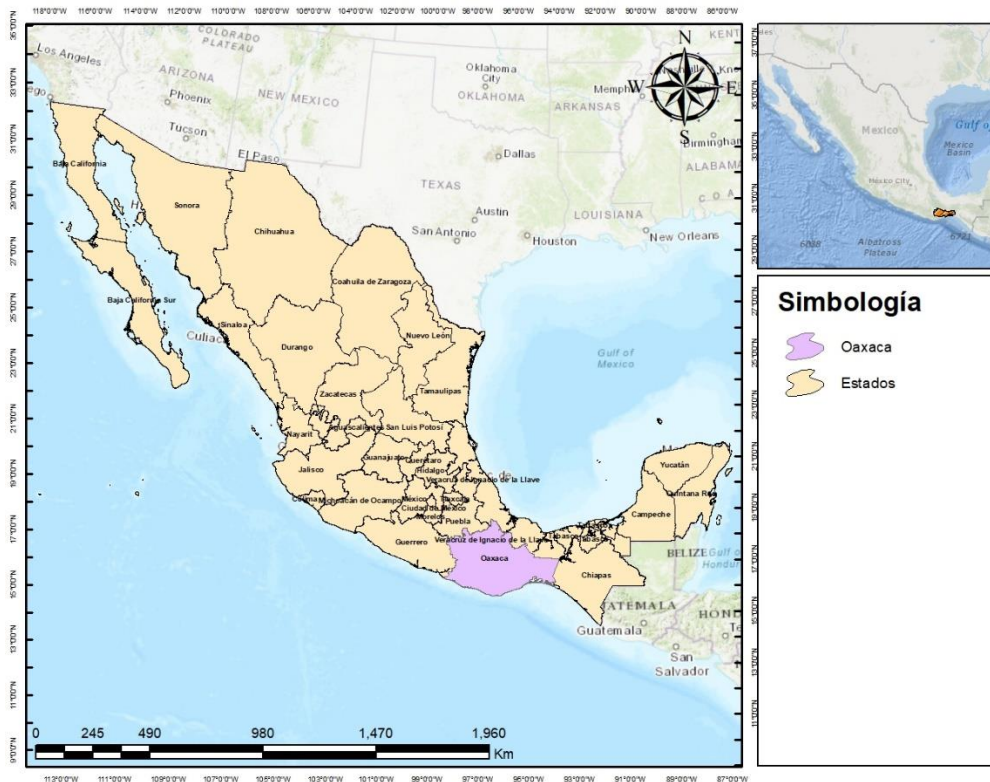


Figura 4.2. Ubicación del Estado de Oaxaca.

4.1.3. CLIMA

En el estado el 47% de la superficie presenta clima cálido subhúmedo localizado en la zona costera y hacia el este, el 22% presenta clima cálido húmedo principalmente en la región norte, el 16% presenta clima templado húmedo en las zonas altas orientales de los cerros Volcán Prieto y Humo Grande, el 11% presenta clima seco y semiseco en la región centro sur y noroeste, el 4% restante presenta clima templado subhúmedo hacia el sur y noroeste del estado en zonas con altitudes entre 2 000 y 3 000 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2017) (Figura 4.3).

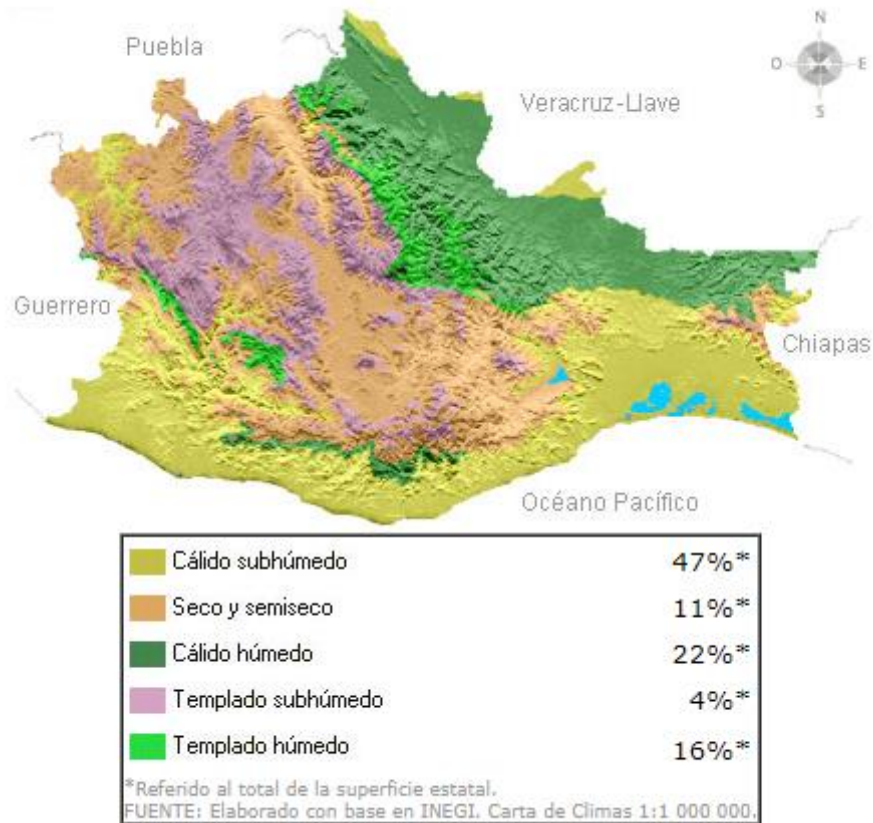


Figura 4.3. Clima en el estado de Oaxaca. Fuente INEGI.

4.1.4. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

La temperatura media anual del estado es de 22°C, la temperatura máxima promedio es de 31 °C se presenta en los meses de Abril y Mayo, la temperatura mínima promedio es de 12.5 °C que se presenta en el mes de Enero.

La precipitación media anual del estado es de 1550 mm, las lluvias se presentan en verano en los meses de Junio a Octubre.

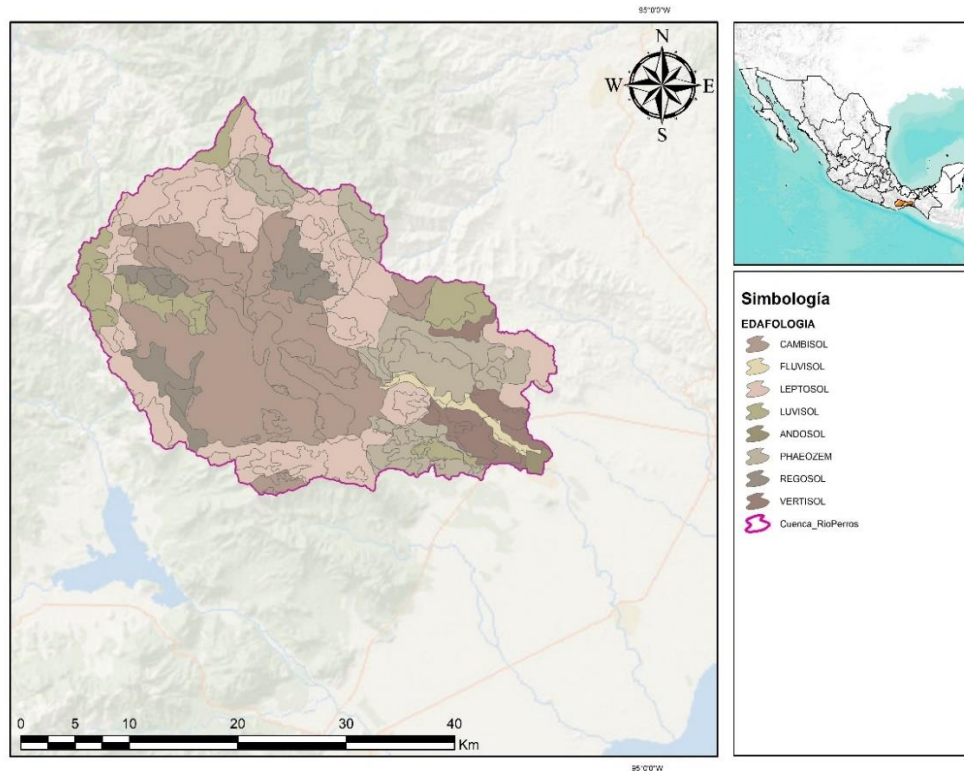


Figura 4.5. Edafología de la cuenca del río Los Perros.

4.2. REGIÓN HIDROLÓGICA NO. 22 “TEHUANTEPEC”

La región hidrológica 22 está comprendida íntegramente en el Estado de Oaxaca, queda limitada al Norte con las cuencas de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos, al Oriente con los orígenes del Grijalva, al Sur por el Golfo de Tehuantepec y al Oeste por la cuenca del río Verde o Atoyac.

En su parte Occidental se encuentra la porción mayor de la cuenca del río Tehuantepec que se ve obligado a correr de Oeste a Este en busca de una salida por la presencia de la Sierra Madre del Sur.

Dentro de la región existen tres importantes accidentes hidrográficos que son: la Laguna Superior, la Laguna Inferior y la Laguna Oriental, a través de las cuales, con excepción del río Tehuantepec, desaguan hacia el mar las corrientes de esta región.

La región hidrológica 22 cuenta con una extensión territorial de 17,825 km², abarcando las poblaciones de: Santo Domingo Tehuantepec, Salina Cruz, Yautepec, Ixtepec, Juchitan de Zaragoza, Unión Hidalgo, Santo Domingo Zanatepec, entre otras, (Figura 4.6).

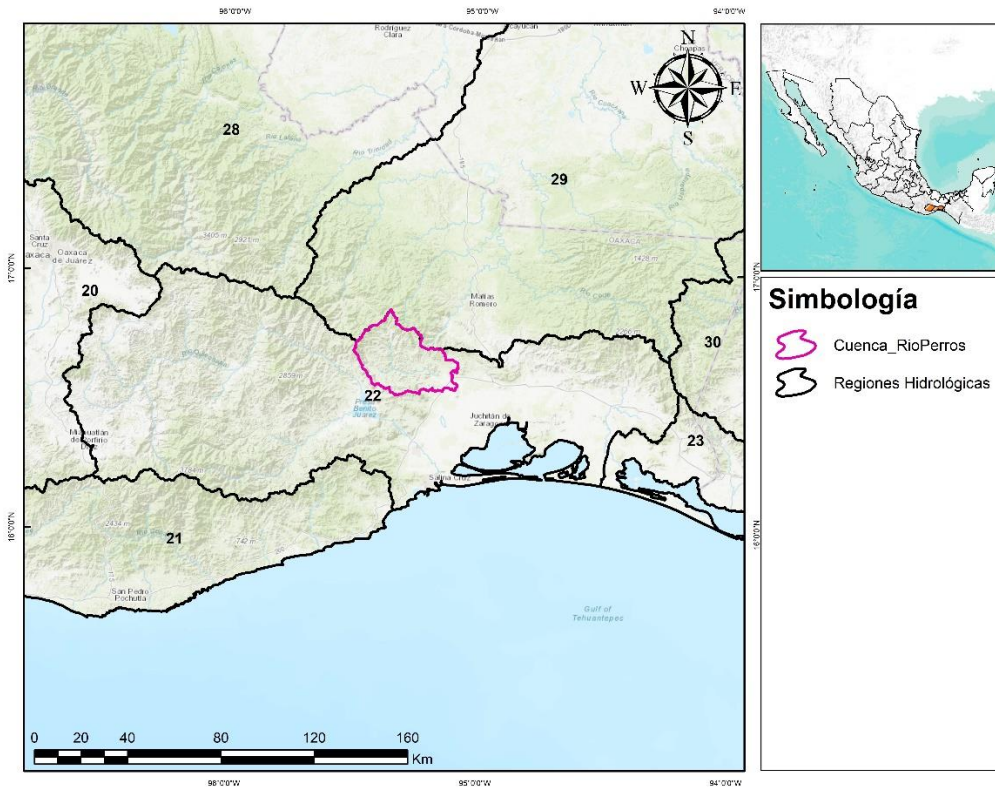


Figura 4.7. Cuenca del río Los Perros.

4.3. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE)

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas de relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En la actualidad el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) realiza la representación del relieve generando un modelo simplificado lo más cercano a la realidad, debido a que se cuenta con diferentes métodos y soluciones tecnológicas que permiten proporcionar un número infinito de puntos o de información geográfica para obtener y caracterizar las formas del terreno.

Los modelos digitales de elevación que produce INEGI son de dos tipos:

- **Modelo Digital de Superficie (MDS):** Representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie terrestre (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propio).
- **Modelo Digital de Terreno (MDT):** Recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

Ambos tipos de modelos digitales de elevación se realizan utilizando una variedad de fuentes de datos y mediante el uso de técnicas especializadas o métodos de obtención, así como el empleo de soluciones tecnológicas y cuya elección depende de la aplicación que se le va a dar al modelo resultante, además del objetivo que se pretende alcanzar y de la exactitud que se requiere del modelo.

Para el caso de la región hidrológica 22 se utiliza el modelo de elevación del Estado de Oaxaca para la delimitación de cuenca para el río Los Perros, este modelo se muestra en la Figura 4.8.

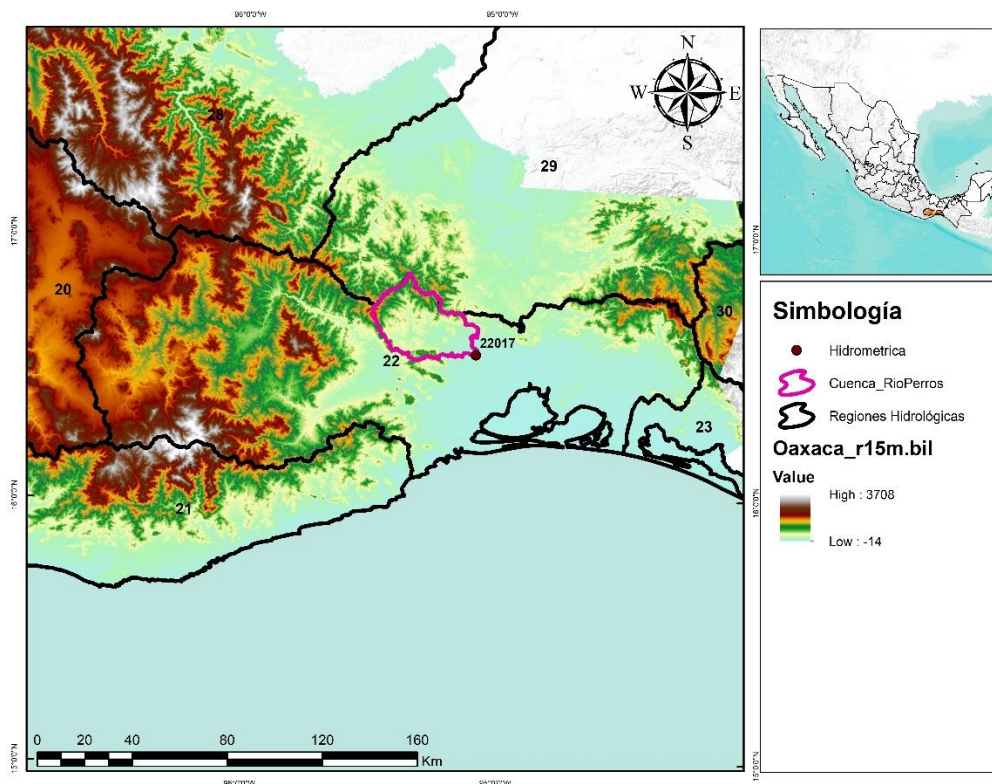


Figura 4.8. Modelo Digital de Terreno, RH22 y cuenca río Los Perros.

4.4. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Las estaciones climatológicas miden la temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento, entre otras. Estas variables climatológicas varían geográficamente y temporalmente, por lo que su medición resulta relevante para la planeación de los recursos hídricos y los estudios hidrológicos.

En la región del *río Los Perros* se localizan 8 estaciones climatológicas principales (Tabla 4.1), siendo las que a continuación se mencionan.

Tabla 4.1. Estaciones climatológicas.

Estado	Oaxaca	
Estación	Nombre	Situación
20027	Chicapa, Juchitan de Z.	Operando
20039	Ixtepec, Ciudad Ixtepec	Operando
20048	Juchitan de Zaragoza	Operando
20052	Km. 33+000, A. Ixtaltepec	Suspendida
20149	Sto. Domingo Tehuantepec	Operando
20213	Base Aérea Militar No. 2	Sin registro
20289	Guevea de Humboldt, (DGE)	Operando
20330	Guichixu, Sgo. Laollaga	Operando

A continuación se muestran las estaciones climatológicas (Figura 4.9) más cercanas a la cuenca:

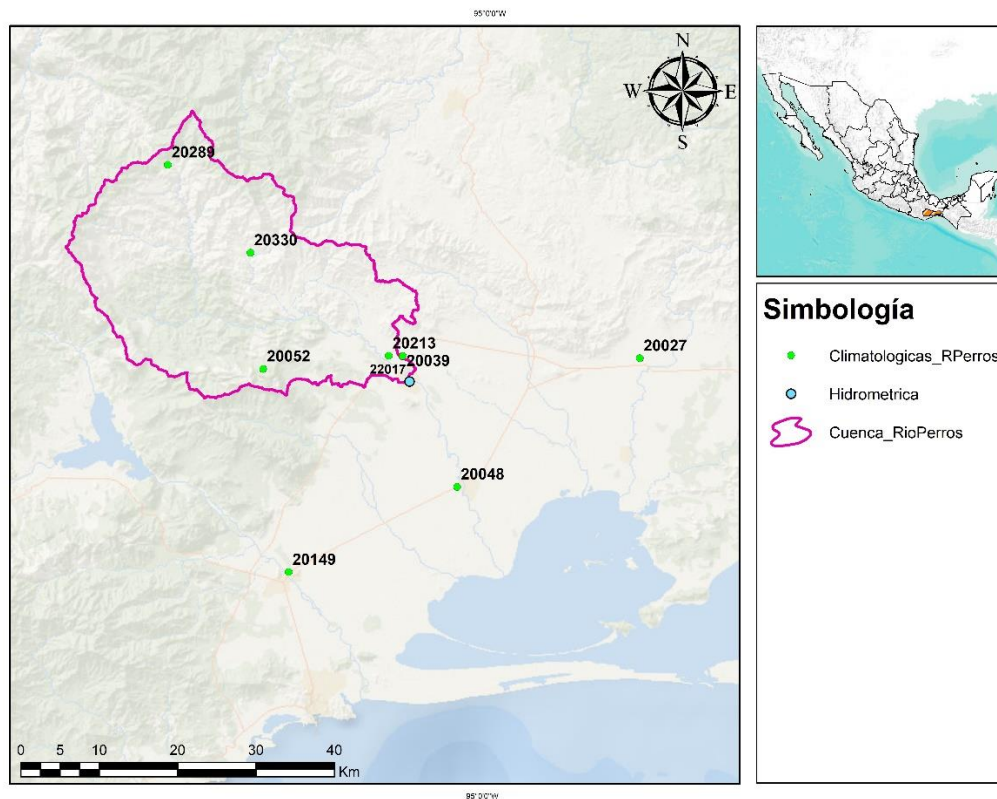


Figura 4.9. Estaciones climatológicas, cuenca del río Los Perros.

Las estaciones son la 20027, 20039, 20048, 20052, 20149, 20213, 20289 y 20330 donde la estación 20213 no se tiene registro en la base del CLICOM.

4.5. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal es generado originalmente por la precipitación pluvial, así como por la entrada de agua subterránea a los canales superficiales.

El conocimiento de la cantidad y la calidad del agua es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable municipal e industrial, el control de avenidas, el diseño y operación de presas, la generación de energía hidroeléctrica, la irrigación, las actividades recreativas relacionadas con el agua, la navegación fluvial, entre otras.

En el caso de las hidrométricas la subcuenca de Los Perros solo cuenta con una estación, esta es la 22017 (Tabla 4.2) y (Figura 4.10).

Tabla 4.2. Estación hidrométrica, Cuenca río Los Perros, Oaxaca.

Estado	Oaxaca	
Estación	Nombre	Situación
22017	Ixtepec	Operando

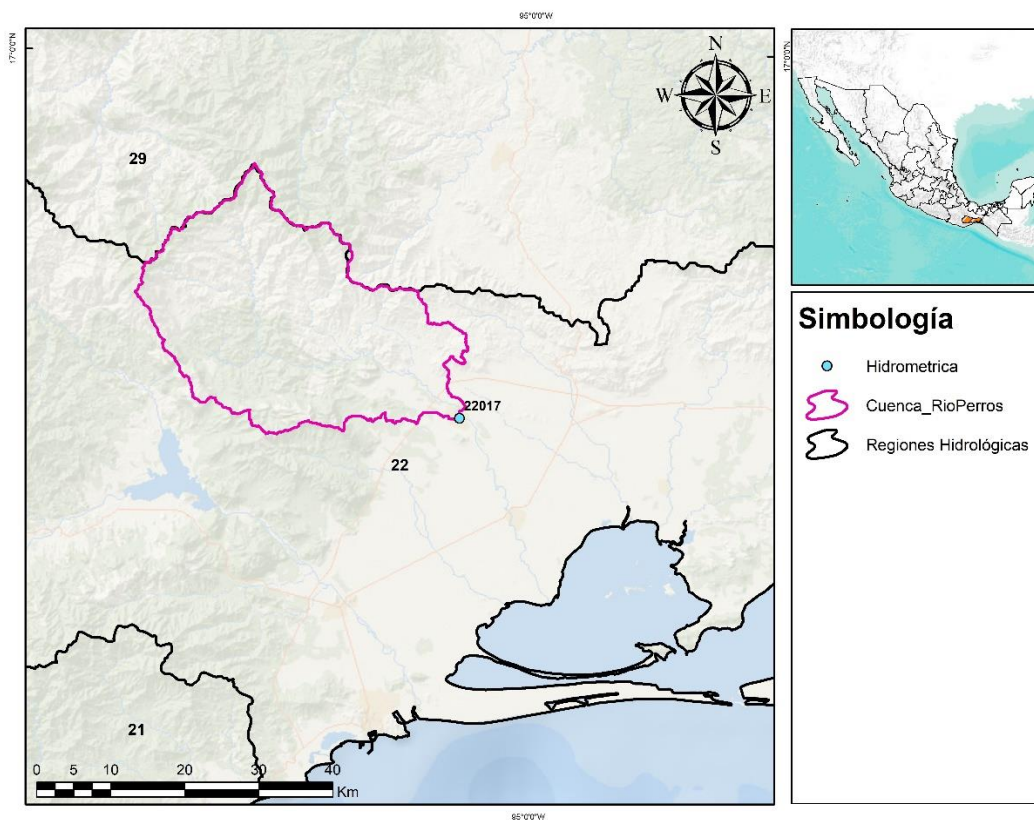


Figura 4.10. Estación hidrométrica. Cuenca del río Los Perros, Oaxaca.

4.6. REGISTROS CLIMATOLGICOS E HIDROMETRICOS

Para las estaciones climatológicas que registran precipitación a 24 horas, se cuenta para cada estación con los siguientes registros de las precipitaciones máximas anuales (Tabla 4.3):

Tabla 4.3. Registros de las estaciones climatológicas.

Año	20027	20039	20048	20052	20149	20289	20330
1937			114.7				
1938			40.5				
1939			55				
1940			27				
1941			74.1		135.5		
1942			97.6				
1943			97.5		135.3		
1944			83		210.3		
1945			96.2		322.2		
1946			154		161.2		
1947			165		198		
1948		44.1	90		64.3		
1949	35.5	161.2	90		63.7		
1950	145.7	300.3	315		127		
1951	105	139.7	150		283.5		
1952	166.5	184	67		194.5		
1953	119	97	80.1		70.2		
1954	116.6	91	76		210.8		
1955	179	183	151.6		162.7		
1956	71	73	80		113.5		
1957	91	105	49		106		
1958	112	75.6	74		115.5		
1959	129	102.6	138		141.8		
1960	184.5	155.8	190		144		
1961	112.5	131.2	90		160.7		
1962	67.5	97.7	135.5		76		
1963	133	86.2	104.2		94		
1964	60.5	53.2	60.7		46.5		
1965	50	58	83	50.7	120		
1966	76	145.5	97	160	58.5		
1967	60	104	80.5	165	80.5		
1968	52.5	60	74.5	65	131		
1969	100.9	158	140.6	208.5	326		
1970	130	116	162	149	303		
1971	82.5	83.5	107	95	104		
1972	69	63.5	55.8	60	62.5		
1973	153.3	188.8	208	207.5	200		
1974	147	240	224.4	252	124		
1975	75	139	112.5	105	186		
1976	85.5	81	108.5	100	110		
1977	56	73.5	101.5	85	170		
1978	81.5	113	122.5	119	103	260	
1979	72	172.5	173.3	260	103	84.5	
1980	154	80	170	195	101	75	51
1981	120	163.8	177.5	198.5	302	114	10

Año	20027	20039	20048	20052	20149	20289	20330
1982	120	39	45	50	83.5	50	20
1983	65	49.6	83.5		93	51	60
1984	111	81.3	160.5		126	87	70
1985	88	74.4	90.6		122	70	40
1986	92	71	60.5		104	70	40
1987	60	60.7	55.6		56	129	45
1988	135	83.6	177.7		82.5	68	
1989	83.5	100.2	137.7		95	45	
1990	72.5	68.4	79.5		59	62	
1991	102.5	62	98.8		197	100	
1992	60	84.3	68.8		110	57	
1993	99	97.2	160		165	127	
1994	59	58.6	110.1		0	28	
1995	157	69.8	170.6		89.5	80.2	
1996	160	120.1	114.5		100.7	145	
1997	145	169.4	231.8		253.5	111	
1998	85	97.1	143		200.9	120	
1999	217	222	251.3		379	140	
2000	112	77.2	95.2		65	69.5	
2001	113	84.6	128.2		120.5		
2002	130.5	73.6	107.8		204.5	131.5	
2003	102	105.5	122.5		89.2	190	56.6
2004	60	71.6	81.4		65.5	269.5	75.5
2005	80	69.2	164.2		101.5	152	64.8
2006	75	106.5	60		40	237	91.5
2007	136	159.8	96		46	143	54.8
2008	150	282	146.6		2.5	105	62
2009	105	61.4	79.2		63	93	77.6
2010	191.5	199.5	212.8		87.5	251.8	122.1
2011	183.5	117.5	115.6		183.5	86.3	168.5
2012					131.5	35	
2013	117	80.6	197.9		6	180	95.5
2014	60.5	75	140.1		72	48	70.7
2015	15.5	4.9	11.7				

Para la estación hidrométrica (22017) se cuenta con el siguiente registro (Tabla 4.4):

Tabla 4.4. Registro de la estación hidrométrica 22017.

Año	Q [m3/s]	Año	Q [m3/s]
1948	35.86	1982	
1949	7.32	1983	
1950	348.936	1984	
1951	57	1985	
1952	417.995	1986	111.61
1953	7.846	1987	79.813
1954	96.31	1988	121.024
1955	481	1989	101.491
1956	150.998	1990	9.045
1957	40.01	1991	249.514
1958	17.899	1992	35.412
1959	142.997	1993	
1960	268	1994	
1961	218.84	1995	285.154
1962	91.425	1996	230.487
1963	114.92	1997	723.167
1964	154	1998	250.395
1965	15.7	1999	
1966	38.15	2000	33.002
1967	142.5	2001	140.467
1968	121.728	2002	490.865
1969	927	2003	140.071
1970	435	2004	17.72
1971	122.2	2005	145.674
1972	11.2	2006	24.883
1973	421	2007	131.639
1974	653.04	2008	
1975	360	2009	85.25
1976	62.26	2010	
1977	9.335	2011	
1978	1625	2012	804.488
1979	402	2013	
1980	59.5	2014	80.654
1981			

Se observa registro continuo del año 1948 a 1980, en donde los años de registro son hasta el 2014 solo sin tener los años de 1981 a 1985, 1993, 1994, 1999, 2008, 2010, 2011, 2013 y 2015.

Los registros de las climatológicas con la hidrométrica son los siguientes (Tabla 4.5):

Tabla 4.5. Registros de climatológicas e hidrométrica.

Año	20027	20039	20048	20052	20149	20289	20330	22017	Año	20027	20039	20048	20052	20149	20289	20330	22017
1948		44.1	90		64.3			35.86	1982	120	39	45	50	83.5	50	20	
1949	35.5	161.2	90		63.7			7.32	1983	65	49.6	83.5		93	51	60	
1950	145.7	300.3	315		127			348.936	1984	111	81.3	160.5		126	87	70	
1951	105	139.7	150		283.5			57	1985	88	74.4	90.6		122	70	40	
1952	166.5	184	67		194.5			417.995	1986	92	71	60.5		104	70	40	111.61
1953	119	97	80.1		70.2			7.846	1987	60	60.7	55.6		56	129	45	79.813
1954	116.6	91	76		210.8			96.31	1988	135	83.6	177.7		82.5	68		121.024
1955	179	183	151.6		162.7			481	1989	83.5	100.2	137.7		95	45		101.491
1956	71	73	80		113.5			150.998	1990	72.5	68.4	79.5		59	62		9.045
1957	91	105	49		106			40.01	1991	102.5	62	98.8		197	100		249.514
1958	112	75.6	74		115.5			17.899	1992	60	84.3	68.8		110	57		35.412
1959	129	102.6	138		141.8			142.997	1993	99	97.2	160		165	127		
1960	184.5	155.8	190		144			268	1994	59	58.6	110.1		0	28		
1961	112.5	131.2	90		160.7			218.84	1995	157	69.8	170.6		89.5	80.2		285.154
1962	67.5	97.7	135.5		76			91.425	1996	160	120.1	114.5		100.7	145		230.487
1963	133	86.2	104.2		94			114.92	1997	145	169.4	231.8		253.5	111		723.167
1964	60.5	53.2	60.7		46.5			154	1998	85	97.1	143		200.9	120		250.395
1965	50	58	83	50.7	120			15.7	1999	217	222	251.3		379	140		
1966	76	145.5	97	160	58.5			38.15	2000	112	77.2	95.2		65	69.5		33.002
1967	60	104	80.5	165	80.5			142.5	2001	113	84.6	128.2		120.5			140.467
1968	52.5	60	74.5	65	131			121.728	2002	130.5	73.6	107.8		204.5	131.5		490.865
1969	100.9	158	140.6	208.5	326			927	2003	102	105.5	122.5		89.2	190	56.6	140.071
1970	130	116	162	149	303			435	2004	60	71.6	81.4		65.5	269.5	75.5	17.72
1971	82.5	83.5	107	95	104			122.2	2005	80	69.2	164.2		101.5	152	64.8	145.674
1972	69	63.5	55.8	60	62.5			11.2	2006	75	106.5	60		40	237	91.5	24.883
1973	153.3	188.8	208	207.5	200			421	2007	136	159.8	96		46	143	54.8	131.639
1974	147	240	224.4	252	124			653.04	2008	150	282	146.6		2.5	105	62	
1975	75	139	112.5	105	186			360	2009	105	61.4	79.2		63	93	77.6	85.25
1976	85.5	81	108.5	100	110			62.26	2010	191.5	199.5	212.8		87.5	251.8	122.1	
1977	56	73.5	101.5	85	170			9.335	2011	183.5	117.5	115.6		183.5	86.3	168.5	
1978	81.5	113	122.5	119	103	260		1625	2012					131.5	35		804.488
1979	72	172.5	173.3	260	103	84.5		402	2013	117	80.6	197.9		6	180	95.5	
1980	154	80	170	195	101	75	51	59.5	2014	60.5	75	140.1		72	48	70.7	80.654
1981	120	163.8	177.5	198.5	302	114	10		2015	15.5	4.9	11.7					

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN

Posterior a recabar la información es necesario seleccionar un evento extremo representativo en la zona de estudio que se calibrará con ayuda del modelo MPE para obtener lluvias estadísticas y posteriormente avenidas de diseño.

Para iniciar con el análisis primero se obtuvieron las características fisiográficas de la cuenca, que cuenta con un área de **931.34 km²** y un tiempo de concentración de **2.64 hrs.** Este tiempo de concentración se obtuvo al aplicar la fórmula de Kirpich.

Se obtuvo el modelo digital de elevación MDE de la página del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>) de la zona en estudio, en nuestro caso de la zona del estado de Oaxaca. También es necesario contar con la información de edafología, así como el uso de suelo y de los números de curva conforme a la permeabilidad de la cuenca.

5.1. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

5.1.1. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Tradicionalmente, la determinación de diversos parámetros geomorfológicos se hacía manualmente a partir de cartas topográficas impresas; actualmente, esa determinación se está realizando con sistemas informáticos en donde las operaciones que antes se hacían con planímetro y curvímetro ahora se hacen con funciones de los SIG, que miden áreas o longitudes, haciendo que el proyectista utilice ahora herramientas informáticas en lugar de herramientas físicas pero dejando el proceso en un estatus prácticamente manual. Para hacer más rápido el proceso y menos dependiente del criterio del usuario, es necesario utilizar una forma semiautomatizada para realizar el mismo proceso.

5.1.2. PROCESO ARCVIEW 3.2

En la obtención de los parámetros hidrológicos se ocupó el programa *Arcview* en su versión 3.2, este proceso nos ayudará a obtener el archivo de transferencia de escurrimiento, este archivo se basa en el **Método de Clark Modificado**, el cual requiere de 2 parámetros, el tiempo de concentración, y el coeficiente de almacenamiento (k), así como también del histograma. Este método traslada el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca.

Para comenzar con la obtención del archivo de transferencia de escurrimiento es importante mencionar que todos los procesos posteriores se generan a partir del MDE obtenido de INEGI y convertido en archivo GRID que contenga las elevaciones del terreno que utiliza el Arcview 3.2.

CORRECCIÓN DE CELDAS

Este proceso es el primer paso en la etapa del pre-procesamiento del terreno, en este paso se crea un MDE sin depresiones, es decir, son rellenadas las zonas donde existan depresiones, aumentando la cota de las celdas que están rodeadas por una cota más alta y asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas más cercanas. De esta forma se garantiza que el flujo de agua podrá transitar entre celdas sin presentar estancamientos, Figura 5.1.

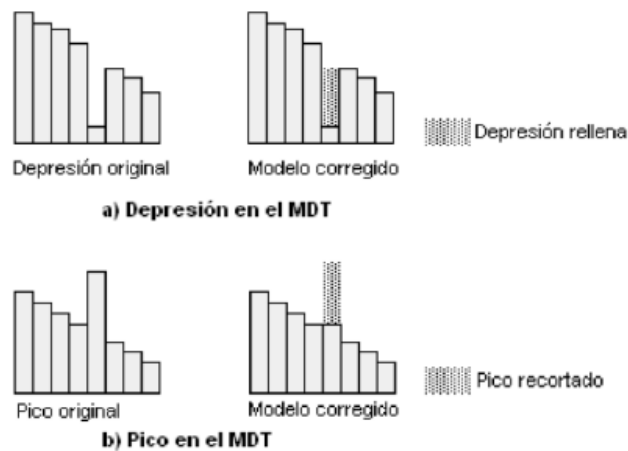


Figura 5.1. Corrección de celdas a través del *Fill Sinks*.

En el relleno de las depresiones usando el *Fill Sinks*, se procede a seguir la ruta de la barra de **ArchHydro Tools: Terrain Processing – Fill Sinks**.

Se agrega el MDE con depresiones (original) y la salida se selecciona "*Fillgrid*". El resultado de este proceso se observa en la Figura 5.2.

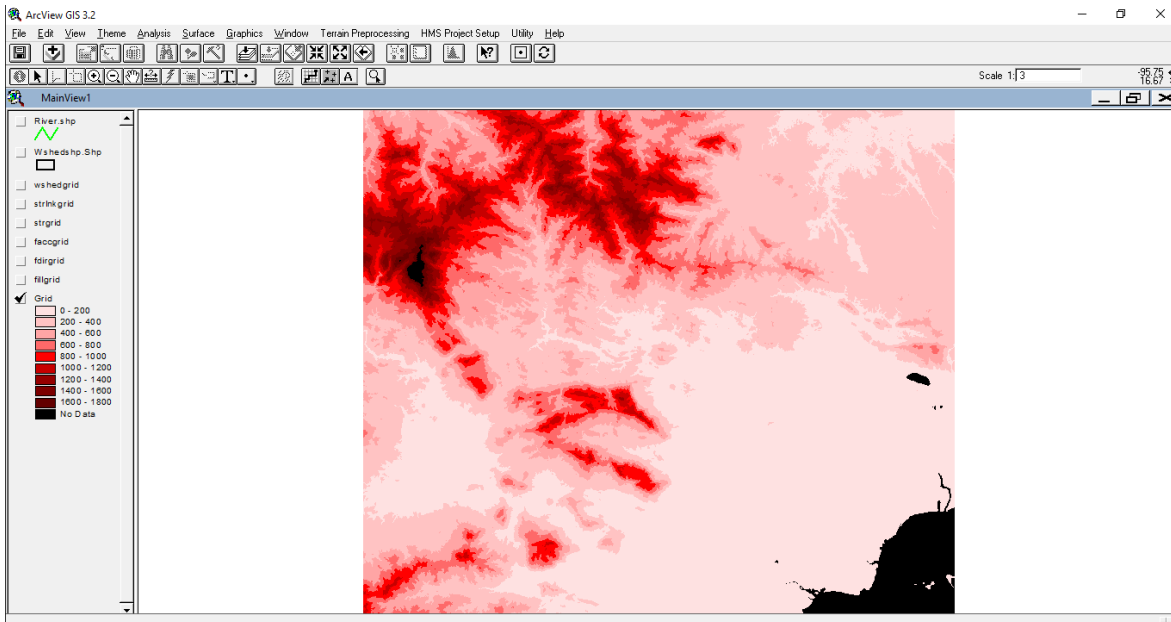


Figura 5.2. Resultado de aplicación del *Fill Sinks* (Corrección de celdas).

DIRECCIÓN DEL FLUJO

En este paso se define la dirección del flujo por elevaciones provenientes del MDE. Es necesario tener el archivo corregido (sin depresiones) en formato GRID, este proceso arroja como archivo de salida un ráster que muestra la dirección del flujo. Se cuenta con un total de ocho posibles direcciones para una celda y que el escurrimiento proveniente de la parte más alta de la cuenca pueda tomar hacia la parte inferior, Figura 5.3.

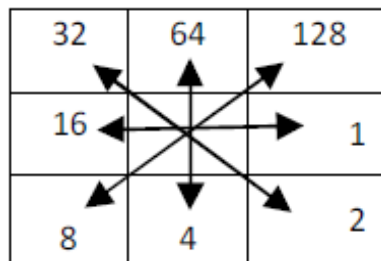


Figura 5.3. Direcciones del flujo en celdas.

Para realizar el proceso de dirección de flujo en Arcview se sigue la ruta: **Terrain Processing – Flow Direction**.

El archivo de ingreso es el *Fill Sinks* que se obtuvo en el paso anterior, y el archivo de salida será “*Fdirgrid*”, Figura 5.4.

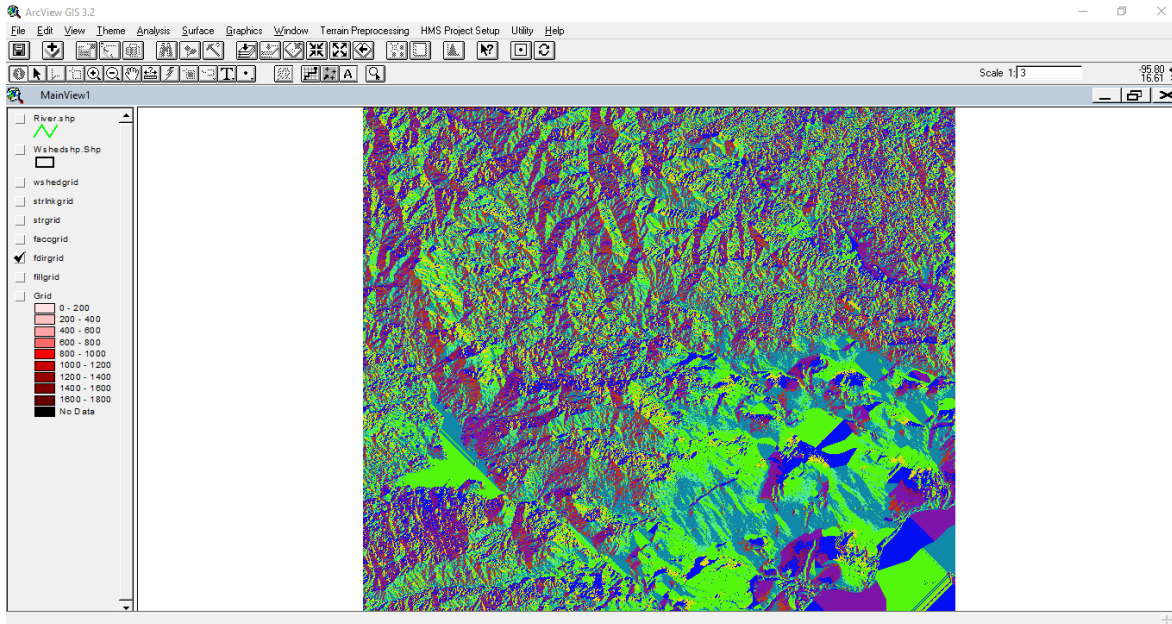


Figura 5.4. Archivo de salida, *Flow Direction*.

ACUMULACIÓN DEL FLUJO

La acumulación de flujo determina el número de celdas que drenan a cada celda. El área de drenaje de una celda dada se calcula multiplicando el número de celdas por el área de cada una de las celdas. La corriente principal se compone por la ruta que contiene el mayor número de celdas que contribuyen a ella, es decir, esta opción calcula el flujo acumulado como el total acumulado de las celdas que contribuyen hacia las celdas encontradas aguas abajo, Figura 5.5.

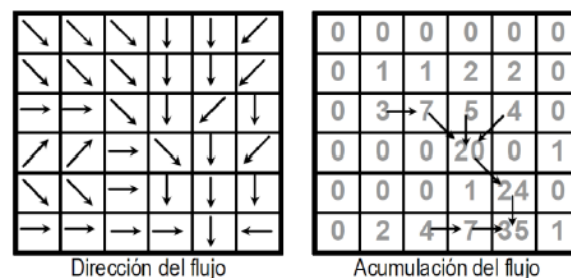


Figura 5.5. Acumulación del Flujo en contraste con la Dirección del Flujo.

La ruta para realizar la dirección de flujo es la siguiente: **Terrain Processing – Flow Direction**.

El archivo de entrada es el “*Fdirgrid*” y generará un archivo de salida denominado “*Faccgrid*”, el archivo no se observa muy detallado ya que solo genera las direcciones de flujo, Figura 5.6.

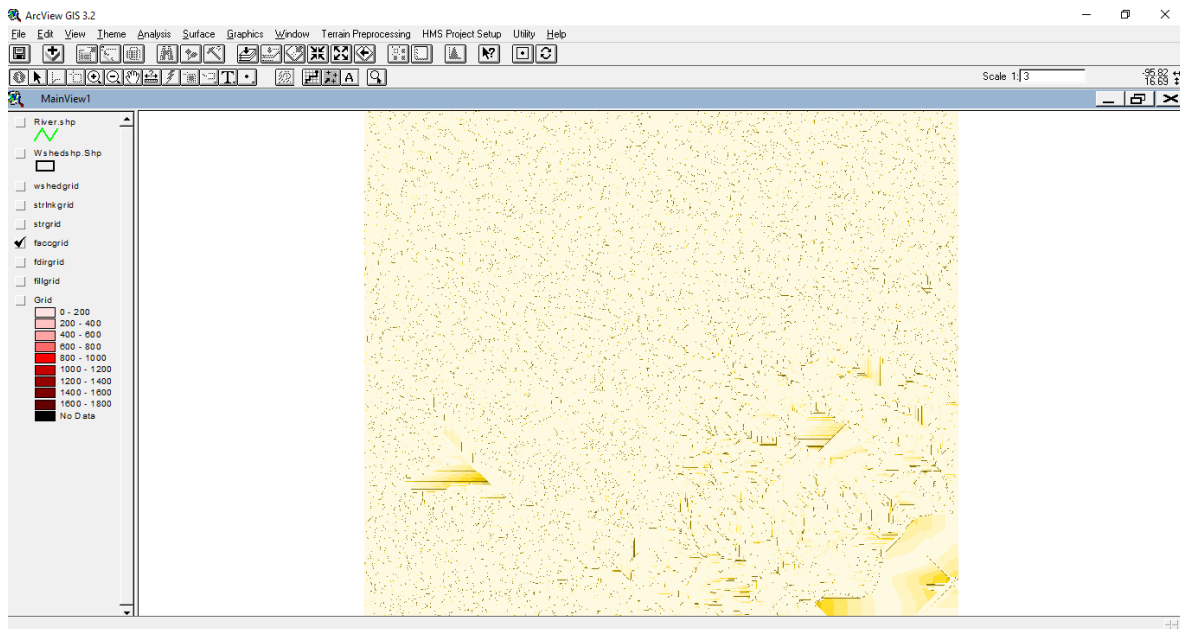


Figura 5.6. Archivo de salida, *Flow Accumulation*.

DEFINICIÓN DE FLUJO

La definición de flujo determina las corrientes de las celdas cuyo flujo acumulado o su equivalente en área exceden del umbral seleccionado, de este modo las celdas con menor aporte no se toman en cuenta. De lo contrario se obtendrían una infinidad de subcuencas con parteaguas casi rectos.

La ruta para el proceso es el siguiente: **Terrain Processing – Stream Definition**.

El archivo de entrada es “*Faccgrid*” y genera el archivo de salida nombrado “*Strgrid*”, de igual forma como en la dirección de flujo no se percibe muy detallado debido a que por umbrales se deja a fuera las celdas con menor aporte. Figura 5.7.

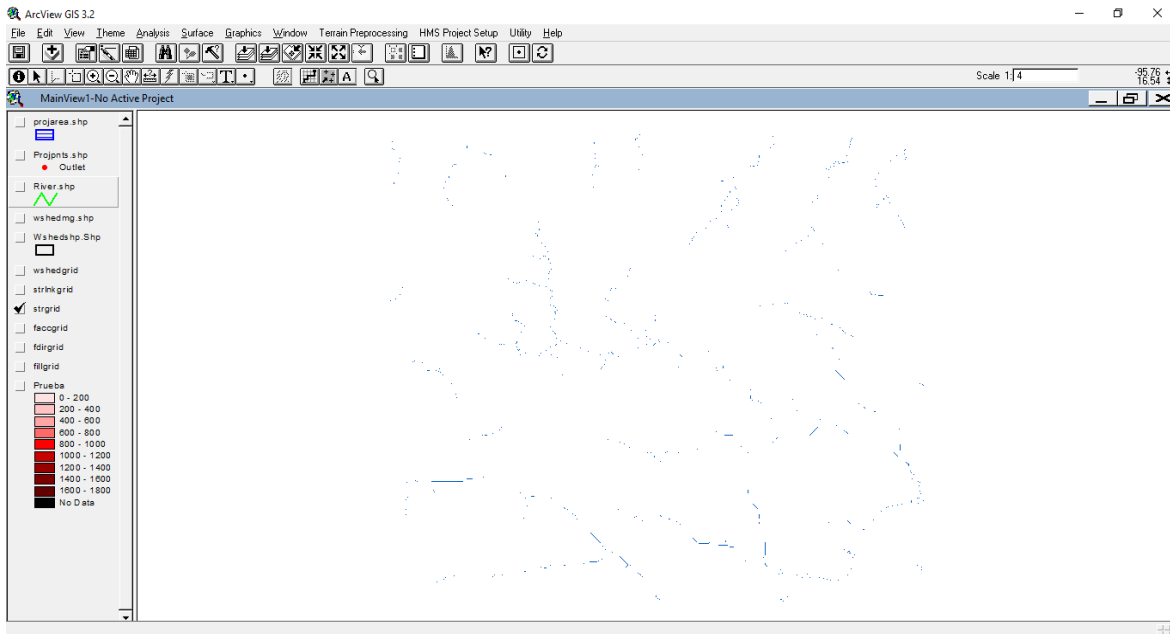


Figura 5.7. Archivo de salida, *Stream Definition*.

SEGMENTACIÓN DE CORRIENTES

Para obtener el parteaguas de las subcuencas deseadas, en esta sección se separa cada tramo de corriente o tributario, considerando como límite para la separación o división en segmentos de corrientes las confluencias aguas abajo. Por lo que cada subcuenca representa el área de captación de cada tributario y las confluencias encontradas aguas abajo simulan su salida. Esta opción separa cada una de las corrientes en segmentos individuales con el objetivo de estimar la cuenca para cada tributario o corriente.

Para aplicar el proceso se sigue la ruta: **Terrain Processing – Stream Segmentation**.

Los archivos de entrada son “*Fdirgrid*” y “*Strgrid*”, este proceso genera el archivo de salida con nombre “*StrLnkgrid*”, Figura 5.8.

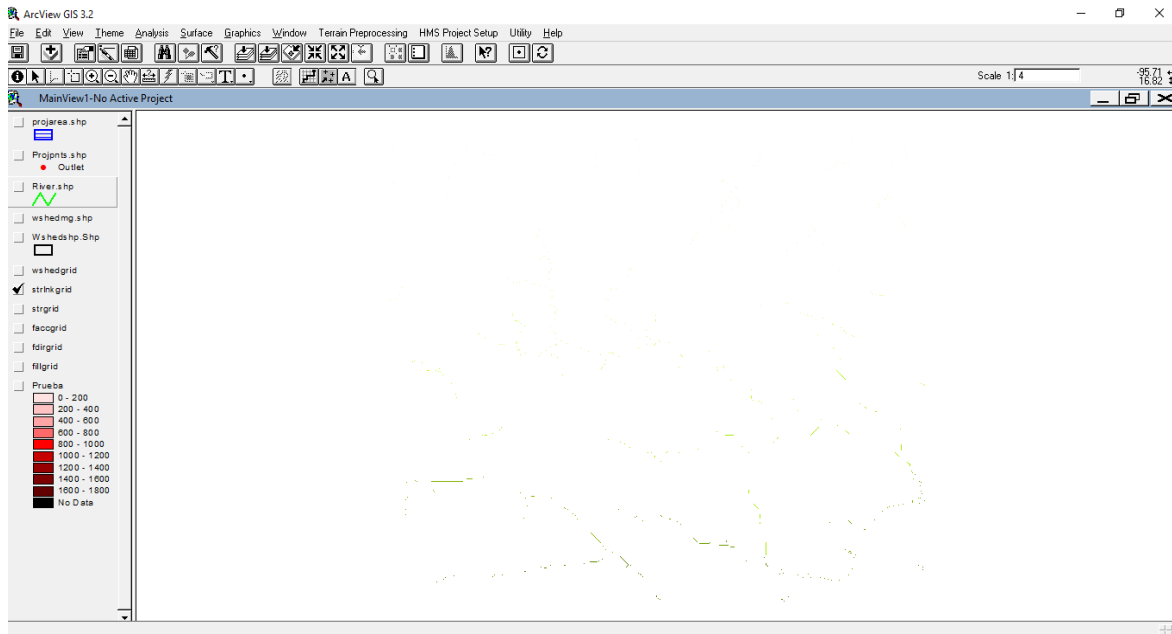


Figura 5.8. Archivo de salida, *Stream Segmentation*.

DELIMITACIÓN DE SUBCUENCA

El proceso de delimitación de subcuenca identifica las subcuencas que existen dentro del área de estudio para cada tributario o segmento de corriente.

Para el proceso se sigue la ruta: ***Terrain Processing – Watershed Grid Delineation***.

El archivo de entrada es “*Fdirgrid*” y “*StrLngrid*”, que genera un archivo de salida con nombre “*wshedgrid*”, Figura 5.9.

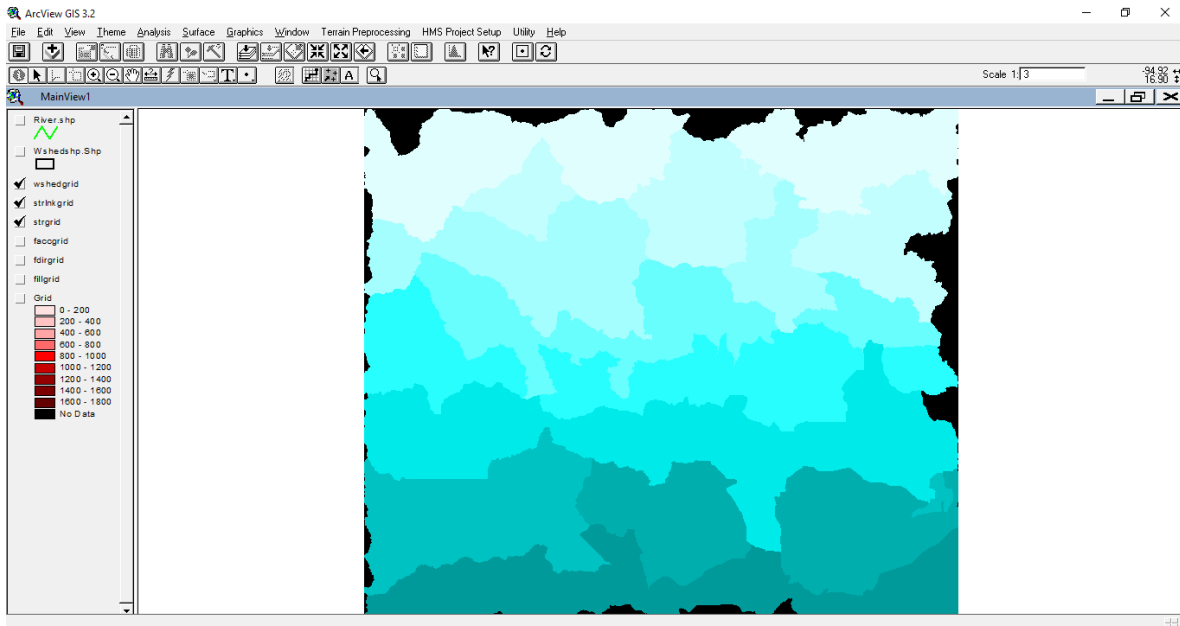


Figura 5.9. Archivo de salida, *Watershed Delineation*.

PROCESAMIENTO DE POLIGONOS DE LA SUBCUENCA

Este proceso convierte las subcuencas de formato ráster a formato vector con el fin de manejar datos a la hora de transferirlos al programa de modelación.

Para realizar el proceso se sigue la ruta: ***Terrain Processing – Watershed Polygon Processing***.

El archivo de entrada es “*wshedgrid*” que genera el archivo de salida con nombre “*wshedshp*”, Figura 5.10.

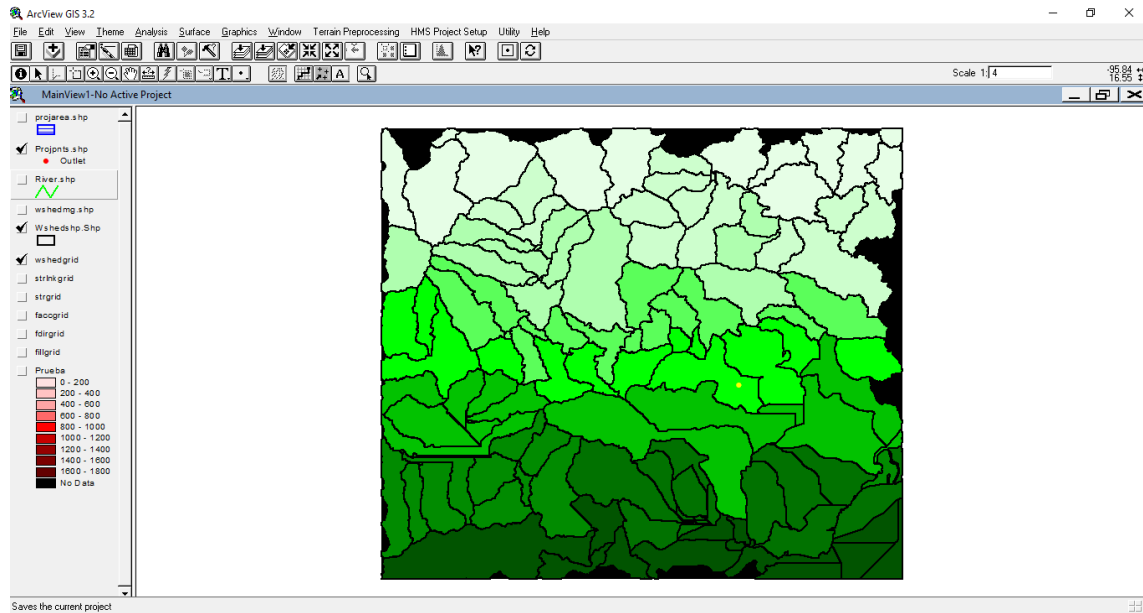


Figura 5.10. Archivo de salida, *Watershed Polygon Processing*.

PROCESAMIENTO DE SEGMENTOS DE FLUJO

En este paso se vectoriza la red de flujo. La ruta es la siguiente: ***Terrain Processing – Stream Segment Processing***.

El archivo de entrada es “*Fdirgrid*” y “*StrLngrid*” que generan el archivo de salida con nombre “*river*”, Figura 5.11. Por recomendaciones para la salida de la subcuenca se selecciona la opción “*The section is not an outlet*”.

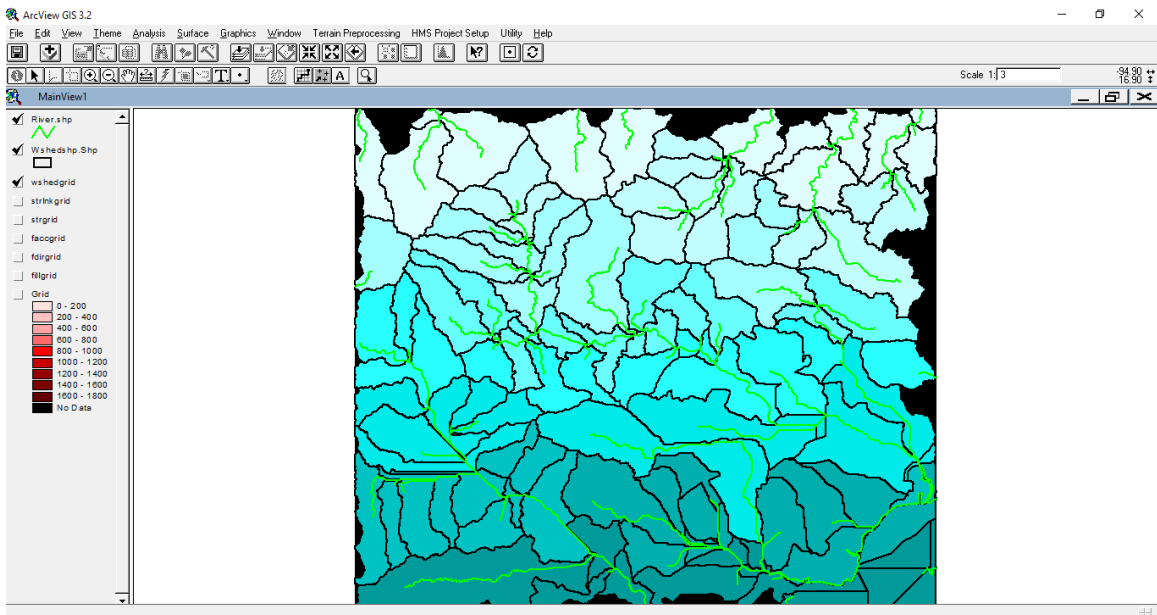


Figura 5.11. Archivo de salida, *Stream Segment Processing*.

ADICIÓN DE SUBCUENCAS

Este proceso reúne las subcuencas que vierten a cada confluencia de cauces. Se realiza para mejorar la delineación de las subcuencas y obtención de datos.

Para este proceso se sigue la ruta: ***Terrian Processing – Watershed Agregation***.

Los archivos de entrada son “*river*” y “*wshedshp*” que generan un archivo de salida con nombre “*wshedmg*”, Figura 5.12.

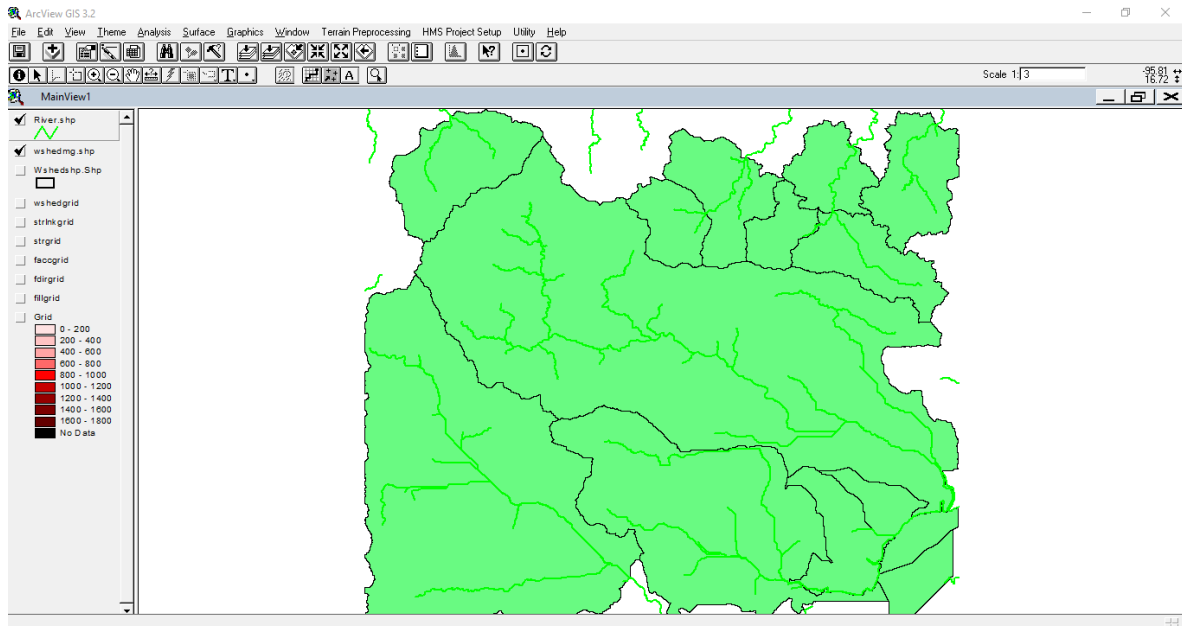


Figura 5.12. Archivo de salida, *Watershed Agregation*.

CREACIÓN DEL PROYECTO DE CUENCA EN HEC-GEOHMS

Al tener definidas las cuencas y las corrientes, es necesario obtener los parámetros a nivel de subcuencas, dividiendo la cuenca en malla de celdas cuadradas y obteniendo el parámetro hidrológico de cada una de las celdas que lo componga.

La extensión **HEC-GEOHMS** permite crear la cuenca a partir del punto de salida indicado. En la pestaña **HMS Project Setup** se inicia un nuevo proyecto. Se localiza previamente la ubicación de la hidrométrica y se coloca el punto de salida de la cuenca a generar, (Figura 5.13).

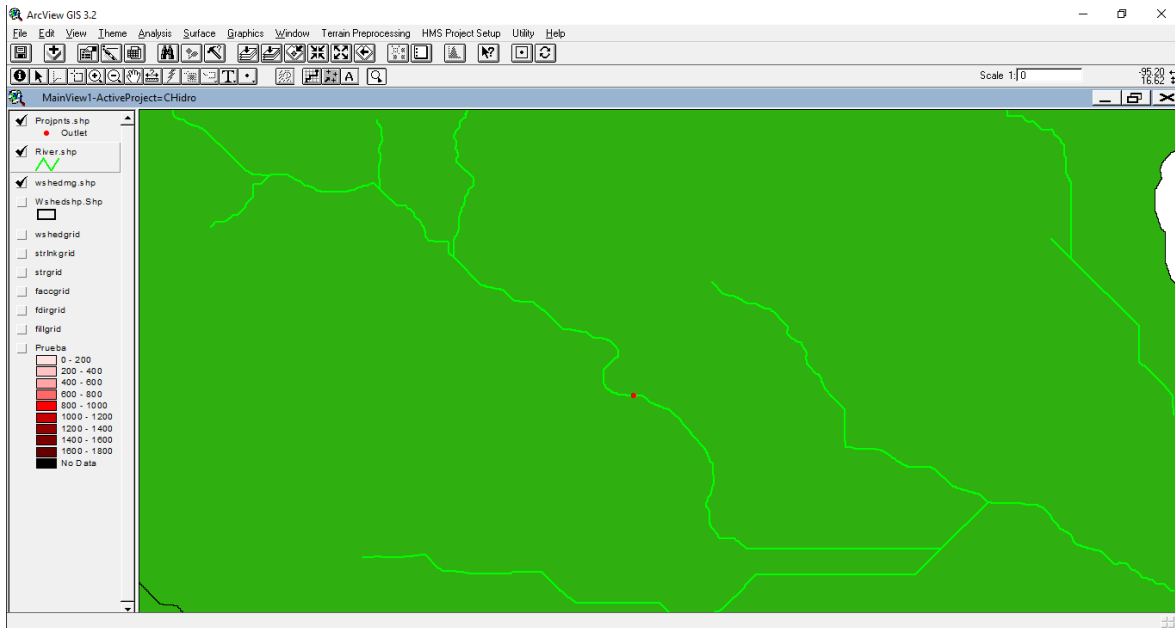


Figura 5.13. Creación del proyecto de cuenca.

GENERACIÓN DEL PROYECTO

Posteriormente en la misma pestaña **HMS Project Setup** se procede a generar el nuevo proyecto. En este paso se observan las corrientes y las subcuencas que integran la cuenca de la hidrométrica o punto de salida delimitados por el parteaguas como se observa en la Figura 6.14.

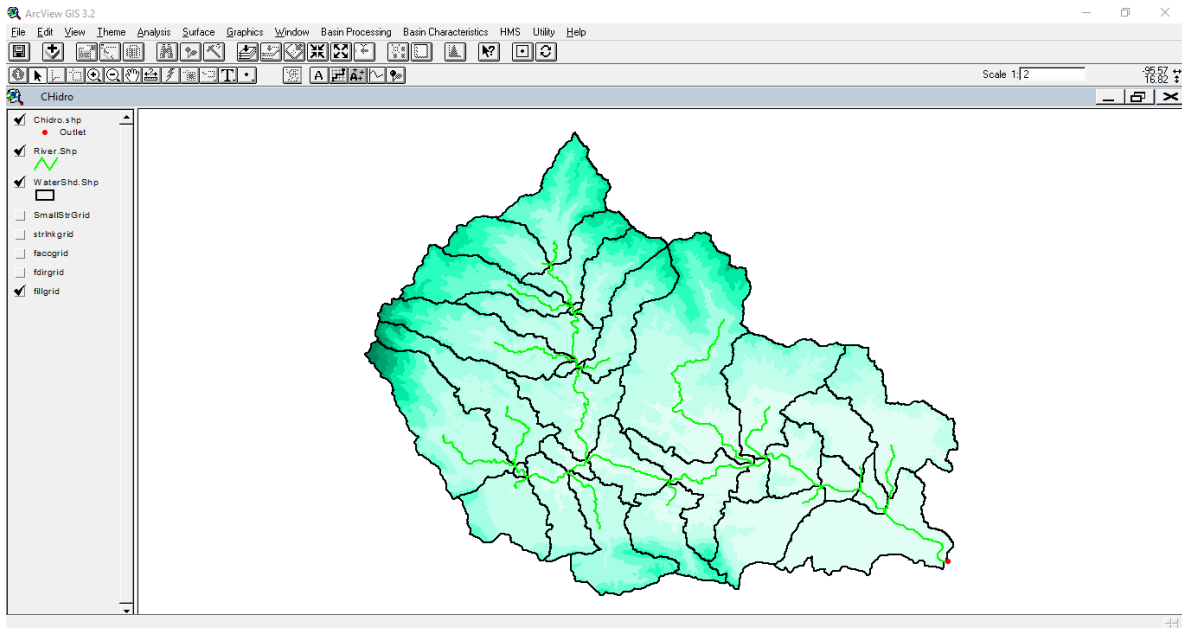


Figura 5.14. Proyecto de la cuenca del río Los Perros.

UNIÓN DE SUBCUENCAS

Del nuevo “*data frame*” creado del proyecto con **HEC-GeoHMS** se activa el tema *subbasin*, se seleccionan todas las subcuencas generadas. En ocasiones el número de subcuencas es muy grande, por lo que el proceso de selección y unión de cuencas se tiene que realizar en forma parcial a fin de unir las completamente. En este paso se tiene que observar un solo polígono, el cual se verifica en la tabla de atributos, Figura 5.15.

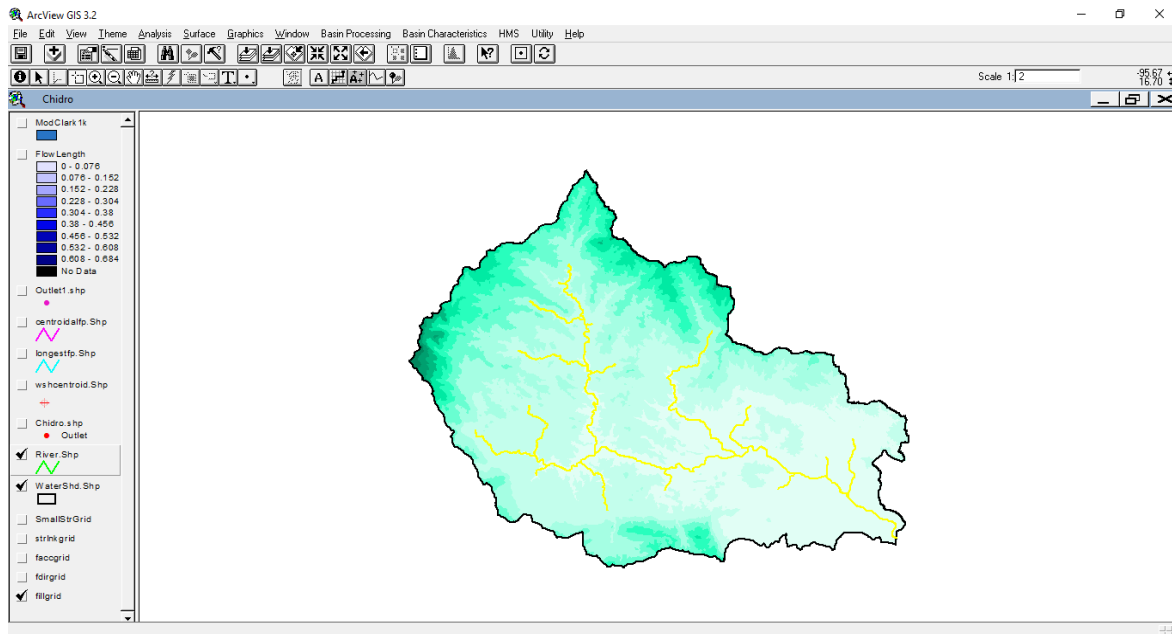


Figura 5.15. Unión de las subcuencas.

UNIÓN DE CORRIENTES

Para la unión de las corrientes se selecciona las corrientes generadas y del menú **Basin Processing** se selecciona *River Merge*. Al igual que en la unión de subcuencas, cuando existen muchos ríos el proceso de selección y unión se realiza en forma parcial hasta unir todas las corrientes completamente, Figura 5.16.

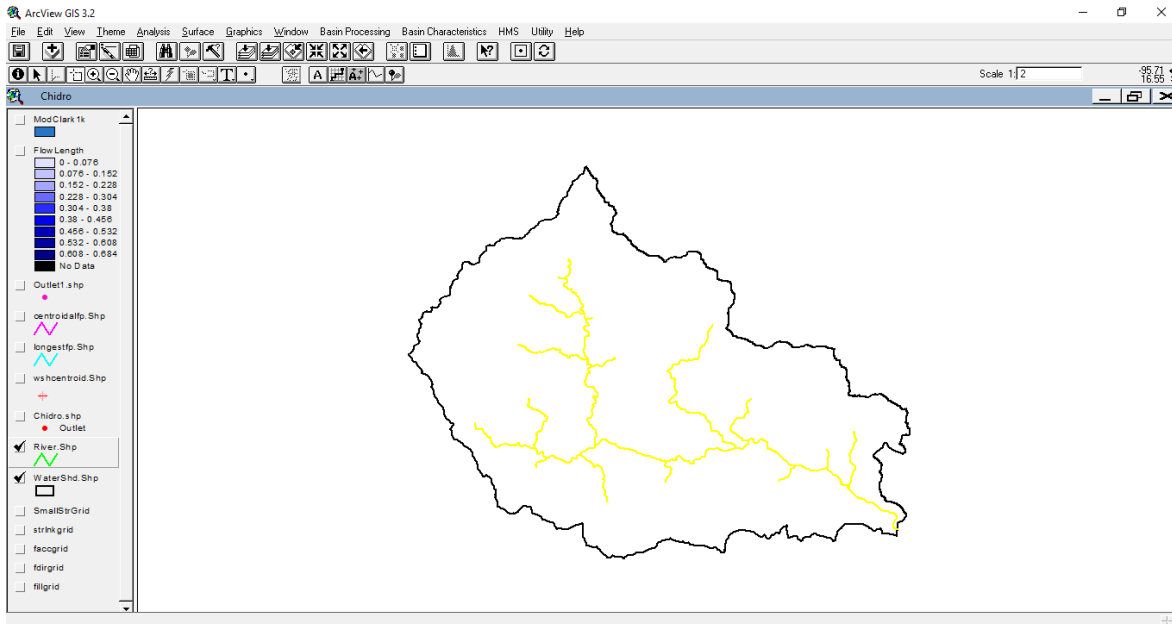


Figura 5.16. Unión de corrientes.

Posterior a la unión de subcuencas y corrientes se estima la longitud de cada tramo de corriente, pendiente del cauce principal y su centroide, ubicados en el menú **Basin Characteristics**, Figura 5.17.

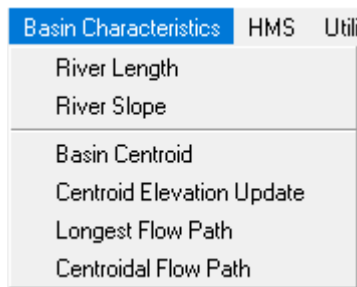


Figura 5.17. Menú *Basin Characteristics*.

Del menú, **Basin Centroid** se calcula el centro de gravedad de la cuenca. También se calculan **Longest Flow Path** y **Centroidal Flow Path**. Los resultados de ejecutar estos comandos se muestran en la Figura 5.18.

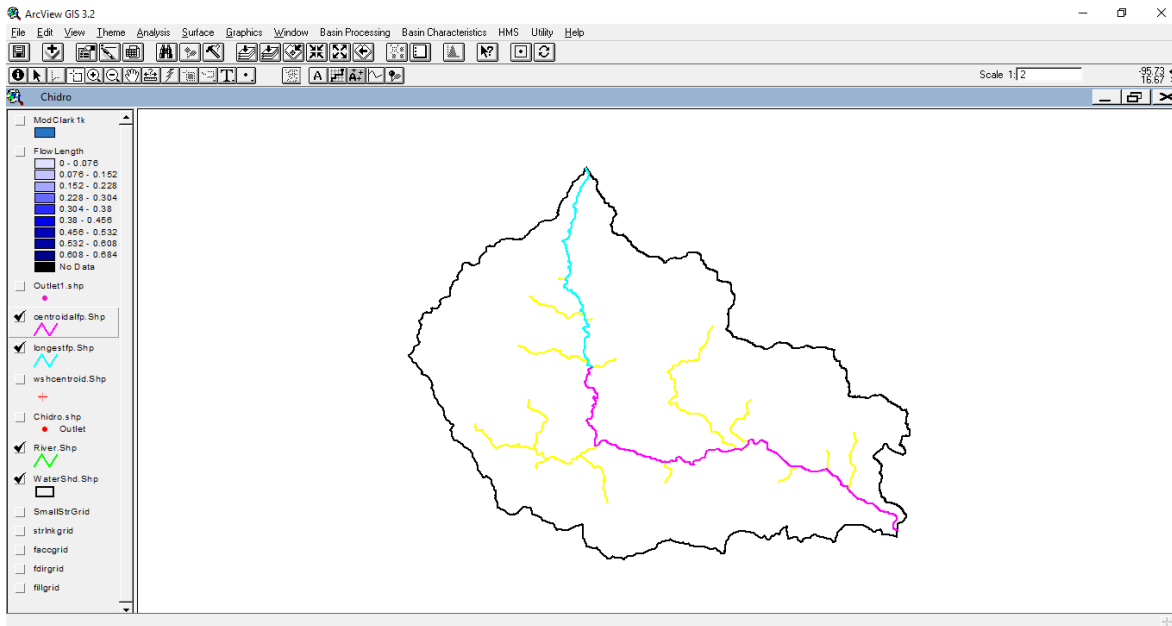


Figura 5.18. Elementos hidrológicos de la cuenca del río Los Perros.

5.1.3. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS

Para la modelación hidrológica, es necesario contar con el archivo que contenga los parámetros hidrológicos en forma de malla, para una modelación de forma distribuida.

Para realizar este proceso, conviene establecer el sistema de coordenadas como SHG. Se crea en block de notas un archivo con las coordenadas requeridas de la proyección **ALBERS**, nombrando a este archivo **pjr.adf**. Este archivo se pegará en las carpetas faccgr1, fdirgr1, fillgr1 y strlnk1, que están dentro de la carpeta del proyecto creado con base en el HEC-GeoHMS, Figura 5.19.

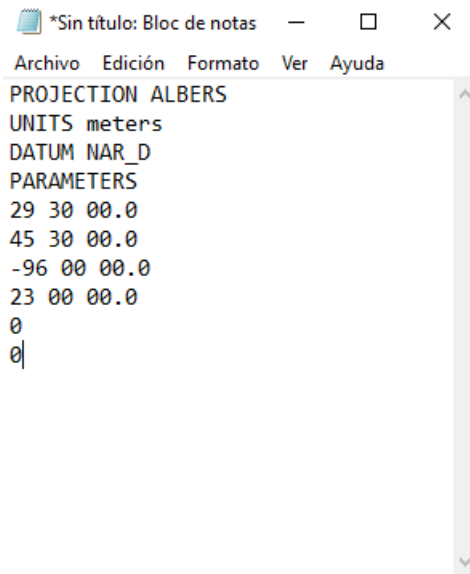


Figura 5.19. Archivo de Proyección de Albers.

Posterior a ingresar el archivo en cada carpeta, en el menú se selecciona la herramienta **HMS**, para utilizar **Reach AutoName**, **Basin AutoName** y **Map to HMS Units**, Figura 5.20.

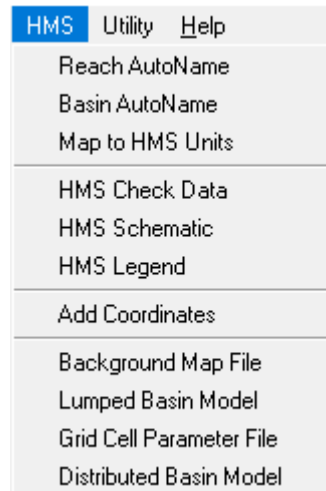


Figura 5.20. Menú Hydrologic Parameters.

Al establecer el sistema de coordenadas, se empieza a trabajar en la obtención de parámetros hidrológicos. Se utiliza **Add Coordinates** y **Grid Cell Parameter File**.

PROCESAMIENTO DE CELDAS DE RED

En este paso se crea el archivo con los parámetros hidrológicos en formato de malla, se selecciona el sistema de coordenadas SHG (*Standard Hydrologic Grid*) junto con el tamaño de celda, en el que se recomienda un tamaño de 1000 metros dejando el método de Albers, Figuras 5.21, 5.22 y 5.23.

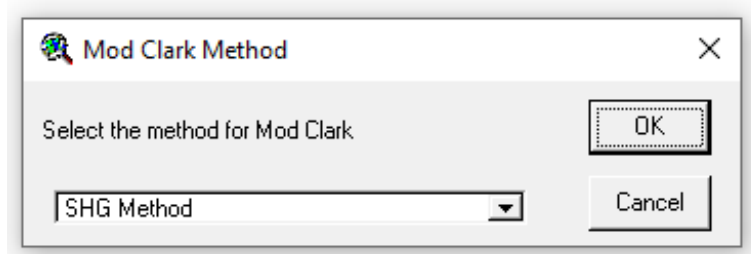


Figura 5.21. Selección del método

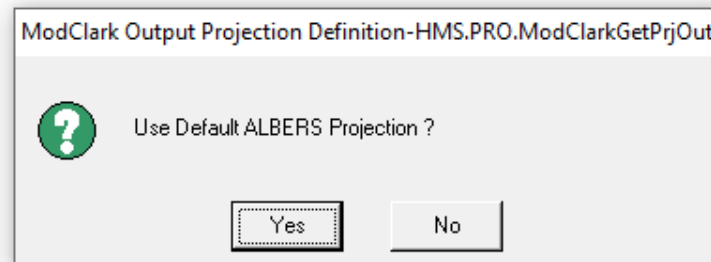


Figura 5.22. Proyección Albers para parámetros hidrológicos.

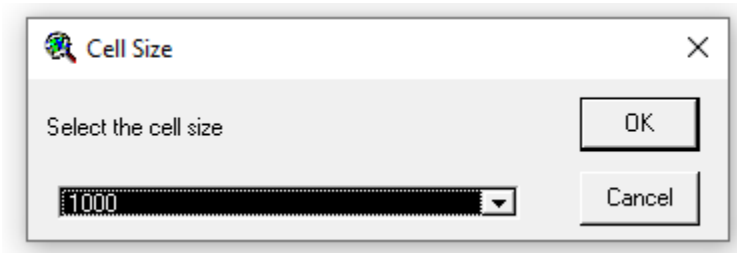


Figura 5.23. Tamaño de celda.

Al aplicar este proceso se obtiene la cuenca con el proceso de malla/celda para el Modelo de Clark, Figura 5.24.

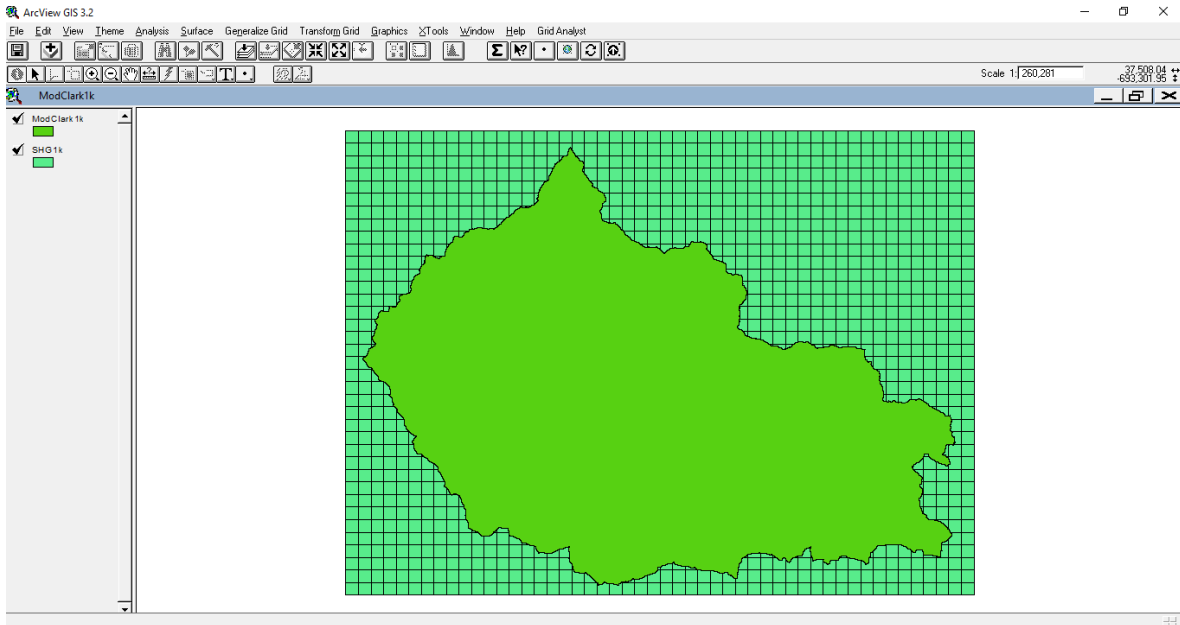


Figura 5.24. Generación del modelo de Clark y SHG1k.

Los *layers* generados en esta etapa son los siguientes:

- El *layer* **ModClark1k** (Figura 5.25), contiene las propiedades hidrológicas de la cuenca por celda, coordenadas X Y (CELL_X, CELL_Y), longitud de viaje hasta la salida y su área (FLOWLENGTH y MOD_AREA). Las longitudes de viaje son posteriormente convertidas por el programa MPE en tiempos de viaje utilizados por el método de Clark para la transferencia del escurrimiento.
- El *layer* **FLOWLENGTH** (Figura 5.26), contiene la longitud de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca.

CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS DE LA RH 22 USANDO UN MODELO LLUVIA ESCURRIMIENTO DISTRIBUIDO

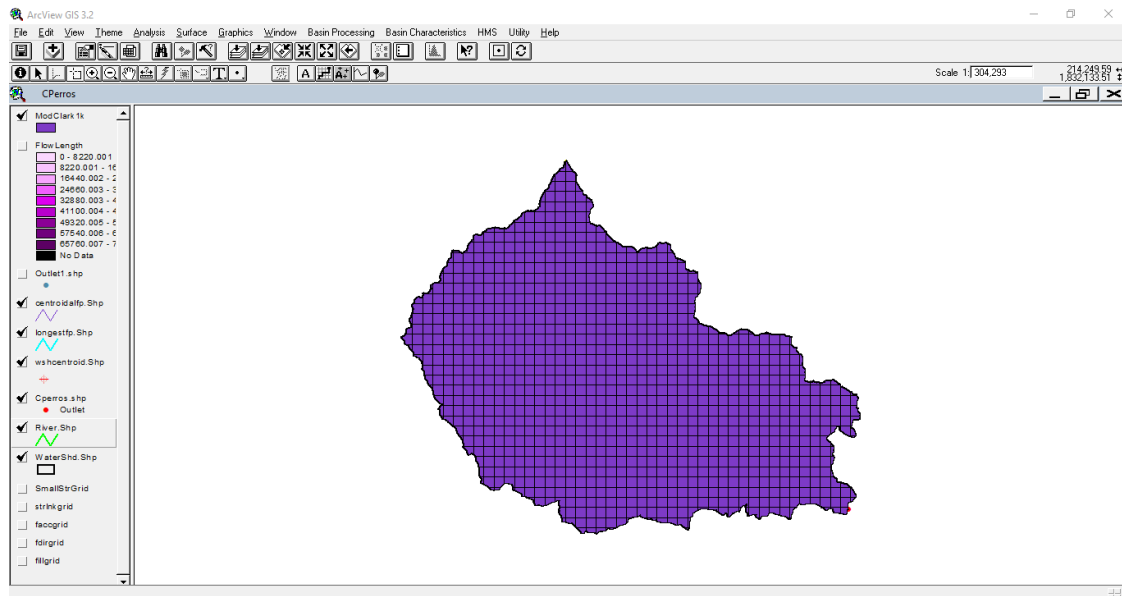


Figura 5.25. Propiedades hidrológicas por celda.

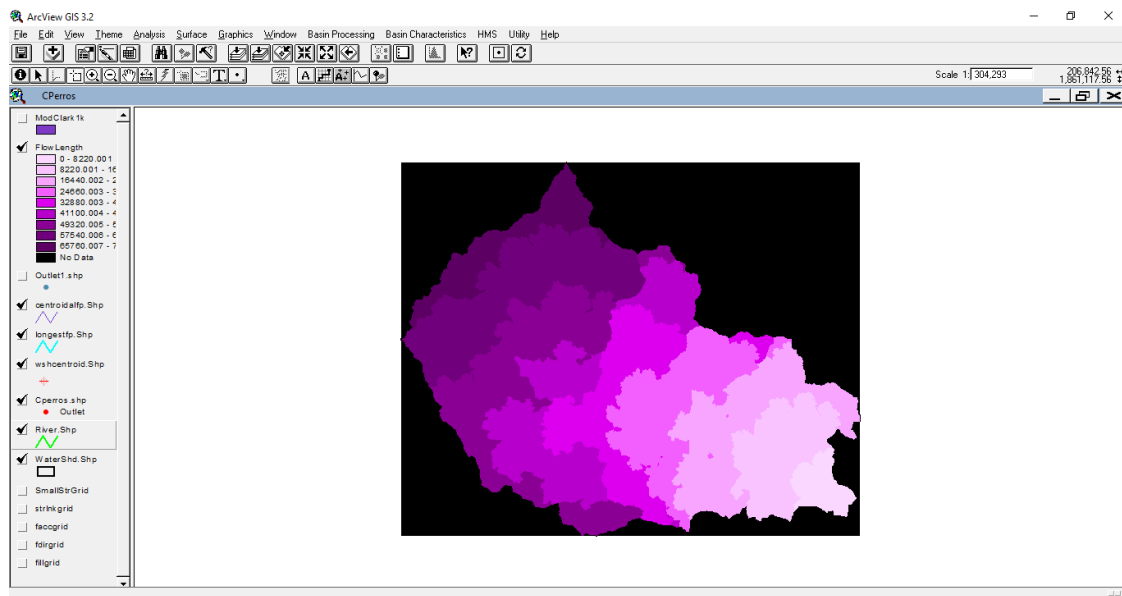


Figura 5.26. Longitud de viaje.

SELECCIÓN DEL SI Y CREACIÓN DEL ARCHIVO EN FORMATO DE MALLA

El paso posterior a obtener los parámetros hidráulicos es definir el sistema de unidades, para realizar este proceso nos apoyamos en el menú HMS y posteriormente en **Map to HMS Units**, para seleccionar el sistema de unidades con el que se realizará el proceso, en donde se selecciona el Sistema Internacional (SI).

Add Coordinates, agrega las coordenadas para el proyecto.

Grid Cell File, crea un archivo dentro de la carpeta que contiene el proyecto .mod, en el cual aparecen las características de las celdas, es decir la coordenada X Y, así como la longitud de viaje y área.

DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

Para este paso es necesario contar con los usos y tipos de suelos, estos pueden obtenerse de la página del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (<https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>).

Se genera una nueva vista en ArcView, se copia el *layer* ModClark1k generado en pasos anteriores que contiene las propiedades hidrológicas en cada celda y se agrega el tipo y uso de suelo, Figura 5.27.

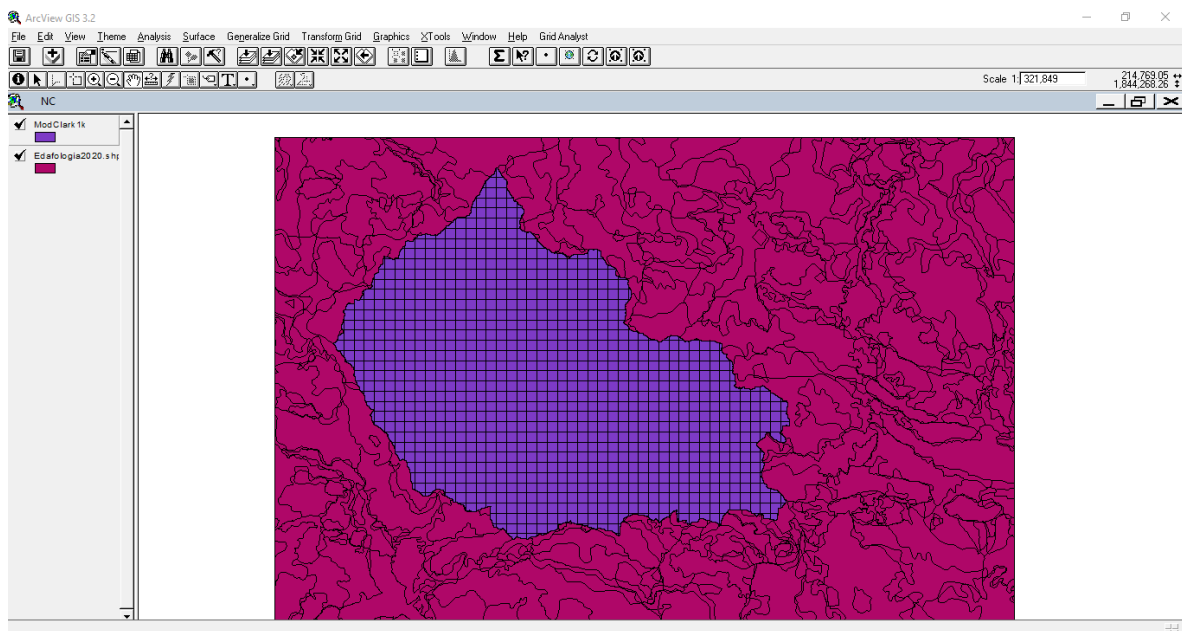


Figura 5.27. *ModClark* sobre el tipo y uso de suelo.

Con la información cargada del modelo de Clark y del tipo y uso de suelo se recortan los mapas conforme a la geometría o forma de la cuenca, para esto se selecciona **View – Geoprocessing wizard – Intersect two themes**, Figura 5.28. En el campo *Input Features* se selecciona el mapa que se requiere recortar (Edafología o Uso de Suelo) y en el campo *Clip Features* se selecciona el archivo de parámetros hidrológicos (**ModClark1k**), Figura 5.29.

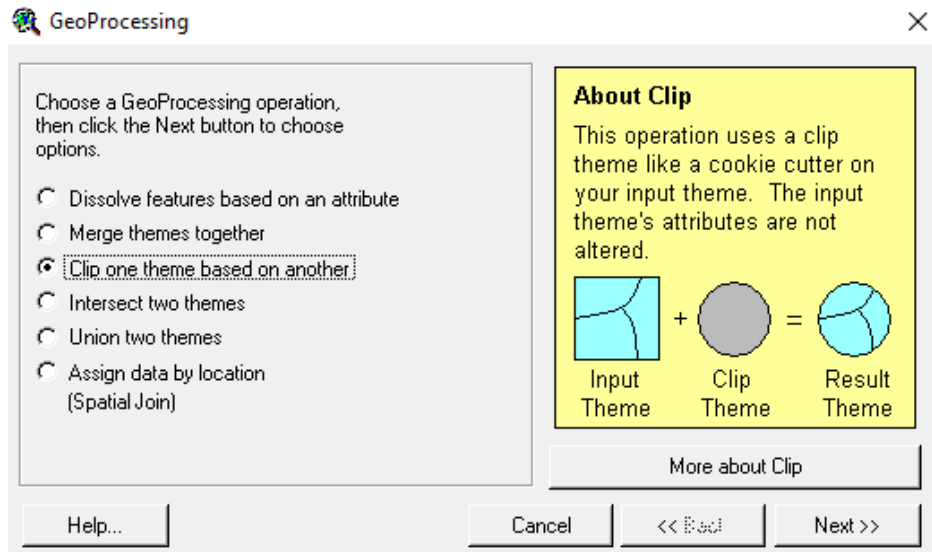


Figura 5.28. Recorte Número de Curva de la cuenca en estudio.

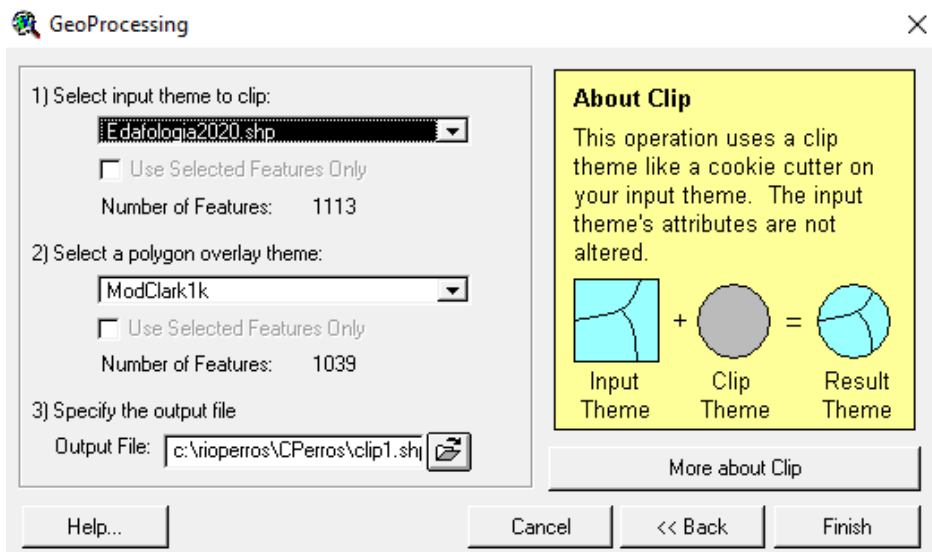


Figura 5.29. Selección del tema a recortar y tema de referencia.

El resultado del recorte (Uso de Suelo) se observa en la Figura 5.30.

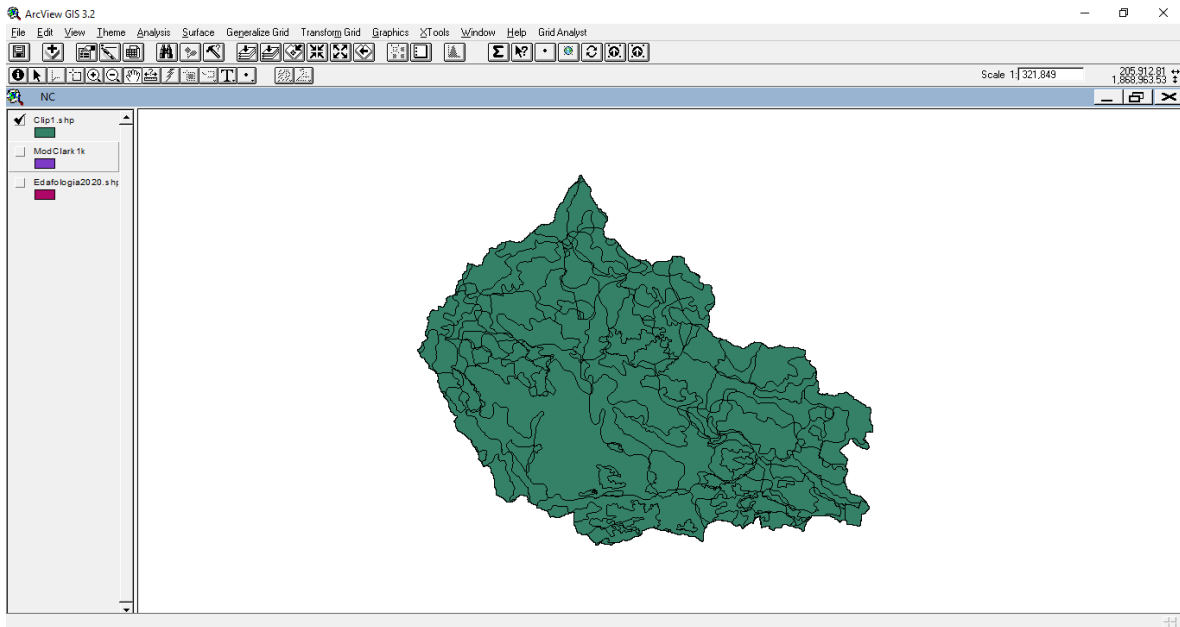


Figura 5.30. Uso de Suelo de la cuenca del río Los Perros.

Es importante contar con las consideraciones del estudio para tener clasificado el tipo de suelo de acuerdo a su permeabilidad, sea muy alta, buena, media o baja. Esta clasificación se relaciona con el grupo hidrológico A, B, C y D respectivamente.

CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DEL SUELO

Los tipos básicos con los que se caracteriza un suelo están dados por su primera letra, es decir, si la primera letra es A, (Ah + Bd/2/Lp), la clasificación de suelos de la FAO determina que es de tipo *Acrisol* y su permeabilidad es baja. En este estudio se clasificará con base en la primera letra de cada suelo, esto por ser el suelo predominante y grupo hidrológico. Figura 5.31.

CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS DE LA RH 22 USANDO UN MODELO LLUVIA ESCURRIMIENTO DISTRIBUIDO

N_cpa2	Textura	F_suger	Cal_piso	Nota_objeto	Clave	Uso	Psc_grupo1	Psc_grupo2	Psc_grupo3	Psc_media	GHFinal	Nc
Luvico	Fina	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	D	B	C	D	87.0000	
N	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
Endoleptico	Gruesa	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	C	B	B	75.0000	
Luvico	Fina	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	D	B	C	D	87.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
N	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
N	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	ASENTAMIENTOS HUMANOS	B	N	B	B	75.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Epileptico	Fina	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	C	B	C	C	73.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Epileptico	Fina	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	C	B	C	C	73.0000	
Epileptico	Fina	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	C	B	C	C	73.0000	
Endoleptico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	C	B	C	C	73.0000	
N	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	C	B	N	C	73.0000	
N	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	C	B	N	C	73.0000	
Endoleptico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	B	C	C	73.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
N	Meda	N	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	N	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	
Molico	Meda	Pedregosa	Aproximada	N	N	BOSQUE	B	C	B	B	60.0000	

Figura 5.31. Tabla de atributos del Número de Curva, Tipo y Uso de Suelo.

ASIGNACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

El paso siguiente es intersectar los temas, para realizarlo nos apoyamos en la herramienta de **XTools – Intersect Themes**, y se selecciona el tema que contiene el grupo hidrológico de suelo y el número de curva para cada uso de suelo.

Se agrega una columna con nombre “**Cell_id**” (Figura 5.33), utilizamos el **ModClark1k** (Figura 5.32) para intersectarlo con el Número de Curva y corte (**Clip1**) de la cuenca (Figura 5.35).

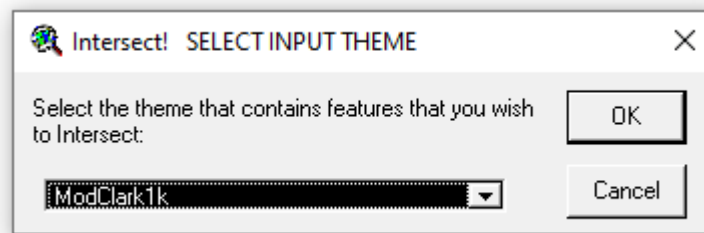


Figura 5.32. Selección del tema ModClark1k.

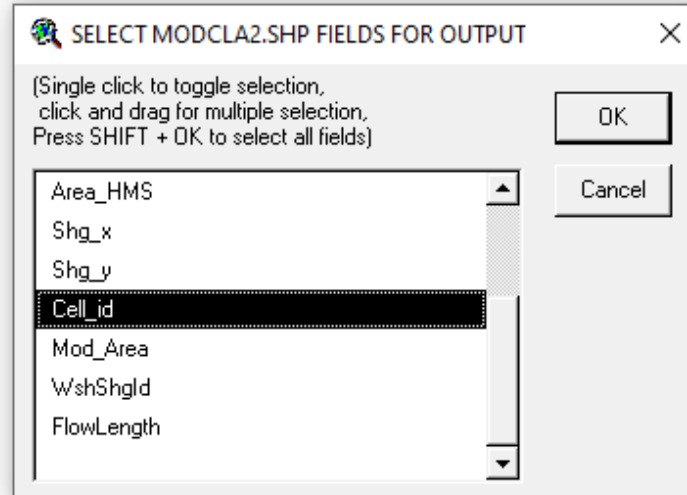


Figura 5.33. Selección de la columna Cell_id.

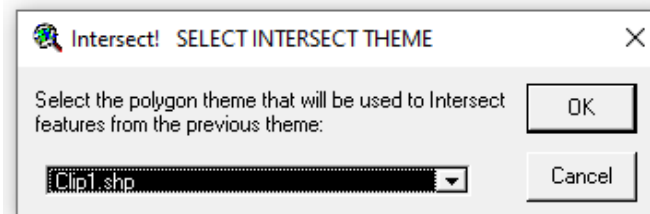


Figura 5.34. Intersección con el corte (clip1).

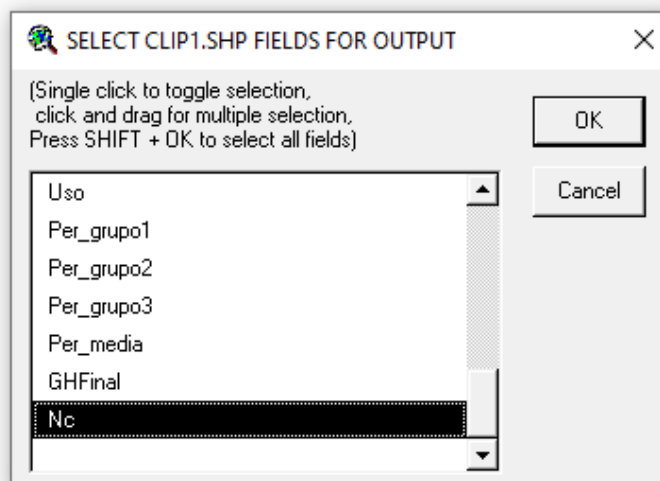


Figura 5.35. Intersección del corte (Clip1) con el Número de Curva.

Para obtener la tabla que utilizará el programa MPE se realiza la intercepción de los temas donde se asigna el **Número de Curva** con el **ModClark1k**. Los atributos a considerar se muestran en la Figura 5.36.

Shape	Cell_id	NC	Area_Metros	Perimeter_Metros	Alceza	Hectareas
Polygon	1643	87.0000	122191.815	2152.209	30.194	12.219
Polygon	1681	87.0000	119452.710	2138.104	29.517	11.945
Polygon	1682	87.0000	542078.572	4036.757	134.148	54.208
Polygon	1683	87.0000	38893.340	1183.260	9.610	3.889
Polygon	1720	87.0000	13198.566	451.253	3.261	1.320
Polygon	1721	87.0000	136118.731	2257.381	33.636	13.612
Polygon	1722	87.0000	527.787	101.088	0.130	0.053
Polygon	1688	75.0000	171663.422	1798.051	42.396	17.157
Polygon	1721	75.0000	1163.463	282.264	0.287	0.116
Polygon	1722	75.0000	48292.614	942.912	11.933	4.829
Polygon	1296	75.0000	5696.228	444.239	1.398	0.566
Polygon	1294	75.0000	458598.611	3001.182	112.826	45.859
Polygon	1295	75.0000	325724.153	2632.130	80.488	32.572
Polygon	1333	75.0000	184520.957	2230.395	45.596	18.452
Polygon	1451	87.0000	296426.114	2213.354	73.248	29.643
Polygon	1490	87.0000	423698.531	3296.289	104.695	42.369
Polygon	1523	87.0000	40632.899	916.222	10.045	4.063
Polygon	687	75.0000	50914.106	930.475	12.581	5.091
Polygon	688	75.0000	120261.438	1617.347	29.717	12.026
Polygon	726	75.0000	29579.389	1245.702	7.309	2.958
Polygon	727	75.0000	7621.300	590.379	1.893	0.762
Polygon	688	75.0000	17737.553	796.174	4.383	1.774
Polygon	726	75.0000	72540.718	1087.752	17.925	7.254
Polygon	727	75.0000	143095.263	1568.124	35.350	14.309
Polygon	688	75.0000	371.540	121.014	0.092	0.037
Polygon	688	75.0000	395.793	98.412	0.068	0.036
Polygon	654	75.0000	17344.868	778.967	4.286	1.734
Polygon	655	75.0000	171474.545	1629.453	42.372	17.147
Polygon	655	75.0000	107719.179	1817.064	26.618	10.772
Polygon	696	60.0000	2671.869	271.134	0.733	0.267
Polygon	735	60.0000	42548.694	2940.965	104.414	42.255
Polygon	774	60.0000	199288.228	1872.085	49.240	19.929
Polygon	696	73.0000	140071.783	1664.523	34.612	14.007
Polygon	687	73.0000	3690.424	306.611	0.902	0.369
Polygon	735	73.0000	305330.544	2306.081	76.463	30.533

Figura 5.36. Tabla de atributos de la intersección de los temas del NC y ModClark1k.

A continuación de la tabla de atributos del Modelo de Clark se eliminarán las columnas para solo ocupar **Shg_X**, **Shg_Y**, **Cell_id**, **Mod_Area** y **FlowLength**, Figura 5.37.

Shape	Shg_x	Shg_y	Cell_id	Mod_Area	FlowLength
Polygon	232	1848	60	0.0059760000	66.04032031250
Polygon	233	1847	98	0.1802400000	64.58516015625
Polygon	233	1848	99	0.8022740000	65.26323028125
Polygon	233	1849	100	0.3898670000	65.42916798750
Polygon	233	1850	101	0.1745880000	66.48525012500
Polygon	233	1851	102	0.0055970000	66.62200781250
Polygon	233	1851	102	0.0105390000	68.03002343750
Polygon	234	1845	135	0.0051800000	60.08951562500
Polygon	234	1846	136	0.3163810000	63.11063984375
Polygon	234	1847	137	0.9657230000	63.75197265625
Polygon	234	1848	138	0.0000000000	64.35075812500
Polygon	234	1849	139	0.0000000000	65.23183203125
Polygon	234	1850	140	0.0000000000	65.87917197500
Polygon	234	1851	141	0.9624810000	67.26543375000
Polygon	234	1852	142	0.4560250000	67.38836787500
Polygon	235	1843	172	0.0604060000	57.45866798750
Polygon	235	1844	173	0.5958970000	58.35712103750
Polygon	235	1845	174	0.9710640000	60.08214453125
Polygon	235	1846	175	0.9993910000	62.11551562500
Polygon	235	1847	176	0.0000000000	62.65527734375
Polygon	235	1848	177	0.0000000000	63.32578962500
Polygon	235	1849	178	0.0000000000	64.39948487500
Polygon	235	1850	179	0.0000000000	65.04889062500
Polygon	235	1851	180	0.0000000000	66.43041406250
Polygon	235	1852	181	0.9644040000	66.84466406250
Polygon	235	1853	182	0.0021320000	67.40748437500
Polygon	235	1853	182	0.1867100000	72.08403125000
Polygon	236	1840	208	0.0374760000	55.75390625000
Polygon	236	1841	209	0.2899880000	55.70507031250
Polygon	236	1842	210	0.9324590000	55.30287893750
Polygon	236	1843	211	0.9345930000	56.07142593750
Polygon	236	1844	212	0.0000000000	57.59347656250
Polygon	236	1845	213	0.0000000000	60.38116015625
Polygon	236	1846	214	0.0000000000	61.10560937500
Polygon	236	1847	215	0.0000000000	61.53401718750

Figura 5.37. Tabla de atributos ModClark1k modificada.

Se seleccionan de las dos tablas de atributos (intersección y la de ModClark) y se realiza un **join**, esto con la finalidad de integrar la columna de Nc (Número de Curva) a los atributos del Modelo de Clark. Seleccionando la columna de *Cell_id*, en ambas tablas, Figuras 5.38 y 5.39.

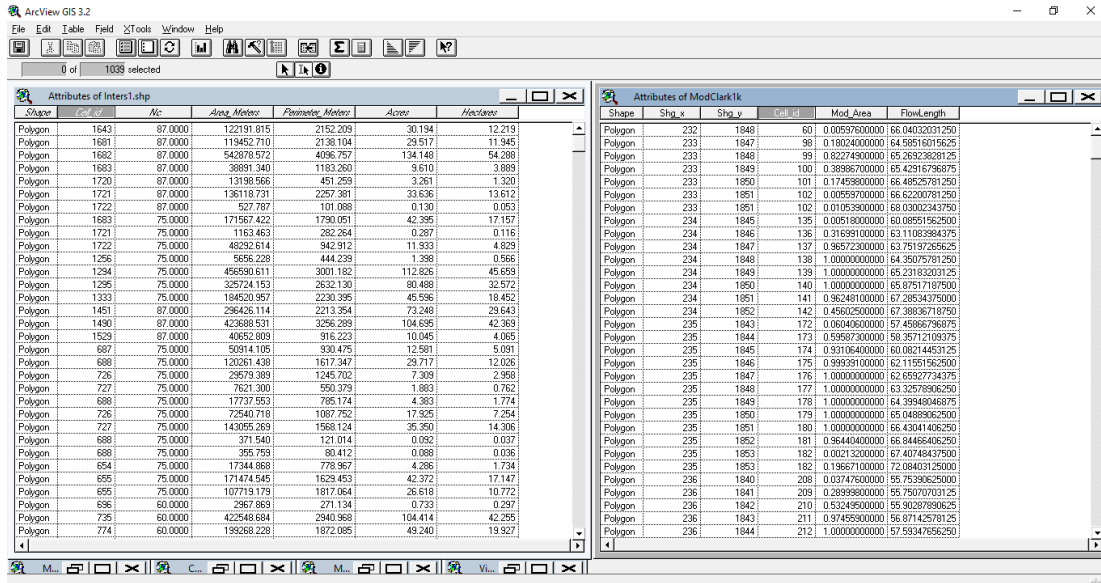


Figura 5.38. Intersección con ModClark1k.

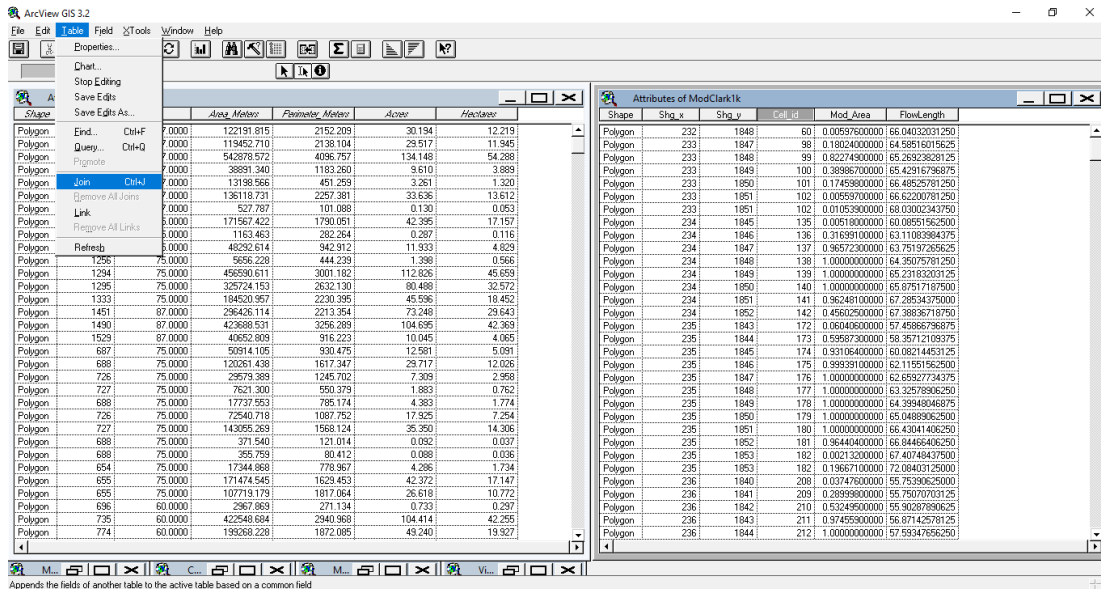


Figura 5.39. Join de los atributos de intersección con ModClark1k.

La unión resultante de estas dos tablas de atributos se muestra en la Figura 5.40.

Shape	Shg_x	Shg_y	Cell_Id	Mod_Area	Flow_Length	Ac	Area_Metros	Perimetro_Metros	Acuar	Hectareas
Polygon	232	1848	60	0.0059760000	66.04032031250	73.0000	5976.581	446.616	1.477	0.598
Polygon	233	1847	98	0.1802400000	64.58516015625	86.0000	18024.878	2565.773	44.538	18.024
Polygon	233	1848	99	0.8227490000	65.26923628125	86.0000	570933.265	3491.150	141.080	57.093
Polygon	233	1849	100	0.3898670000	65.42916796875	86.0000	288604.863	2973.861	71.316	28.860
Polygon	233	1850	101	0.1745980000	66.48525781250	73.0000	158004.453	2403.680	39.044	15.800
Polygon	233	1851	102	0.0059700000	66.62202091250	73.0000	5936.895	404.625	1.383	0.596
Polygon	233	1851	102	0.0105380000	68.03002343750	73.0000	5596.895	404.625	1.383	0.560
Polygon	234	1845	135	0.0051800000	60.08951562500	86.0000	5180.388	400.456	1.280	0.518
Polygon	234	1846	136	0.3163910000	63.11083964375	86.0000	135616.995	3225.367	33.512	13.562
Polygon	234	1847	137	0.9657230000	63.7519265625	86.0000	603122.173	3518.127	149.034	60.312
Polygon	234	1848	138	1.0000000000	64.26075781250	86.0000	820286.800	3765.891	232.636	82.029
Polygon	234	1849	139	1.0000000000	65.23183203125	86.0000	951936.662	3847.417	235.228	95.194
Polygon	234	1850	140	1.0000000000	65.87517187500	86.0000	601002.481	3045.688	148.510	60.100
Polygon	234	1851	141	0.9624810000	67.28534375000	73.0000	962488.441	4271.437	237.835	96.249
Polygon	234	1852	142	0.4560250000	67.38836718750	73.0000	456028.346	3215.677	112.687	45.603
Polygon	235	1843	172	0.6040300000	57.45866796875	66.0000	60403.355	1483.447	14.827	6.041
Polygon	235	1844	173	0.5958730000	58.35712109375	79.0000	117245.007	1810.632	28.922	11.725
Polygon	235	1845	174	0.9310640000	60.08214453125	86.0000	931071.290	4061.790	230.072	93.107
Polygon	235	1846	175	0.9939100000	62.11551562500	86.0000	425926.669	2881.264	105.248	42.593
Polygon	235	1847	176	1.0000000000	62.65927734375	77.0000	1000007.950	4000.015	247.106	100.001
Polygon	235	1848	177	1.0000000000	63.32678962500	77.0000	1000007.573	4000.015	247.106	100.001
Polygon	235	1849	178	1.0000000000	64.39949346875	77.0000	884310.494	4028.383	218.517	88.431
Polygon	235	1850	179	1.0000000000	65.04899625000	73.0000	628526.520	3657.290	155.312	62.853
Polygon	235	1851	180	1.0000000000	66.43041406250	86.0000	49736.435	1483.665	12.290	4.974
Polygon	235	1852	181	0.9644400000	66.84486462500	60.0000	129777.395	1389.177	32.069	12.978
Polygon	235	1853	182	0.0021300000	67.40749437500	73.0000	2131.863	351.528	0.527	0.213
Polygon	235	1853	182	0.1968710000	72.08403125000	73.0000	2131.863	351.528	0.527	0.213
Polygon	236	1840	208	0.0374760000	55.75306250000	66.0000	37476.301	1145.217	9.261	3.748
Polygon	236	1841	209	0.2893980000	55.75070703125	66.0000	290000.624	2879.342	71.660	29.000
Polygon	236	1842	210	0.5324950000	55.30287890625	79.0000	32395.145	837.418	8.005	3.240
Polygon	236	1843	211	0.5745590000	56.87442678125	79.0000	495178.780	3267.229	122.361	49.518
Polygon	236	1844	212	1.0000000000	57.59347862500	86.0000	34939.235	2098.472	8.831	3.493
Polygon	236	1845	213	1.0000000000	60.38116015625	79.0000	67087.471	1691.480	16.578	6.709
Polygon	236	1846	214	1.0000000000	61.10560937500	69.0000	27923.541	1258.346	6.900	2.792
Polygon	236	1847	215	1.0000000000	61.53401718750	77.0000	771771.314	3638.530	190.708	77.177

Figura 5.40. Unión de atributos finales.

A continuación, se exporta la tabla a una base de datos de Excel (dBASE) para su posterior procesamiento en formato para MPE.

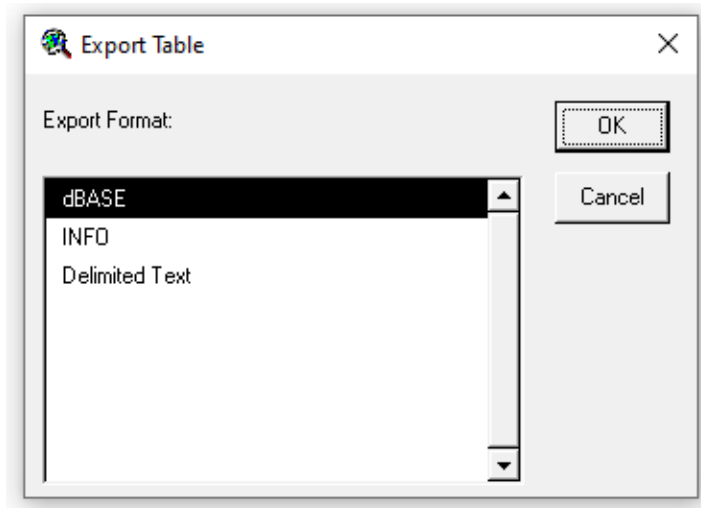


Figura 5.41. Formato de exportación, dBASE.

CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS DE LA RH 22 USANDO UN MODELO LLUVIA ESCURRIMIENTO DISTRIBUIDO

Shg_x	Shg_y	Cell_id	Mod_area	Flowlength	Nc
232	1848	60	0.00597600000	66.04032031250	73.0000
233	1847	98	0.18024000000	64.58516015625	86.0000
233	1848	99	0.82274900000	65.26923828125	86.0000
233	1849	100	0.38986700000	65.42916796875	86.0000
233	1850	101	0.17459800000	66.48525781250	73.0000
233	1851	102	0.00559700000	66.62200781250	73.0000
233	1851	102	0.01053900000	68.03002343750	73.0000
234	1845	135	0.00518000000	60.08551562500	86.0000
234	1846	136	0.31699100000	63.11083984375	86.0000
234	1847	137	0.96572300000	63.75197265625	86.0000
234	1848	138	1.00000000000	64.35075781250	86.0000
234	1849	139	1.00000000000	65.23183203125	86.0000
234	1850	140	1.00000000000	65.87517187500	86.0000
234	1851	141	0.96248100000	67.28534375000	73.0000
234	1852	142	0.45602500000	67.38836718750	73.0000
235	1843	172	0.06040600000	57.45866796875	66.0000
235	1844	173	0.59587300000	58.35712109375	79.0000
235	1845	174	0.93106400000	60.08214453125	86.0000
235	1846	175	0.99939100000	62.11551562500	86.0000
235	1847	176	1.00000000000	62.65927734375	77.0000
235	1848	177	1.00000000000	63.32578906250	77.0000
235	1849	178	1.00000000000	64.39948046875	77.0000

Figura 5.42. Tabla en formato de Excel para MPE.

Finalmente, se exporta los valores a un formato de texto (.txt), requerida por el programa MPE, la que será guardada como *Texto (delimitado por tabulaciones) (*.txt)*. El archivo se guardará con el nombre de **ModClarkCNPerros.txt**, Figura 5.43.

Shg_x	Shg_y	Cell_id	Mod_area	Flowlength	Nc
232	1848	60	0.00597600000	66.04032031250	73.0000
233	1847	98	0.18024000000	64.58516015625	86.0000
233	1848	99	0.82274900000	65.26923828125	86.0000
233	1849	100	0.38986700000	65.42916796875	86.0000
233	1850	101	0.17459800000	66.48525781250	73.0000
233	1851	102	0.00559700000	66.62200781250	73.0000
233	1851	102	0.01053900000	68.03002343750	73.0000
234	1845	135	0.00518000000	60.08551562500	86.0000
234	1846	136	0.31699100000	63.11083984375	86.0000
234	1847	137	0.96572300000	63.75197265625	86.0000
234	1848	138	1.00000000000	64.35075781250	86.0000
234	1849	139	1.00000000000	65.23183203125	86.0000
234	1850	140	1.00000000000	65.87517187500	86.0000
234	1851	141	0.96248100000	67.28534375000	73.0000
234	1852	142	0.45602500000	67.38836718750	73.0000
235	1843	172	0.06040600000	57.45866796875	66.0000
235	1844	173	0.59587300000	58.35712109375	79.0000
235	1845	174	0.93106400000	60.08214453125	86.0000
235	1846	175	0.99939100000	62.11551562500	86.0000
235	1847	176	1.00000000000	62.65927734375	77.0000
235	1848	177	1.00000000000	63.32578906250	77.0000
235	1849	178	1.00000000000	64.39948046875	77.0000
235	1850	179	1.00000000000	65.04889062500	73.0000
235	1851	180	1.00000000000	66.43041406250	86.0000
235	1852	181	0.96440400000	66.84466406250	60.0000
235	1853	182	0.00213200000	67.40748437500	73.0000
235	1853	182	0.19667100000	72.08403125000	73.0000

Figura 5.43. Archivo de celdas para la cuenca del río Los Perros (ModClarkCNPerros.txt).

5.2. SELECCIÓN DEL EVENTO HIDROMETEOROLÓGICO

La cuenca del río Los Perros cuenta con varios eventos registrados en donde afectaron directamente a la población del lugar. Para seleccionar el evento se recurrió al registro del BANDAS y con apoyo en la estación hidrométrica 22017 se analizaron registros de gastos máximos instantáneos, Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Registro de la hidrométrica 22017, gastos máximos instantáneos.

Año	Qmax_inst	Año	Qmax_inst
1948	35.86	1977	9.335
1949	7.32	1978	1625
1950	348.936	1979	402
1951	57	1980	59.5
1952	417.995	1981	
1953	7.846	1986	111.61
1954	96.31	1987	79.813
1955	481	1988	121.024
1956	150.998	1989	101.491
1957	40.01	1990	9.045
1958	17.899	1991	249.514
1959	142.997	1992	35.412
1960	268	1993	
1961	218.84	1995	285.154
1962	91.425	1996	230.487
1963	114.92	1997	723.167
1964	154	1998	250.395
1965	15.7	1999	
1966	38.15	2000	33.002
1967	142.5	2001	140.467
1968	121.728	2002	490.865
1969	927	2003	140.071
1970	435	2004	17.72
1971	122.2	2005	145.674
1972	11.2	2006	24.883
1973	421	2007	131.639
1974	653.04	2009	85.25
1975	360	2012	804.488
1976	62.26	2014	80.654

De la Tabla 5.1, se seleccionaron varios eventos en donde el gasto máximo instantáneo fuera arriba de 450 m³/s (considerado alto), en donde los más representativos fueron los del año 1974, 1997, 2002 y 2012.

Al observar estos registros se procedió a graficar los eventos ahora con el gasto medio diario que es el caudal de medio que se presentó en las 24 horas. Es importante mencionar que para el gasto máximo instantáneo del año 2012 las estaciones climatológicas cercanas a la hidrométrica no cuentan con registro por lo que se descartará para este análisis. Los gastos para los tres años en análisis se observan en las siguientes Figuras.

PARA EL AÑO 1974

El gasto medio más alto se presentó el día 21 de septiembre con un caudal de 329.9 m³/s, Figura 5.44.

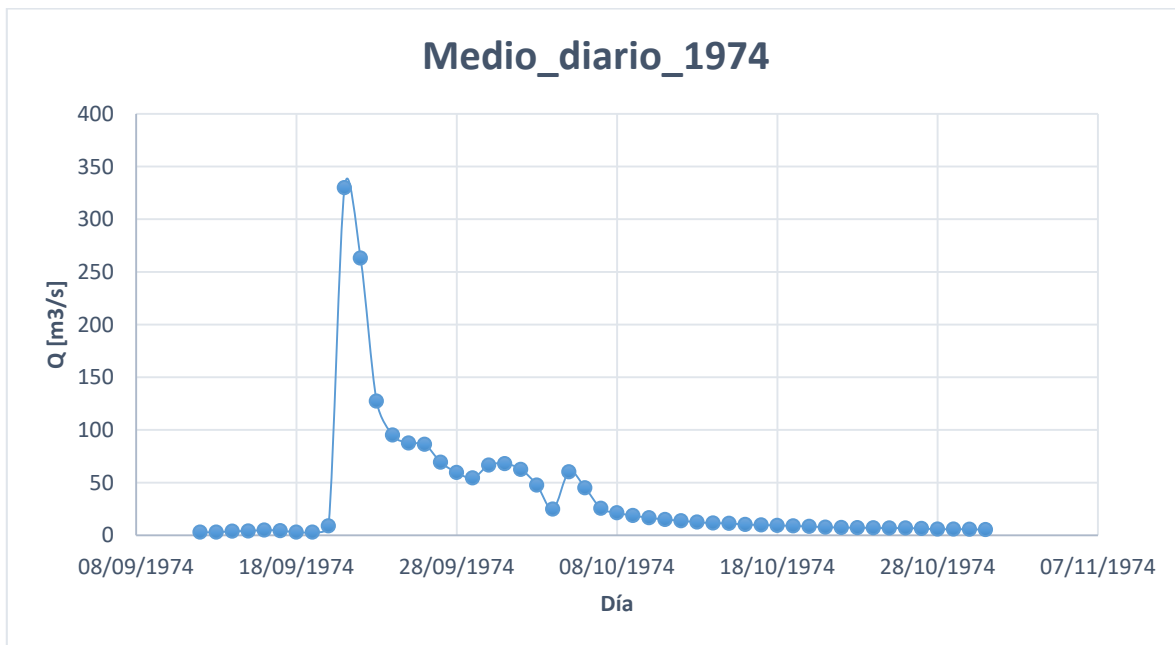


Figura 5.44. Evento registrado en hidrométrica, año 1974.

PARA EL AÑO 1997

El gasto medio más alto se presentó el día 09 de octubre con un caudal de 490.4 m³/s, Figura 5.45.

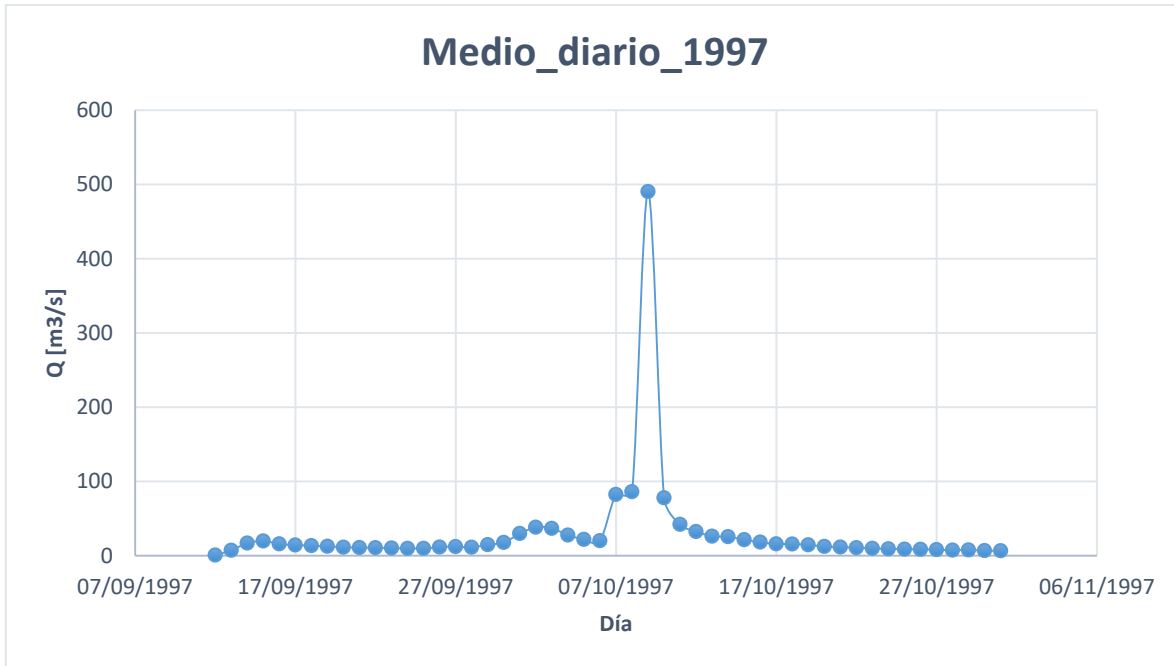


Figura 5.45. Evento registrado en hidrométrica, año 1997.

PARA EL AÑO 2002

El gasto medio más alto se presentó el día 05 de junio con un caudal de 157.1 m³/s y picos más bajos pero significativos, los días 08 y 28 de junio con caudales de 139.3 y 102.7 m³/s respectivamente, Figura 5.46.

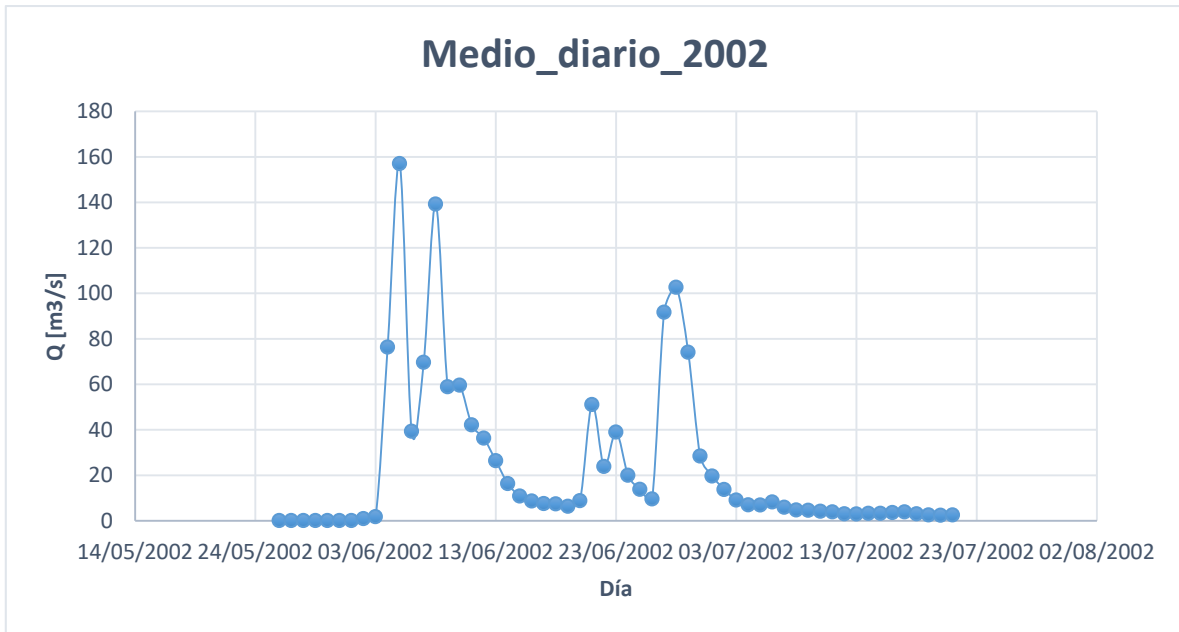


Figura 5.46. Evento registrado en hidrométrica, año 2002.

REGISTROS CLIMATOLÓGICOS PARA LOS EVENTOS SELECCIONADOS

Al contar con los registros de gastos medios diarios es necesario realizar en los días en que se registraron, la lluvia que provocó ese hidrograma. Para realizar este análisis se contemplaron las siguientes estaciones climatológicas:

Tabla 5.2. Estaciones contempladas para calibración.

Estacion	Nombre
20173	UNION HIDALGO, UNION H.
20127	STA. MARIA CHIMALPA
20068	MATIAS ROMERO, M. ROMERO
20134	SANTIAGO CHIVELA, (DGE)
20027	CHICAPA, JUCHITAN DE Z.
20039	IXTEPEC, CIUDAD IXTEPEC
20082	OSTUTA, SANTO DOMINGO Z.
20043	STA.MA.JALAPA DE MARQUEZ
20060	LAS CUEVAS (11)
20048	JUCHITAN DE ZARAGOZA
20148	SAN PEDRO TAPANATEPEC
20162	MAGDALENA TEQUISISTLAN
20149	STO.DOMINGO TEHUANTEPEC
20052	KM. 33+000,A.IXTLALTEPEC
20289	GUEVEA DE HUMBOLDT,(DGE)

Con la distribución geoespacial de la zona, Figura 4.47.

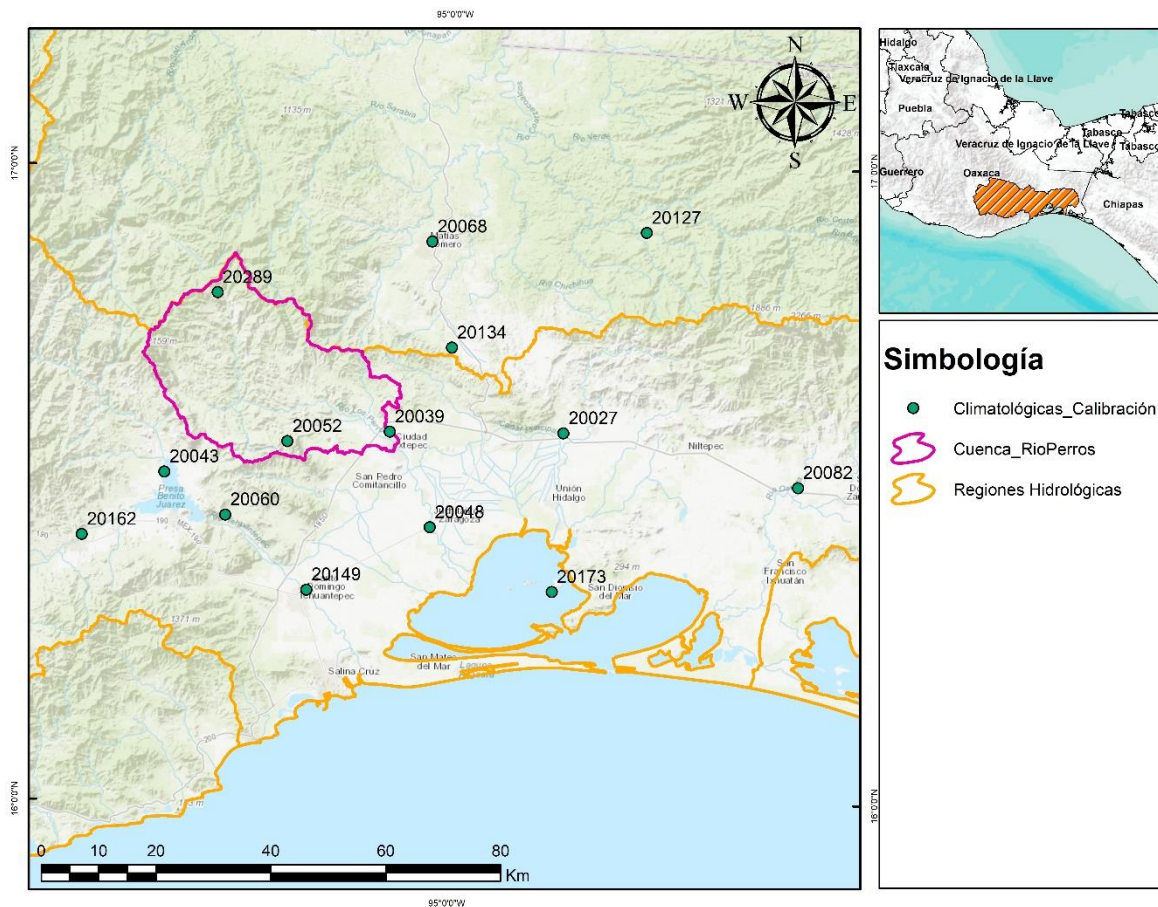


Figura 5.47. Estaciones consideradas para calibración.

Con la información de la hidrométrica y las estaciones en principio consideradas para la calibración se procedió a graficar las lluvias registradas de los días en donde los gastos fueron altos, a continuación, se muestran en las siguientes figuras la comparación del hietograma medido con los hidrogramas antes seleccionados.

PARA EL AÑO 1974

El evento de mayor lluvia se registró en la estación climatológica 20134 con una precipitación de 243.3 mm comparando con el hidrograma seleccionado, Figura 5.48.

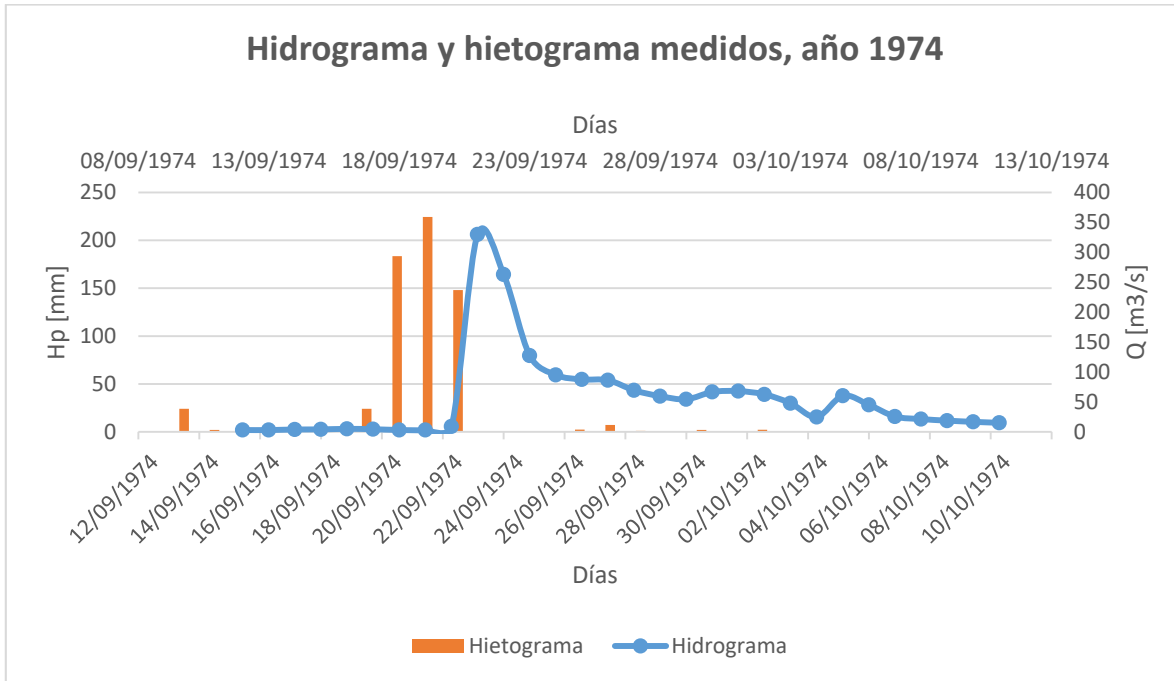


Figura 5.48. Hidrograma y hietograma medidos para el año 1974.

PARA EL AÑO 1997

El evento de mayor lluvia se registró en la estación climatológica 20039 con una precipitación de 169.4 mm comparando con el hidrograma seleccionado, Figura 5.49.

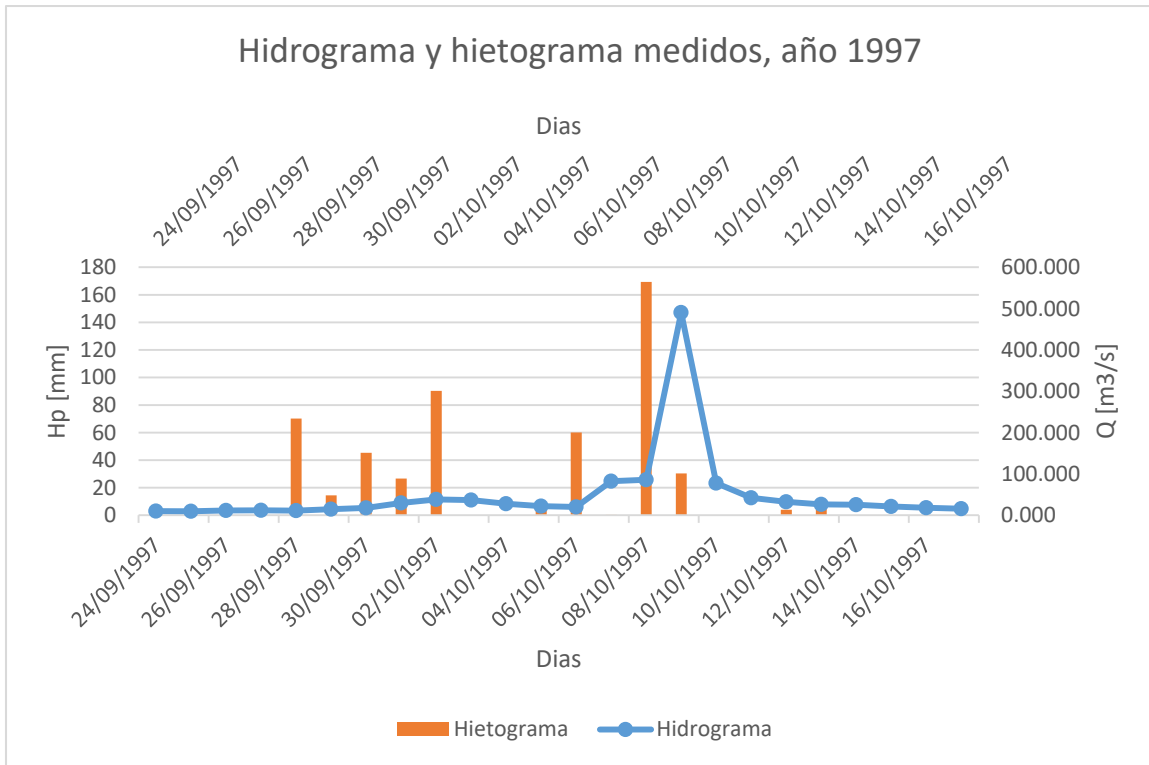


Figura 5.49. Hidrograma y hietograma medidos para el año 1997.

PARA EL AÑO 2002

El evento de mayor lluvia se registró en la estación climatológica 20149 con una precipitación de 204.5 mm comparando con el hidrograma seleccionado, Figura 5.50.

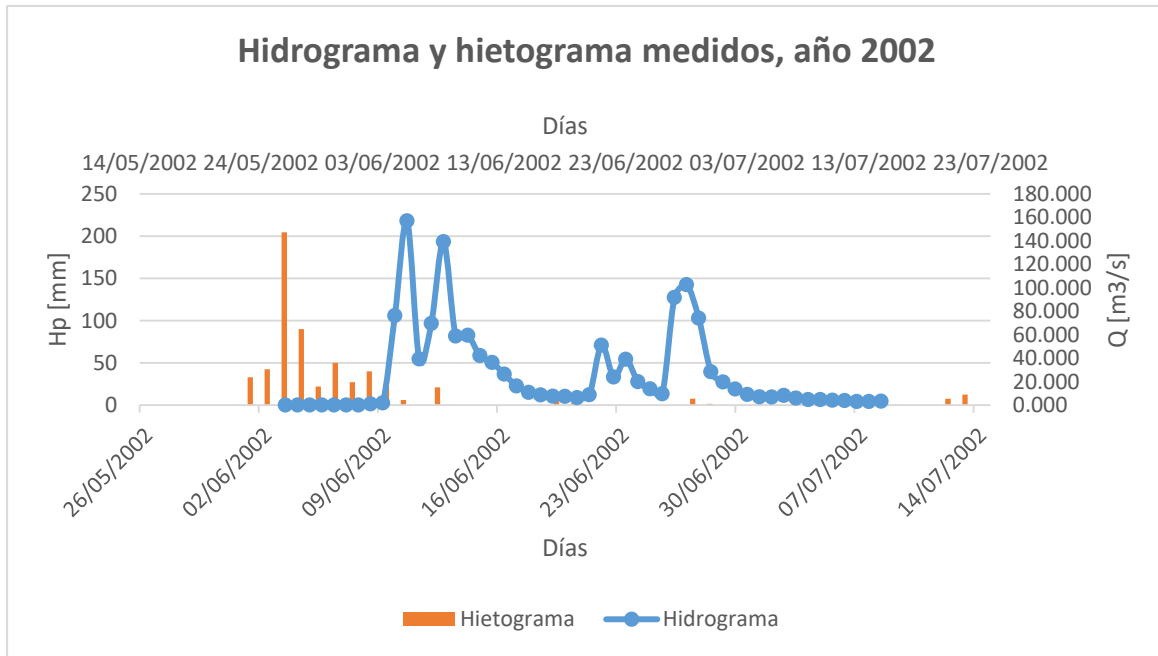


Figura 5.50. Hidrograma y hietograma medidos para el año 2002.

Con los análisis de las lluvias y gastos medidos en las estaciones consideradas para la calibración se optó por seleccionar el evento del año de 1997 que cuenta con un gasto medio diario elevado a comparación de los otros dos eventos también contemplados.

Las estaciones climatológicas para el año de 1997 cuentan con registro de precipitación en los días en que se presentó el hidrograma, estas estaciones que cuentan con el registro son las siguientes (Tabla 5.3):

Tabla 5.3. Estaciones para calibración del evento del año 1997.

Clave	Estacion	X	Y
20027	CHICAPA, JUCHITAN DE Z.	306157.94	1834423.9
20039	IXTEPEC, CIUDAD IXTEPEC	275917.68	1834719
20048	JUCHITAN DE ZÁRAGOZA	282865.99	1818044.5
20149	STO.DOMINGO TEHUANTEPEC	261379.8	1807201.5
20289	GUEVEA DE HUMBOLDT,(DGE)	245959.63	1859041.1

En la Figura 5.51, se visualizan las estaciones para la calibración.

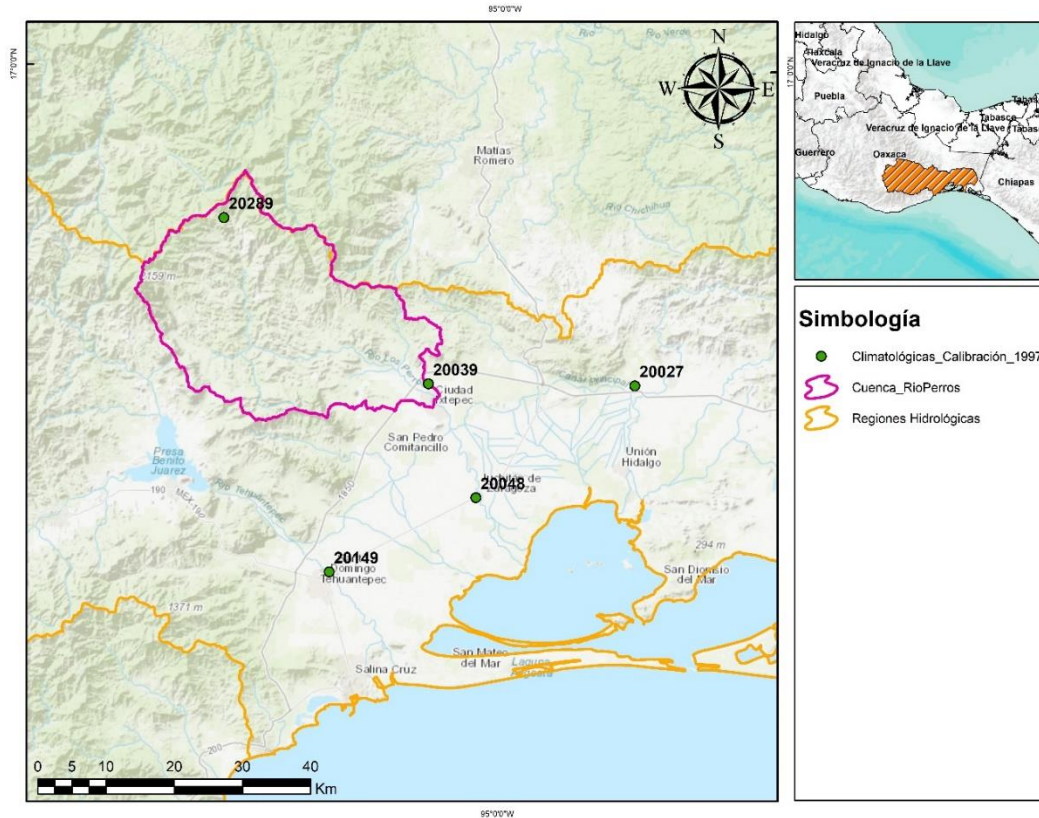


Figura 5.51. Estaciones para calibración del evento del año 1997.

Al considerar el evento del año 1997 se obtendrán los archivos de lluvia y de escurrimiento que junto al archivo de celdas (*ModClarkCNPerros.txt*) que se ingresarán al programa MPE.

Se obtienen las características fisiográficas de la cuenca en estudio, como principal característica a obtener es la pendiente media de la cuenca y el tiempo de concentración, así como el área de la cuenca.

5.2.1. CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LA CUENCA

PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE

La pendiente media se obtiene a través de la fórmula de *Taylor-Schwarz* que calcula la pendiente media como la de un canal transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión, Tabla 5.4 y Figura 5.52.

Tabla 5.4. Resumen de pendiente media del cauce.

RESUMEN S MEDIA							
Area de Cuenca		Pendiente Cauce	Longitud del cauce		Desnivel		
(m ²)	(Km ²)	(%)	(m)	(Km)	(m)	MAX	MIN
931343700	931.3437	0.384	74177.523	74.178	1090.0	1130.0	40.0

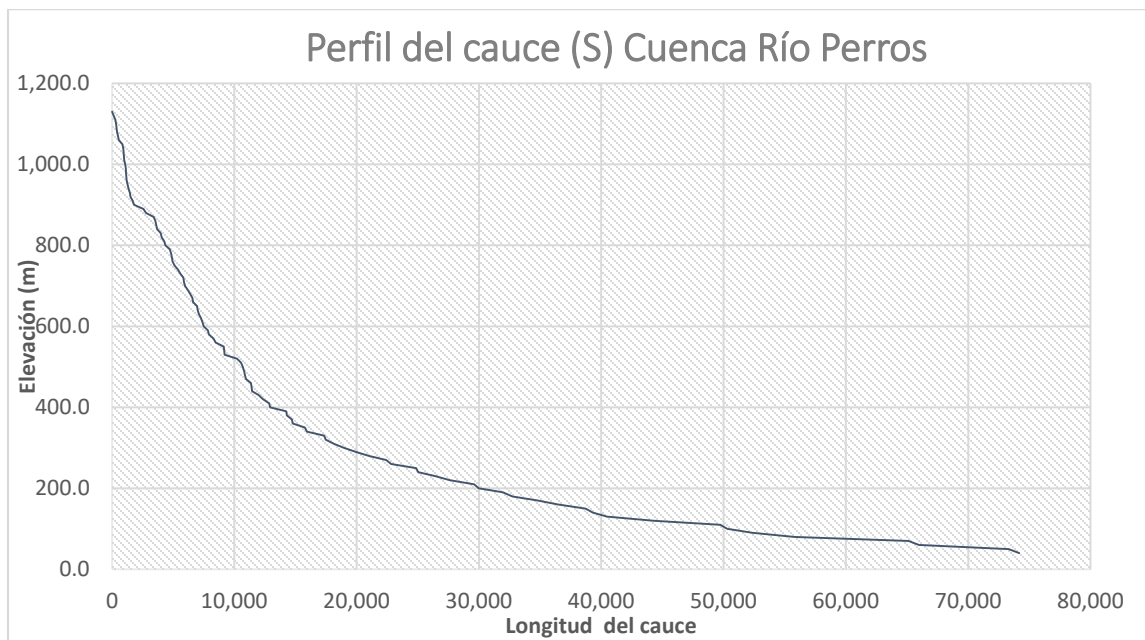


Figura 5.52. Perfil del cauce, cuenca del río Los Perros.

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T_c)

El tiempo de concentración determina el tiempo que tarda una partícula de agua en transitar desde la parte más alta de la cuenca hasta su salida de la misma, es importante obtener esta característica para determinar si la respuesta de la cuenca es rápida o lenta y poder estimar las tormentas estadísticas de forma adecuada.

La fórmula utilizada para calcular el tiempo de concentración es la de Kirpich que se describe de la siguiente manera:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (71)$$

En donde S es la pendiente del cauce principal, L es la longitud del cauce en m y t_c resulta en hrs. El tiempo de concentración que resulta al aplicar la ecuación (71) con los datos obtenidos anteriormente es:

$$t_c = 0.000325 * \frac{74177.523^{0.77}}{0.384^{0.385}} = 2.643 \text{ hrs}$$

5.3. CREACIÓN DE ARCHIVO DE LLUVIA Y ESCURRIMIENTO

Posterior a la obtención y considerando que el tiempo de concentración es bajo (tiempo de respuesta de la cuenca rápida) se determinó realizar tormentas estadísticas de una duración de un día con un Δt de 10 minutos. Para determinar estas tormentas es necesario calibrar el modelo MPE y obtener los datos de calibración para posteriormente obtener hidrogramas de diseño. Es importante mencionar que el modelo se calibrará con datos a cada 1 hora tanto de precipitación como de escurrimiento. El proceso se explica a continuación.

Las lluvias que se registraron en las estaciones climatológicas se tienen a cada 24 horas, es necesario convertir a cada hora y para esto se divide la precipitación registrada entre 24.

Tabla 5.5. Precipitaciones registradas a 24 hrs.

Estacion	x	y	24/09/1997	25/09/1997	26/09/1997	27/09/1997	28/09/1997	29/09/1997
20027	306157.9380	1834423.8898	2.5	0.0	0.0	2.5	18.0	12.5
20039	275917.6812	1834719.0233	0.0	0.0	0.2	0.3	70.2	14.4
20048	282865.9924	1818044.4957	0.0	0.0	0.0	2.5	170.5	18.8
20149	261379.8031	1807201.4574	0.0	0.0	2.3	5.0	123.0	20.0
20289	245959.6254	1859041.1144	22.0	27.0	17.0	0.0	63.0	57.0

Tabla 5.6. Precipitaciones obtenidas a 1 hr.

Estacion	x	y	24/09/1997 00:00	24/09/1997 01:00	24/09/1997 02:00	24/09/1997 03:00	24/09/1997 04:00	24/09/1997 05:00
20027	306157.9380	1834423.8898	0.1042	0.1042	0.1042	0.1042	0.1042	0.1042
20039	275917.6812	1834719.0233	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20048	282865.9924	1818044.4957	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20149	261379.8031	1807201.4574	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20289	245959.6254	1859041.1144	0.9167	0.9167	0.9167	0.9167	0.9167	0.9167

Al tener las precipitaciones a cada hora, se procede a ordenar el registro del escurrimiento que tiene la hidrométrica. Este hidrograma medido cuenta con un registro a 24 hrs, pero como el registro es con el **gasto medio diario** se permite tomar como un gasto constante durante cada hora.

Tabla 5.7. Registro de escurrimiento a 24 hrs.

Fecha	Q [m3/s]
24/09/1997	9.839
25/09/1997	9.724
26/09/1997	11.496
27/09/1997	12.082
28/09/1997	11.284
29/09/1997	14.636
30/09/1997	17.787
01/10/1997	29.722
02/10/1997	38.337
03/10/1997	36.753
04/10/1997	27.695
05/10/1997	21.850
06/10/1997	20.035
07/10/1997	82.450
08/10/1997	86.065
09/10/1997	490.373
10/10/1997	77.832
11/10/1997	42.212
12/10/1997	32.432
13/10/1997	26.135
14/10/1997	25.484
15/10/1997	21.378
16/10/1997	18.086
17/10/1997	15.762

Tabla 5.8. Registro de escurrimiento a 1 hr.

Fecha	Q [m3/s]
24/09/1997 00:00	9.839
24/09/1997 01:00	9.839
24/09/1997 02:00	9.839
24/09/1997 03:00	9.839
24/09/1997 04:00	9.839
24/09/1997 05:00	9.839
24/09/1997 06:00	9.839
24/09/1997 07:00	9.839
24/09/1997 08:00	9.839
24/09/1997 09:00	9.839
24/09/1997 10:00	9.839
24/09/1997 11:00	9.839
24/09/1997 12:00	9.839
24/09/1997 13:00	9.839
24/09/1997 14:00	9.839
24/09/1997 15:00	9.839
24/09/1997 16:00	9.839
24/09/1997 17:00	9.839
24/09/1997 18:00	9.839
24/09/1997 19:00	9.839
24/09/1997 20:00	9.839
24/09/1997 21:00	9.839
24/09/1997 22:00	9.839
24/09/1997 23:00	9.839

Con los registros tanto de precipitación como de escurrimiento a cada hora se procede a realizar los archivos de entrada que junto con el archivo de celdas (ModClarkCNPerros.txt) son los archivos necesarios para calibrar el modelo MPE.

El archivo de precipitación se crea en formato .txt con nombre **Lluvias_1hr_Div24.txt**, Figura 5.53.

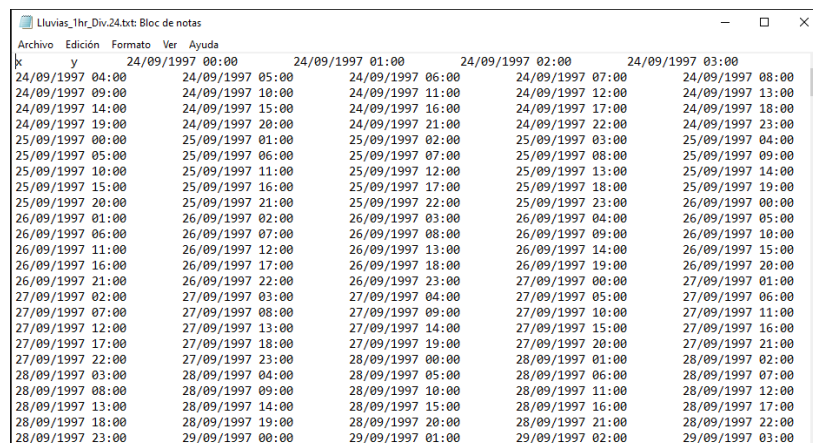
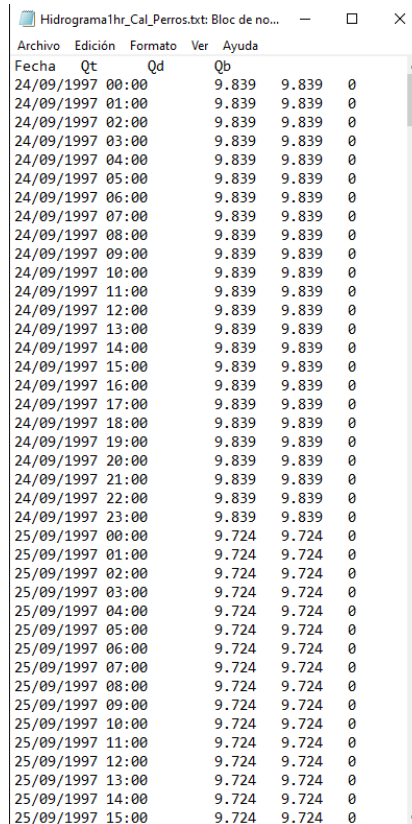


Figura 5.53. Archivo de Precipitación para calibración.

El archivo de escurrimiento se crea de igual forma en formato .txt con nombre **Hidrograma1hr_Cal_Perros.txt**, Figura 5.54.



Fecha	Qt	Qd	Qb
24/09/1997 00:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 01:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 02:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 03:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 04:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 05:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 06:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 07:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 08:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 09:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 10:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 11:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 12:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 13:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 14:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 15:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 16:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 17:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 18:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 19:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 20:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 21:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 22:00		9.839	9.839 0
24/09/1997 23:00		9.839	9.839 0
25/09/1997 00:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 01:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 02:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 03:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 04:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 05:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 06:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 07:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 08:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 09:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 10:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 11:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 12:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 13:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 14:00		9.724	9.724 0
25/09/1997 15:00		9.724	9.724 0

Figura 5.54. Archivo de escurrimiento para calibración.

5.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)

Con los archivos de celdas (**ModClarkCNPerros.txt**), el de precipitación (**Lluvias_1h_Div24.txt**) y el de escurrimiento (**Hidrograma1hr_Cal_Perros.txt**) obtenidos en procesos anteriores, se procede a calibrar el modelo MPE.

Con apoyo en el programa MPE se ingresan los archivos generados anteriormente como se muestra a continuación:

1. De la pestaña de Información se selecciona la opción de “Información Inicial”.

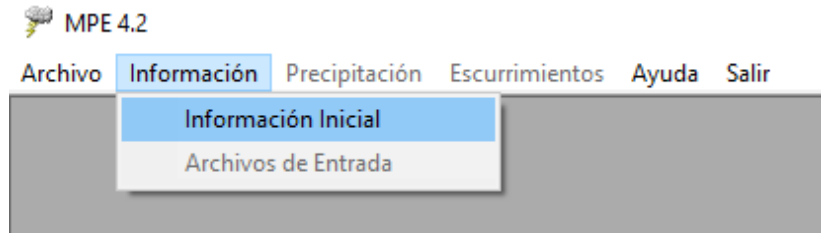
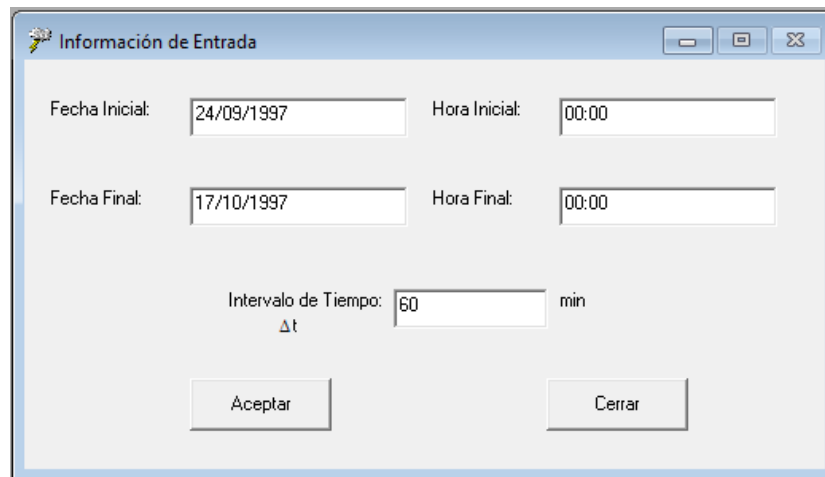


Figura 5.55. Pestaña para el ingreso de la Información.

2. Se ingresa la información de entrada como es la fecha inicial y final* como también la hora y el intervalo de tiempo.

The image shows a dialog box titled 'Información de Entrada'. It contains the following fields:

- Fecha Inicial: 24/09/1997
- Hora Inicial: 00:00
- Fecha Final: 17/10/1997
- Hora Final: 00:00
- Intervalo de Tiempo: 60 min (with a Δt symbol below the input field)

At the bottom, there are two buttons: 'Aceptar' and 'Cerrar'.

Figura 5.56. Ingreso de la información inicial.

* Las fechas seleccionadas (24 de septiembre de 1997 al 17 de octubre de 1997, Figura 5.56) deben coincidir en lluvia como en escurrimiento para la calibración.

3. Se ingresan los archivos de celdas (ModClarkCNPerros.txt) y de lluvias (Lluvias_1hr_Div24.txt).

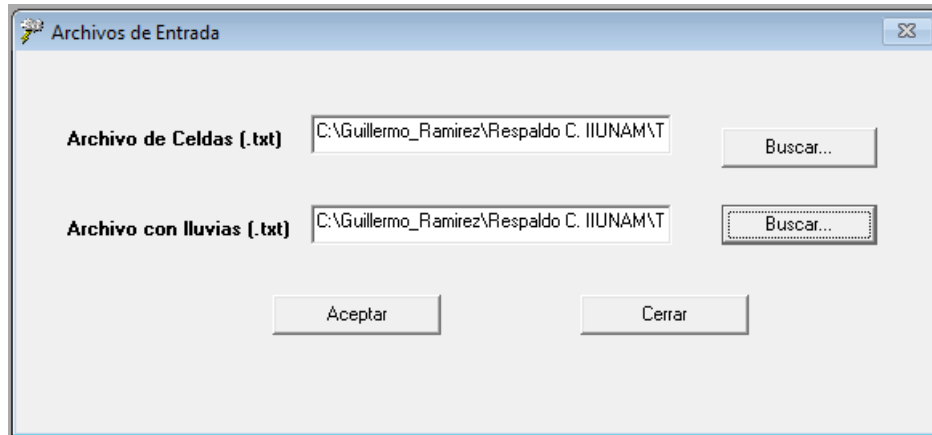


Figura 5.57. Ingreso del archivo de celdas y de lluvia.

4. De la pestaña de Precipitación se selecciona "Precipitación Media".

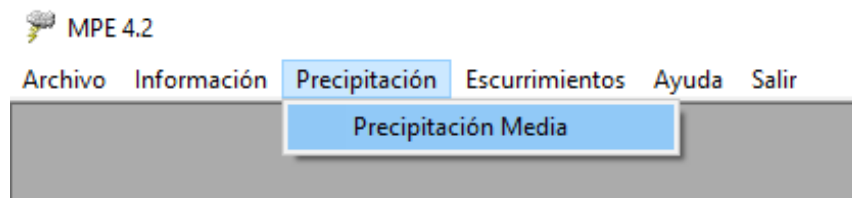


Figura 5.58. Pestaña de precipitación media.

5. Se genera el cálculo de la precipitación media.

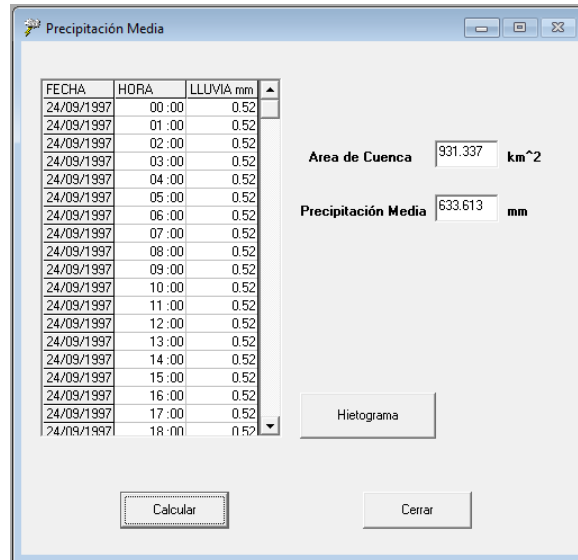


Figura 5.59. Cálculo de la precipitación media.

6. Se obtiene el hietograma.

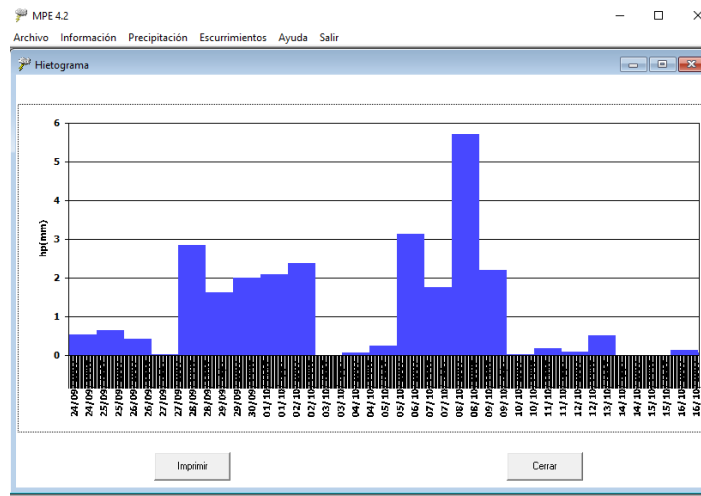


Figura 5.60. Obtención del hietograma.

7. Se ingresa el archivo de escurrimiento (**Hidrograma1hr_Cal_Perros.txt**).

Hora	Q Total (m ³ /s)	Q Directo (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)
00:00	9.839	9.839	0
01:00	9.839	9.839	0
02:00	9.839	9.839	0
03:00	9.839	9.839	0
04:00	9.839	9.839	0
05:00	9.839	9.839	0
06:00	9.839	9.839	0
07:00	9.839	9.839	0
08:00	9.839	9.839	0
09:00	9.839	9.839	0
10:00	9.839	9.839	0
11:00	9.839	9.839	0

Figura 5.61. Ingreso del archivo de escurrimiento.

8. De la pestaña Escorrimentos se selecciona “Hidrograma”.

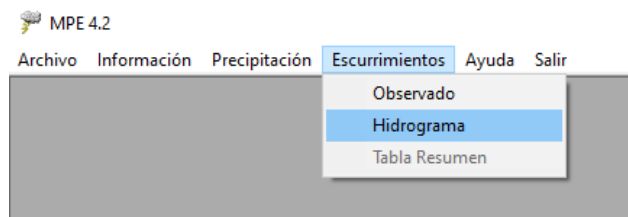


Figura 5.62. Pestaña de Escorrimentos.

Para la cuenca del río de Perros, es importante asegurar que los volúmenes de lluvia que generan el hidrograma sean lo más parecidos entre lo calculado y lo medido, Figura 5.64. De esta calibración se obtuvieron los siguientes parámetros, Figura 5.63.

- **Parámetros de Pérdidas:** Factor de Escala de Pérdida Inicial, Factor de Escala de Retención Potencial y Factor de Olvido.
- **Parámetros de Forma:** Tiempo de Concentración y Coeficiente de Almacenamiento.

PARAMETROS DE CALIBRACIÓN

PARAMETROS DE PERDIDAS

Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)	0.25
Factor de Escala de Retención Potencial	3.5
Factor de olvido	0.99

PARAMETROS DE FORMA

Tiempo de concentración (hr): $T_c > \Delta t$	2.64
Coeficiente de Almacenamiento (hr): $C_a > \Delta t/2$	1.58

ESCURRIMIENTO BASE

Escorrentamiento Constante 10 m³/s

Método de Recesión

Gasto Inicial	0	m ³ /s
Cte de Recesión	0	
Gasto Final	0	m ³ /s

Sin Escorrentamiento Base

Hidrograma Restaurar Cerrar

Figura 5.63. Parámetros de calibración.

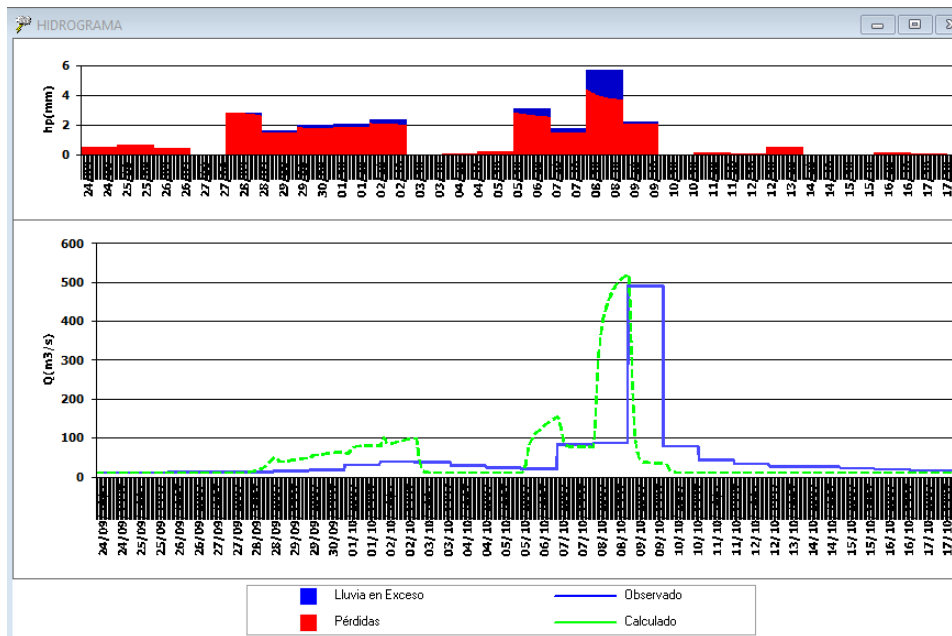


Figura 5.64. Hidrograma observado y calculado.

Se observa que el hidrograma y el hidrograma tienen una forma muy similar y se precede a observar los volúmenes generados, Figura 5.65.

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia		
Area de cuenca	931.337	km ²
Lluvia media	634.702	mm
Pérdidas	549.352	mm
Lluvia en Exceso	85.350	mm

Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	101904.394	100405.679	Mm3
Directo	101904.394	79489.679	Mm3
Base	0.000	20916.000	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	490.373	520.239	m3/s

Figura 5.65. Tabla resumen volumen y caudal calculado/medido.

Al observar que tanto los volúmenes como los gastos son parecidos se tomarán los parámetros de calibración (Figura 5.63) para su posterior cálculo de avenidas.

Los parámetros finales son los siguientes:

Tabla 5.9. Parámetros de Calibración.

PARÁMETROS DE PÉRDIDAS	
Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)	0.25
Factor de Escala de Retención Potencial	3.5
Factor de Olvido	0.99
PARÁMETROS DE FORMA	
Tiempo de Concentración (hr)	2.64
Coficiente de Almacenamiento (hr)	1.58
ESCURRIMIENTO BASE	
Escorrimento Constante (m^3/s)	10

5.5. GENERACIÓN DE TORMENTAS ESTADÍSTICAS

El paso posterior a los parámetros de calibración es obtener las tormentas estadísticas, estas tormentas se generan a partir de los registros de las estaciones y de lluvias puntuales que con apoyo de FRA se convierten en lluvias distribuidas en toda el área de la cuenca (areales).

En el estudio realizado por Sánchez (2017) se desarrollaron FRA para diferentes zonas de la república mexicana estos factores obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 5.10. Factores de Reducción por Área obtenidos por Sánchez (2017).

Clave FRA	Zona	Ecuación	R ²	FRA
1	RH 26	$y = -0.048 \ln(A) + 0.9587$	0.8951	0.631
2	Cuenca Valle de México	$y = -0.052 \ln(A) + 0.9782$	0.9145	0.623
3	RH 30	$y = -0.048 \ln(A) + 0.9755$	0.9104	0.647
4	Durango	$y = -0.045 \ln(A) + 0.9808$	0.9078	0.673
5	Sonora	$y = -0.044 \ln(A) + 1.0282$	0.9434	0.727
6	RH 19	$y = -0.044 \ln(A) + 1.0291$	0.9163	0.728
7	Tamaulipas	$y = -0.037 \ln(A) + 1.0131$	0.9163	0.760
8	Sinaloa	$y = -0.033 \ln(A) + 1.0039$	0.8272	0.778
9	RH 25	$y = -0.033 \ln(A) + 1.0172$	0.9563	0.792
10	Cuenca Río Pánuco	$y = -0.039 \ln(A) + 1.0567$	0.9332	0.790

Al observar que el estudio contempla diferentes Regiones Hidrológicas y estados de la república mexicana se realizará el procedimiento para obtener el FRA para la zona de estudio (Región Hidrológica 22) para poder obtener tormentas estadísticas más precisas. El procedimiento y resultados se muestran a continuación.

5.5.1. FACTOR DE REDUCCIÓN POR ÁREA PARA LA RH 22

METODOLOGÍA FRA

Para obtener Factores de Reducción por Área (FRA) se considera un método empírico de análisis de frecuencias, el cual consiste en relacionar las lluvias máximas anuales en cada estación, sin tomar en cuenta el día en que se presenta cada máximo, con las lluvias simultáneas ocurridas el día en el que el promedio es máximo. Estas áreas están determinadas por círculos que encierren al menos tres estaciones con 15 años de registro en común.

OBTENCIÓN DE DATOS

Los datos de lluvia se obtienen a través de la base de datos CLICOM (*Climate Computing Project*), en la que es posible realizar una depuración de ellos la cual consiste en hacer una revisión de los meses de registro para cada año con los que cuenta cada estación.

La depuración se realiza conforme a la época de lluvia de la zona de estudio (RH 22, meses de junio a octubre, INEGI) y de las lluvias ocasionadas por eventos extremos de invierno (meses de noviembre a febrero). Se verifican en las estaciones climatológicas que cuenten con registros de lluvia para estos meses para la totalidad de años de registro de la estación. En caso de que la estación no cuente con registro de lluvia para estos meses en un año cualquiera, ese año en particular se desecha. De no hacerlo se corre el riesgo de obtener máximos de precipitación anuales menores a la lluvia real lo cual afectaría los resultados en la obtención de FRA.

AGRUPACIÓN POR ÁREAS CIRCULARES O ELÍPTICAS

Este método consiste en agrupar estaciones climatológicas mediante círculos o elipses que contengan como mínimo tres estaciones dentro de su área. Estas estaciones deben tener 15 años de registro en común. Este proceso también puede realizarse mediante polígonos de Thiessen considerando el área de cada polígono y el número de estaciones que queden dentro de la misma; sin embargo, la utilización de círculos permite agrupar de mejor manera las estaciones y hacer muchas combinaciones de ellas.

Tabla 5.11. Estaciones contempladas para la RH 22, estudio CENAPRED.

Estación	Zona
20009	Altiplano
20027	Istmo
20032	Pacifico
20039	Istmo
20043	Istmo
20048	Istmo
20060	Istmo
20082	Istmo
20109	Altiplano
20149	Istmo
20162	Istmo
20173	Istmo
20184	Altiplano
20191	Altiplano
20233	Altiplano
20277	Altiplano
20289	Golfo

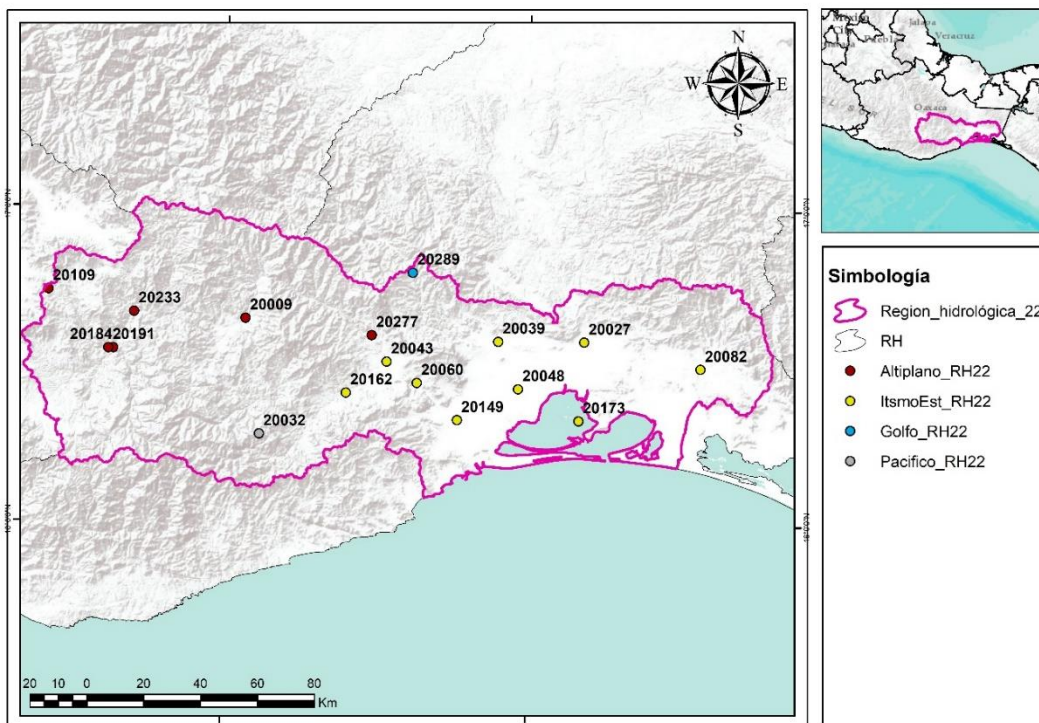


Figura 5.67. Ubicación Geoespacial de las estaciones.

Los registros utilizados fueron depurados incluyendo la temporada de lluvia de los meses de Junio a Octubre y eliminando los años que contaban con errores de medición o un dato atípico.

Se contó con el registro completo del estado de Oaxaca, archivo DLY, y se depuró con la herramienta de Clima Computarizado del Instituto de Ingeniería (CLICOM), depurado como en el estudio del CENAPRED.

Los registros de lluvias diarias máximas anuales que se utilizaron se muestran a continuación.

REGIÓN ISTMO

El registro de las estaciones ubicadas en la región Istmo se muestra en la tabla 5.12.

Tabla 5.12. Registro de las estaciones climatológicas contempladas, Región Istmo.

Año/Est.	20027	20039	20043	20048	20060	20082	20149	20162	20173
1939				55					
1940									
1941							135.5		
1942									
1943							135.3		85.2
1944									216.5
1945							322.2		170
1946				154					140
1947							198		130
1948				90			64.3		85
1949					84	69	63.7		65
1950	145.7			315	146	131.7	127	68.5	198
1951	105	139.7		150	109.2	72.9	283.5	146.7	154
1952	166.5	184		67	129.5	174.7	194.5	80.2	175
1953	119	97		80.1	80.2	92.6	70.2	48.5	180
1954	116.6	91		76	153	280.7	210.8	102.7	105
1955	179	183		151.6		135.5	162.7	113.2	200
1956		73		80	55.2	81	113.5	59.5	54.9
1957	91	105		49	96	71	106	85.2	64.5
1958	112	75.6		74	102.5	142	115.5	72.5	74.5
1959		102.6		138	74	96.5	141.8	73.2	87

CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS DE LA RH 22 USANDO UN MODELO LLUVIA ESCURRIMIENTO DISTRIBUIDO

Año/Est.	20027	20039	20043	20048	20060	20082	20149	20162	20173
1960	184.5	155.8		190	104	159	144	86.5	174.5
1961	112.5	131.2		90	120.2	100	160.7	100.2	112
1962	67.5	97.7	70	135.5	89.4	88	76	48.5	112
1963	133	86.2	73	104.2	70.2	125	94	60	133
1964	60.5	53.2	69	60.7	86.1	76.5	46.5	55.6	69
1965	50	58	45	83	94.2	64	120	34.5	74
1966	76	145.5	87.5	97	70.7	75.7	58.5	41.4	100
1967	60			80.5	74	88	80.5	52	117
1968	52.5	60	56	74.5	85	118.1	131	63.2	80
1969	100.9	158	160		320.5	160	326	191	135
1970	130	116	127	162	238.8	238.5	303	60.5	163
1971	82.5	83.5	122	107	100.1	118.5	104	97	95
1972	69	63.5	71	55.8	52.1		62.5	60.1	83
1973	153.3	188.8	200	208	228.3	263.5	200	129.5	196
1974	147	240	89	224.4	112.2	181.8	124	100.1	214
1975	75	139	85	112.5	121.5	145	186	80.6	132
1976	85.5	81	100.5	108.5	140.5	60	110	64.5	90
1977	56	73.5	73	101.5	120.9	54.8	170	65.5	60
1978	81.5	113	130	122.5	240.7	173.5	103	124.5	177
1979	72	172.5		173.3	120.2	189.5		88.3	132.5
1980	154	80	64	170	60.9	381	101	30	
1981	120	163.8	202	177.5	218.5	241.5	302	239.5	183
1982	120	39	58	45	46.3	88.5	83.5	47.3	115
1983	65	49.6	103.5	83.5		119	93	46.1	74
1984	111	81.3	106	160.5		296.5	126	91.1	77.3
1985		74.4	73			129.5	122		70.1
1986		71	68	60.5		279.5	104	50.6	78.5
1987	60	60.7	60	55.6		61.2		58.7	55
1988	135		118	177.7		238.6	82.5	75.2	127
1989	83.5		103	137.7		108.7		64.5	
1990	72.5	68.4	60	79.5		139.5			
1991								115	
1992									
1993									
1994			38.5			65.9			
1995	157			170.6		164.7			
1996	160	120.1	101			172.4	100.7		
1997	145	169.4		231.8		110.6			
1998	85		58.6	143					

Año/Est.	20027	20039	20043	20048	20060	20082	20149	20162	20173
1999	217	222	158	251.3			379		
2000	112	77.2	78						
2001	113	84.6	130	128.2				95.6	
2002	130.5	73.6	110	107.8				61.5	
2003		105.5	88.5	122.5					
2004	60	71.6	90	81.4					
2005	80	69.2	152	164.2		91.6		99.4	
2006	75	106.5	52	60		84.1		36.8	
2007	136	159.8	74	96		130.4		67.6	
2008	150	282	206	146.6		152.6		209.7	
2009	105	61.4	58.5	79.2		60.9	63	60.8	
2010	191.5	199.5	88	212.8		309	87.5	73	
2011	183.5	117.5	94	115.6		159.5	183.5	85.9	
2012							131.5		
2013	117	80.6	163.5	197.9		228.5		45.4	
2014				57					
2015									

REGIÓN PACÍFICO

El registro de la estación ubicada en la región Pacífico se muestra en la tabla 5.13.

Tabla 5.13. Registro de la estación climatológica contemplada, Región Pacífico.

Año/Est.	20032
1962	50.5
1963	70
1964	83
1965	53
1966	52
1967	85
1968	60
1969	237
1970	88
1971	85
1972	63.5

Año/Est.	20032
1973	143
1974	93.5
1975	77
1976	101
1977	49.5
1978	94
1979	
1980	66
1981	228
1982	52.5
1983	59.5
1984	
1985	
1986	117.5
1987	68.3
1988	78.5
1989	150.5
1990	
1991	
1992	
1993	
1994	
1995	
1996	
1997	
1998	
1999	
2000	
2001	40
2002	
2003	
2004	
2005	
2006	
2007	50
2008	190
2009	47
2010	79
2011	46

Año/Est.	20032
2012	
2013	160
2014	
2015	

REGIÓN ALTIPLANO

El registro de las estaciones ubicadas en la región Altiplano se muestra en la tabla 5.14.

Tabla 5.14. Registro de las estaciones climatológicas contempladas, Región Altiplano.

Año/Est.	20009	20109	20184	20191	20233	20277
1946	58.5					
1947	36.3					
1948		68				
1949	50.6	61				
1950	52.5	40				
1951	57.5	47				
1952	50.2	43				
1953	37.2	30				
1954	69.5					
1955	52.5					
1956	41.3					
1957	35.5	38				
1958	40.3	55				
1959	39.2	64				
1960	43	116				
1961	21		89			
1962	30.6					
1963	33.5		67			
1964	22.5		72	55		
1965		39	63	74		
1966			66	49.6		
1967	45.4		42	38.2		
1968	29.6		42			
1969	57.8	50	59	85		

Año/Est.	20009	20109	20184	20191	20233	20277
1970	38.6	66	42	46		
1971	38.5	71	27.2	22		
1972	20.3	64	48.5	30		
1973	53.6	53	62	35		
1974	38	48		61.5		
1975	43.4		80	71	32.5	
1976	57.8	58.5	27	60	19	
1977	26.4	60	31	32	50	90
1978	70.1		70	90	40	148
1979	57	91	50			
1980	73	70	70		65	69.1
1981	55	67		43.5	44	134.5
1982	55.8	37	60	50	56	45.1
1983	64	27		55	62	107.8
1984	69.5		54	48	22	77.8
1985		24				59
1986	81.4		35	85	40	97
1987	50	16	60	37.5	52	55
1988	70.4	29.8	35			93.4
1989	68		111			61.2
1990	53		30	38	32	65
1991			60	45		80
1992			80		80	83
1993						165
1994		32		45		58.3
1995	55.8		40	18	50	135
1996	46				58	84
1997	74		65		42	153
1998	44		80		58	82
1999	43.2					147
2000					38	85
2001	48		55		54	80
2002	80		34		53.5	80
2003	54		85		40	62
2004	50		70		34	64
2005	42		110		38	103
2006	58		82	36	23	
2007	48.8		50	34	52	
2008	68		60	47	46	
2009	51.7		55	55		55.9

Año/Est.	20009	20109	20184	20191	20233	20277
2010	75		68	91	53	75
2011	54.2		76		49	80.5
2012					38	
2013	63			43	42	111
2014						
2015						

REGIÓN GOLFO

El registro de la estación ubicada en la región Golfo se muestra en la tabla 5.15.

Tabla 5.15. Registro de la estación climatológica contemplada, Región Golfo.

Año/Est.	20289
1978	260
1979	84.5
1980	75
1981	114
1982	
1983	
1984	87
1985	
1986	70
1987	129
1988	
1989	
1990	
1991	
1992	
1993	127
1994	
1995	80.2
1996	145
1997	111
1998	120
1999	
2000	69.5

Año/Est.	20289
2001	
2002	
2003	190
2004	269.5
2005	152
2006	237
2007	143
2008	105
2009	93
2010	
2011	
2012	
2013	180
2014	-
2015	

ANÁLISIS DE SIMULTANEIDAD

Para realizar el análisis de simultaneidad, se crearon elipses que abarcarán en principio mínimo 3 estaciones climatológicas y ampliando poco a poco el área de influencia. Para este proceso se apoyó en el estudio de “Actualización de los FRA para distintas regiones de la República Mexicana” (Sánchez, 2017). Este estudio marca los pasos a seguir para obtener los factores.

PROCEDIMIENTO

El procedimiento para la obtención de los FRA y sus correspondientes funciones de correlación a distintos periodos de retorno consta de los siguientes pasos.

1. Se trazan círculos o elipses que contengan al menos tres estaciones con 15 años de registro en común.
2. Se obtienen los promedios de los registros de lluvia máxima anual simultánea y no simultánea para cada año de registro en común de las estaciones contenidas en el área del círculo.
3. Se realiza el cociente entre promedios simultáneos y promedios no simultáneos, con esto se obtiene un FRA para cada año analizado (mínimo 15 años).
4. Se obtiene la media de los FRA obtenidos en el paso anterior, este será el FRA medio para las estaciones seleccionadas en función del área del círculo o elipse que las contiene.
5. Se realiza un ajuste de probabilidad tanto a los datos de lluvia máxima anual simultánea y no simultánea. Con esto, se obtienen FRA extrapolados a distintos periodos de retorno para cada serie de datos. Se realiza el cociente de máximos simultáneos entre sus correspondientes valores extrapolados de máximos simultáneos con la finalidad de obtener los FRA a distintos periodos de retorno.
6. En toda el área de estudio se trazan más círculos de distintas áreas y estaciones.
7. A los nuevos círculos se les aplican los pasos 2, 3, 4 y 5.
8. Se obtiene una ecuación que correlacione los FRA medios y los FRA extrapolados en función de las áreas obtenidas en los pasos anteriores.

Con este procedimiento se aplicó a la Región Hidrológica 22.

Se ingresó el **DLY** que es el archivo que contiene el registro climatológico, perteneciente al estado de Oaxaca y se inició la depuración de las estaciones que abarcan la primera elipse y posteriormente la segunda, Figura 5.68. (Se aplica el paso 1 del procedimiento).

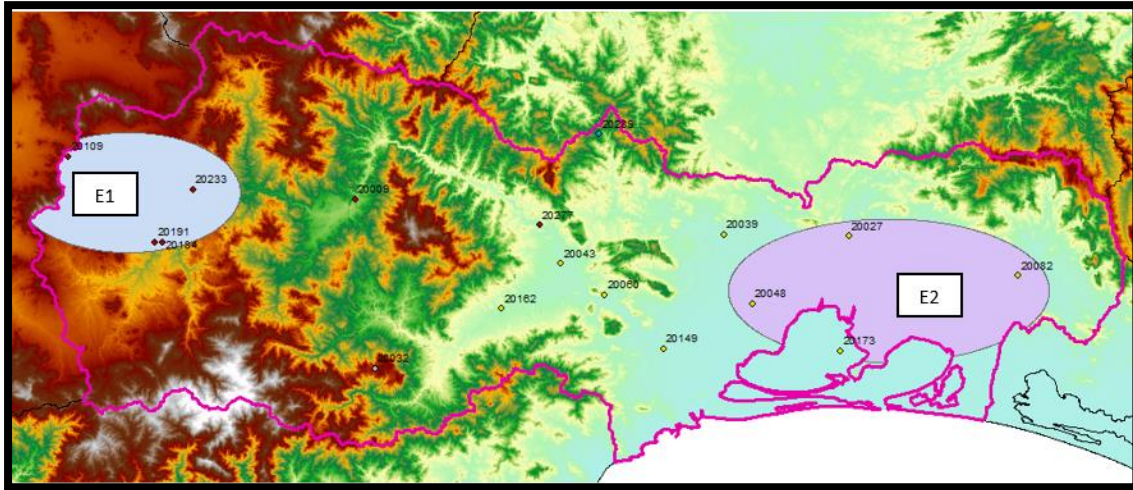


Figura 5.68. Elipses 1 y 2 para la RH 22.

Con ayuda del CLICOM del Instituto de Ingeniería se obtienen los análisis de máximos, los estandarizados y el análisis de simultaneidad. El último análisis es el que ocuparemos para la obtención de los FRA (Análisis de simultaneidad, Figura 5.70). Las depuraciones se realizan para cada elipse hasta llegar a abarcar la región completa (Figura 5.73).



Figura 5.69. Procesamiento de máximos para las elipses, CLICOM Instituto de Ingeniería.



Figura 5.70. Obtención de Simultaneidad para las elipses, CLICOM Instituto de Ingeniería.

Se realiza nuevamente la delimitación por elipses, creando elipses hasta abarcar la RH completa, Figura 5.71.

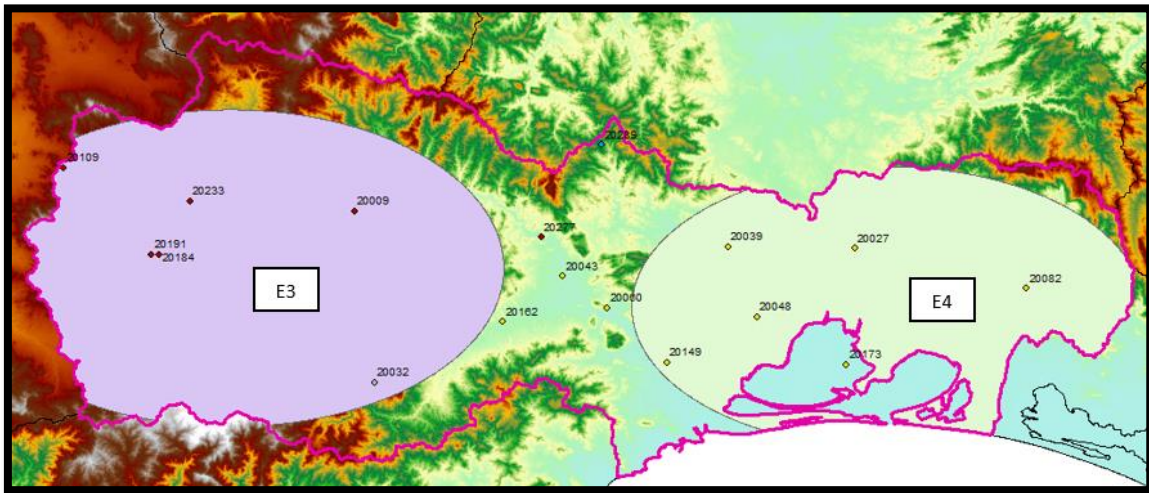


Figura 5.71. Elipses 3 y 4 para la RH 22.

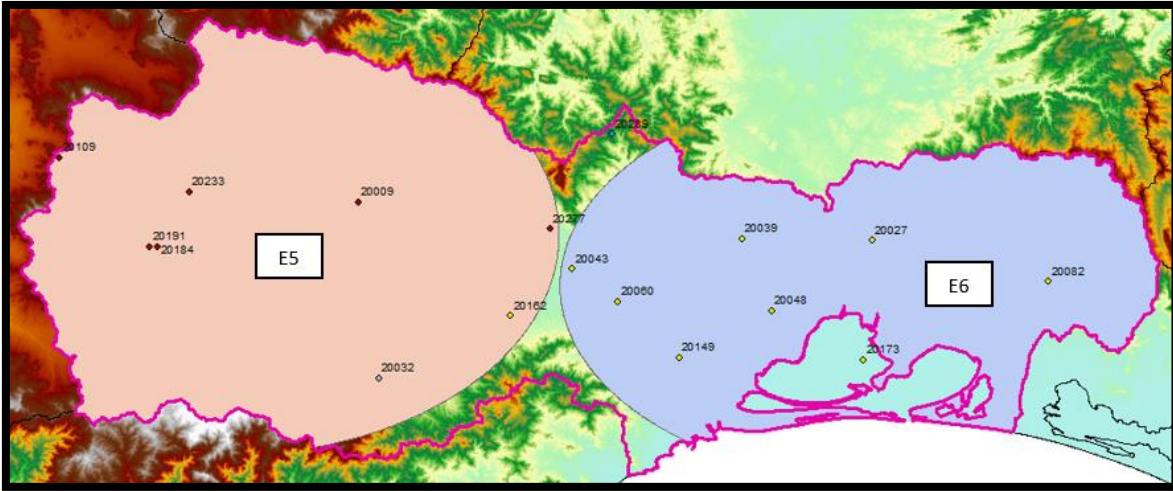


Figura 5.72. Elipses 5 y 6 para la RH 22.

Para la Región Hidrológica completa se contemplan el total de estaciones dentro de la zona, Figura 5.73.

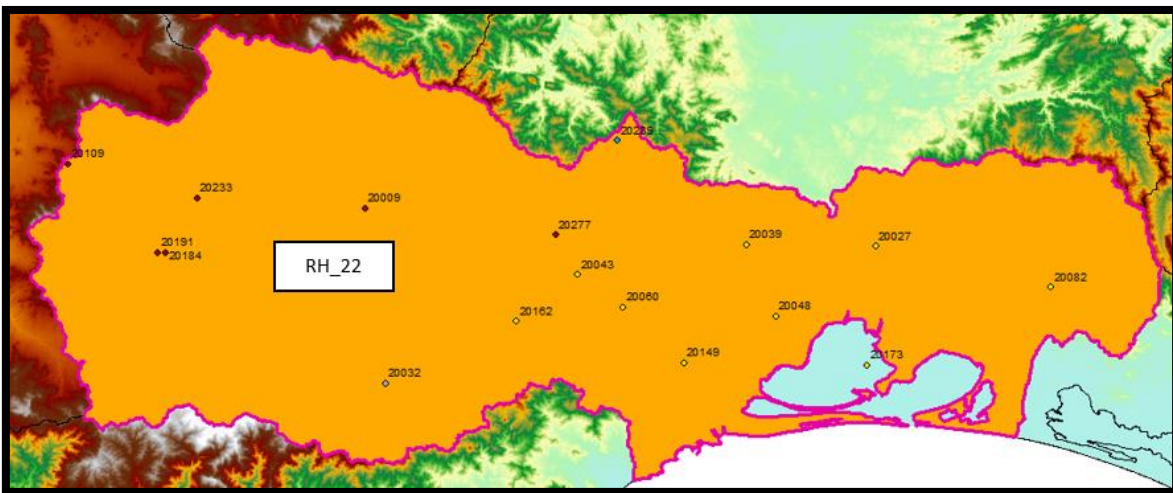


Figura 5.73. Región Hidrológica 22 completa.

Se obtienen los análisis de estandarizados, máximos y simultaneidad de la región completa realizando los análisis de simultaneidad y obtención del FRA como se explica a continuación.

Al terminar el proceso se obtiene el análisis de simultaneidad, como manera de ejemplo se muestra en la Tabla 5.17 el cálculo del FRA para un registro de 5 años de registro en común de las estaciones 20009, 20032, 20184, 20191 y 20233.

En el año de 2004 las lluvias diarias máximas en las estaciones fueron:

Tabla 5.16. Lluvia máxima diaria

ESTACION	AÑO	MES	DIA	MAXIMO
20009	2004	06	04	50
20032	2004	06	21	39.1
20184	2004	08	23	70
20191	2004	06	04	20
20233	2004	03	28	34

Se aplica el paso 3 del “procedimiento”, para cada año de registro simultáneo se obtiene un FRA dividiendo el promedio de lluvia máxima diaria de las estaciones contempladas entre el promedio de las lluvias máximas diarias simultaneas, ecuación (13).

Para cada día del año se calculó el promedio diario de lluvias registradas en las 5 estaciones encontrándose que el máximo de los promedios para el año de 2004 es de 23.20 mm. El FRA para este año se encuentra dividiendo el promedio simultáneo (23.20) entre el promedio del máximo anual (42.62), que resulta 0.54. Tabla 5.17.

Tabla 5.17. Ejemplo de máximos diarios simultáneos y no simultáneos, FRA para cada año de registro en común (elipse 3).

AÑO	ESTACION	NO. ESTACIONES	MAXIMO_ANUAL	PROMEDIO S/Sim	FRA
2004	20009		50		
2004	20032		39.1		
2004	20184		70		
2004	20191		20		
2004	20233		34		
2004	PROMEDIO	5	23.20	42.62	0.54
2005	20009		42		
2005	20032		37.8		
2005	20184		110		
2005	20191		22		
2005	20233		38		
2005	PROMEDIO	5	45	49.96	0.90
2006	20009		58		
2006	20032		55.5		
2006	20184		82		
2006	20191		36		
2006	20233		23		
2006	PROMEDIO	5	28.33	50.90	0.56
2007	20009		48.8		
2007	20032		50		
2007	20184		50		
2007	20191		34		
2007	20233		52		
2007	PROMEDIO	5	37	46.96	0.79
2008	20009		68		
2008	20032		190		
2008	20184		60		
2008	20191		47		
2008	20233		46		
2008	PROMEDIO	5	60.40	82.20	0.73

Se aplica el paso 4, para cada elipse marcada se obtiene un FRA promedio con las estaciones seleccionadas, como manera de ejemplo se muestra la siguiente tabla que pertenece a la elipse número 3.

Tabla 5.18. Análisis de Simultaneidad y obtención del FRA para la elipse 3.

Año	Estaciones	Simultáneos	No Simultáneos	FRA
1961	4	38.30	66.25	0.58
1962	4	53.53	57.28	0.93
1963	5	69.25	77.10	0.90
1964	5	33.18	60.90	0.54
1965	5	21.72	48.64	0.45
1966	5	33.66	54.96	0.61
1967	5	46.32	50.72	0.91
1968	5	22.70	43.22	0.53
1969	5	62.74	97.76	0.64
1970	5	34.80	56.12	0.62
1971	5	31.68	48.74	0.65
1972	5	29.36	45.26	0.65
1973	5	42.60	69.32	0.61
1974	6	44.35	51.33	0.86
1975	6	34.55	57.48	0.60
1976	6	28.35	53.88	0.53
1977	6	22.10	41.48	0.53
1978	6	40.35	66.52	0.61
1979	6	66.00	74.17	0.89
1980	6	25.67	64.67	0.40
1981	6	70.17	85.75	0.82
1982	6	21.07	51.88	0.41
1983	6	26.22	54.58	0.48
1984	6	31.67	56.08	0.56
1985	6	32.08	50.93	0.63
1986	6	50.38	63.15	0.80
1987	6	25.33	47.30	0.54
1988	6	38.32	55.28	0.69
1989	6	61.90	66.08	0.94
1990	5	13.00	40.65	0.32
1991	6	36.55	56.50	0.65
1992	5	30.80	59.40	0.52
1993	5	36.18	36.10	1.00

Año	Estaciones	Simultáneos	No Simultáneos	FRA
1994	5	18.50	43.60	0.42
1995	5	18.60	35.76	0.52
1996	6	24.75	42.23	0.59
1997	3	54.67	60.33	0.91
1998	4	30.75	49.25	0.62
2000	5	26.88	33.82	0.79
2001	5	21.96	41.80	0.53
2002	5	18.70	42.30	0.44
2003	5	40.06	47.30	0.84
2004	5	23.20	42.62	0.54
2005	5	45.00	49.96	0.90
2006	5	28.33	50.90	0.56
2007	5	37.00	46.96	0.79
2008	5	60.40	82.20	0.73
2009	4	34.13	52.18	0.65
2010	5	48.24	73.20	0.66
2011	5	23.94	45.04	0.53
2013	5	69.40	64.60	0.92
2014	4	29.78	45.35	0.66

Años	52
-------------	-----------

Promedio FRA	0.65
---------------------	-------------

Al realizar este procedimiento para cada elipse (se obtuvieron 6 elipses más la región completa) se obtiene un ordenamiento final incluyendo el área de cada una hasta abarcar la región completa, Tabla 5.19.

Tabla 5.19. Áreas de cada Elipse para la RH 22.

Área i	m ²	Km ²	FRA
Área 0	0	0.01	1
Área 1	1086386927	1086.39	0.66
Área 2	1857619996	1857.62	0.77
Área 3	6710042909	6710.04	0.65
Área 4	4814840566	4814.84	0.74
Área 5	8775697528	8775.70	0.66
Área 6	6492810961	6492.81	0.72
RH_22	1.6309E+10	16308.91	0.65

Se procede a graficar y a obtener una ecuación de correlación del FRA promedio para la región hidrológica 22, Figura 5.74.

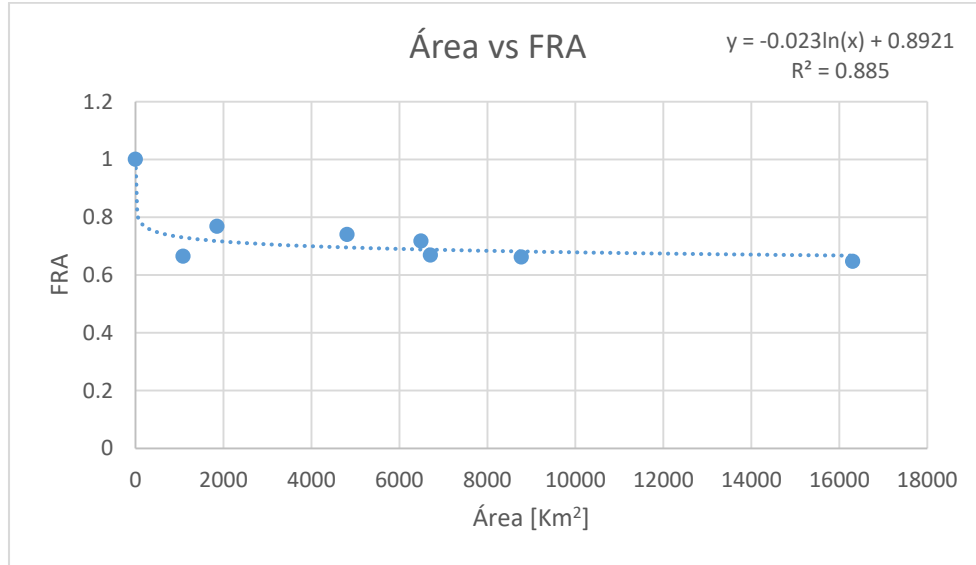


Figura 5.74. Ecuación de ajuste Área vs FRA, RH 22.

La variable dependiente X queda sustituida en términos de área y la ecuación de ajuste será la siguiente.

$$FRA (RH22) = -0.023 \ln(A) + 0.8921 \quad (72)$$

Para obtener FRA a diferentes periodos de retorno (paso 5), es necesario realizar el ajuste con la función de distribución de probabilidad, donde la zona de la región hidrológica 22 se realizan los ajustes Gumbel y Doble Gumbel, verificando los ajustes correspondientes, Figuras 5.75 y 5.76.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	4.027	-----	4.027	-----
Lognormal	2.418	2.498	2.379	2.526
Gumbel	2.397	-----	2.730	-----
Exponencial	3.293	-----	18.598	-----
Gamma	2.398	2.363	2.735	2.188
Doble Gumbel	1.671			

Mínimo error estándar: 1.671
Calculado por la función: Doble Gumbel

Figura 5.75. Error estándar de ajuste para elipse 3, registro simultáneo.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	3.659	-----	3.659	-----
Lognormal	2.212	1.785	2.587	27.355
Gumbel	1.714	-----	2.032	-----
Exponencial	2.319	-----	36.162	-----
Gamma	2.659	1.728	2.857	1.930
Doble Gumbel	1.978			

Mínimo error estándar: 1.714
Calculado por la función: Gumbel (momentos)

Figura 5.76. Error estándar de ajuste para elipse 3, registro no simultáneo.

Al realizar el proceso de extrapolación de los registros simultáneos y no simultáneos con la función de distribución Gumbel se obtienen los siguientes valores, Tabla 5.20.

Tabla 5.20. Valores de lluvia extrapolados a diferentes periodos de retorno para registros simultáneos y no simultáneos, ajuste Gumbel.

Simultáneos Gumbel							
Tr	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	RH_22
Años	1	2	3	4	5	6	Completa
2	29.06	86.2	34.51	84.21	38.77	78.62	57.19
5	37.01	121.84	47.9	118.83	55.05	109.53	82.06
10	42.27	145.44	56.76	141.75	65.83	130	98.52
20	47.32	168.08	65.27	163.74	76.16	149.63	114.32
50	53.85	197.38	76.27	192.2	89.54	175.04	134.76
100	58.75	219.34	84.52	213.53	99.57	194.08	150.08
200	63.63	241.22	92.73	234.78	109.56	213.06	165.34
500	70.06	270.08	103.57	262.81	122.74	238.09	185.48
1000	74.93	291.89	111.77	284	132.7	257	200.7
2000	79.79	313.7	119.96	305.18	142.65	275.92	215.92
5000	86.21	342.52	130.78	333.17	155.81	300.91	236.03
10000	91.08	364.32	138.97	354.34	165.77	319.81	251.24

No Simultáneos Gumbel							
Tr	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	RH_22
Años	1	2	3	4	5	6	Completa
2	45.37	111.65	52.52	113.91	59	109.99	87.78
5	53.24	150.41	64.18	150.82	72.98	146.7	113.67
10	58.45	176.06	71.9	175.26	82.24	171	130.81
20	63.46	200.68	79.31	198.7	91.11	194.32	147.25
50	69.93	232.53	88.89	229.04	102.61	224.49	168.53
100	74.78	256.41	96.08	251.77	111.22	247.11	184.48
200	79.61	280.19	103.23	274.42	119.8	269.64	200.37
500	85.99	311.57	112.68	304.31	131.12	299.37	221.33
1000	90.81	335.29	119.81	326.9	139.68	321.83	237.18
2000	95.62	359	126.95	349.47	148.23	344.29	253.02
5000	101.99	390.33	136.37	379.32	159.54	373.97	273.95
10000	106.8	414.03	143.51	401.89	168.09	396.42	289.78

Para obtener el FRA se dividen los valores obtenidos a diferentes periodos de retorno de los simultáneos y los no simultáneos de cada elipse y la región completa.

De manera de ejemplo se muestra la obtención del FRA para la región completa a un Tr de 2 años, utilizando la ecuación (13).

$$FRA_{Tr2años} = \frac{57.19}{87.78} = 0.65$$

En la tabla 5.21, se presentan los valores del Factor de Reducción por Área para cada periodo de retorno con ajuste Gumbel.

Tabla 5.21. FRA por periodo de retorno, ajuste Gumbel.

FRA							
Tr	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	RH_22
Años	1	2	3	4	5	6	Completa
2	0.64	0.77	0.66	0.74	0.66	0.71	0.65
5	0.70	0.81	0.75	0.79	0.75	0.75	0.72
10	0.72	0.83	0.79	0.81	0.80	0.76	0.75
20	0.75	0.84	0.82	0.82	0.84	0.77	0.78
50	0.77	0.85	0.86	0.84	0.87	0.78	0.80
100	0.79	0.86	0.88	0.85	0.90	0.79	0.81
200	0.80	0.86	0.90	0.86	0.91	0.79	0.83
500	0.81	0.87	0.92	0.86	0.94	0.80	0.84
1000	0.83	0.87	0.93	0.87	0.95	0.80	0.85
2000	0.83	0.87	0.94	0.87	0.96	0.80	0.85
5000	0.85	0.88	0.96	0.88	0.98	0.80	0.86
10000	0.85	0.88	0.97	0.88	0.99	0.81	0.87

Para cada área y cada periodo de retorno para el ajuste Gumbel se observa en la Tabla 5.22 y Figura 5.77.

Tabla 5.22. FRA para cada área y periodo de retorno, ajuste Gumbel.

Elipse	Gumbel												Area	
	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 20	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 500	Tr = 1000	Tr = 2000	Tr = 5000	Tr = 10000		
E0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.01
E1	0.64	0.70	0.72	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.83	0.83	0.85	0.85	0.85	1086.39
E2	0.77	0.81	0.83	0.84	0.85	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	1857.62
E3	0.66	0.75	0.79	0.82	0.86	0.88	0.90	0.92	0.93	0.94	0.96	0.96	0.97	6710.04
E4	0.74	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	4814.84
E5	0.66	0.75	0.80	0.84	0.87	0.90	0.91	0.94	0.95	0.96	0.98	0.99	0.99	8775.70
E6	0.71	0.75	0.76	0.77	0.78	0.79	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81	0.81	6492.81
RH_22	0.65	0.72	0.75	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	0.87	16308.91

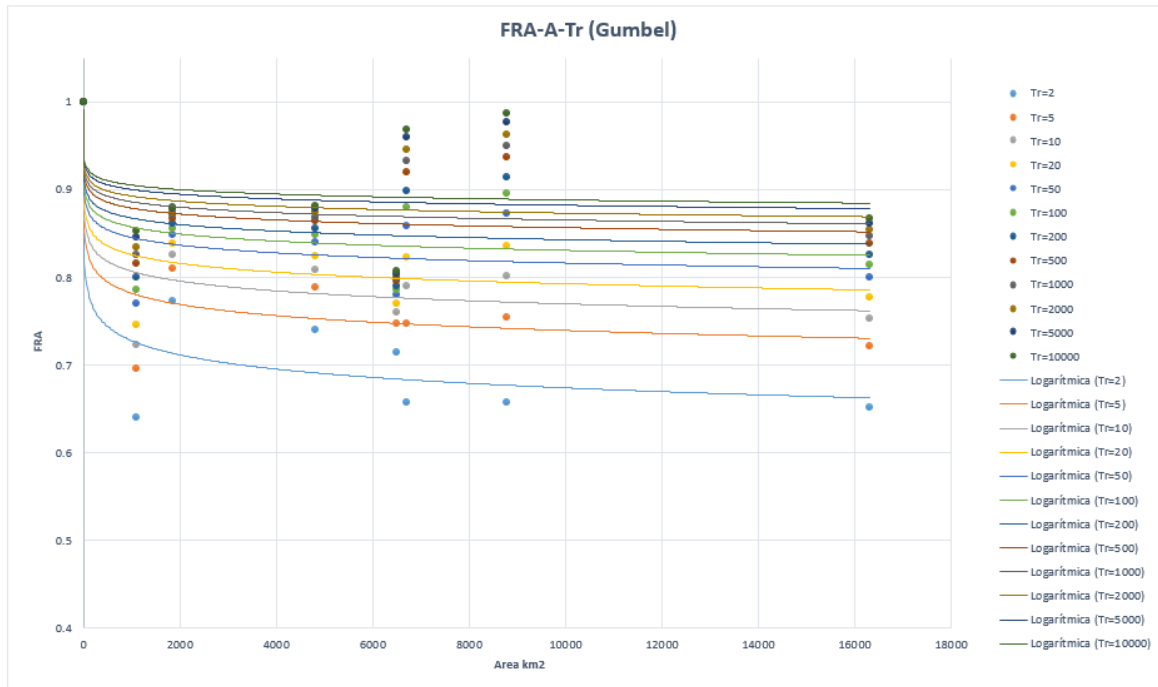


Figura 5.77. Ajuste Gumbel para FRA-A-Tr.

Con el mismo procedimiento se obtienen las extrapolaciones de registros simultáneos y no simultáneos para el ajuste doble gumbel (Tabla 5.23) y se obtienen los FRA para cada periodo de retorno (Tabla 5.24).

Tabla 5.23. Valores de lluvia extrapolados a diferentes periodos de retorno para registros simultáneos y no simultáneos, ajuste Doble Gumbel.

Simultáneos Doble Gumbel							
Tr	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	RH_22
Años	1	2	3	4	5	6	Completa
2	27.56	85.01	33.36	87.56	36.54	77.67	54.67
5	38.56	129.28	49.05	125.12	57.17	112.29	89.74
10	46.22	161.14	64.16	145.33	69.59	142.12	108.25
20	52.39	167.16	69.16	163.9	81.14	158.45	118.03
50	59.79	180.77	74.43	187.48	95.89	175.03	129.34
100	65.17	200.05	78.48	205	106.87	188.13	137.7
200	70.47	220.08	82.91	222.44	117.78	202.54	146.17
500	77.44	246.51	89.65	245.32	132.17	223.52	157.75
1000	82.68	266.5	95.47	262.69	143.09	240.3	166.94
2000	87.95	286.66	101.75	280.06	153.87	257.45	176.57
5000	94.82	312.61	110.35	302.67	168.37	280.83	189.79
10000	99.89	333.65	117.37	319.9	179.15	297.73	200.99

No Simultáneos Doble Gumbel							
Tr	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	RH_22
Años	1	2	3	4	5	6	Completa
2	47.49	109.47	51.58	108.42	57.75	108.2	84.3
5	54.77	172.24	63.67	164.66	68.73	153.41	121.77
10	59.36	186.96	74.48	182.24	79.85	177.32	141.21
20	63.72	197	84.84	197.19	110.4	199.08	151.49
50	69.36	210.52	95.82	215.67	112.39	226.59	163.28
100	73.61	222.5	103.3	229.25	113.55	247	171.87
200	77.87	237	110.49	242.68	114.67	267.25	180.44
500	83.54	259.87	119.82	260.32	116.17	293.96	191.97
1000	87.85	278.64	126.83	273.72	117.43	314.04	200.84
2000	92.14	298.02	133.78	287.12	118.91	334.12	209.97
5000	97.9	323.55	143.01	304.29	122	360.79	222.37
10000	102.5	342.05	150.35	317.69	126.69	380.24	232.1

Tabla 5.24. FRA por periodo de retorno, ajuste Doble Gumbel.

FRA							
Tr	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	Elipse	RH_22
Años	1	2	3	4	5	6	Completa
2	0.58	0.78	0.65	0.81	0.63	0.72	0.65
5	0.70	0.75	0.77	0.76	0.83	0.73	0.74
10	0.78	0.86	0.86	0.80	0.87	0.80	0.77
20	0.82	0.85	0.82	0.83	0.73	0.80	0.78
50	0.86	0.86	0.78	0.87	0.85	0.77	0.79
100	0.89	0.90	0.76	0.89	0.94	0.76	0.80
200	0.90	0.93	0.75	0.92	1.03	0.76	0.81
500	0.93	0.95	0.75	0.94	1.14	0.76	0.82
1000	0.94	0.96	0.75	0.96	1.22	0.77	0.83
2000	0.95	0.96	0.76	0.98	1.29	0.77	0.84
5000	0.97	0.97	0.77	0.99	1.38	0.78	0.85
10000	0.97	0.98	0.78	1.01	1.41	0.78	0.87

Para cada área y cada periodo de retorno para el ajuste Doble Gumbel se observa en la Tabla 5.25 y Figura 5.78.

Tabla 5.25. FRA para cada área y periodo de retorno, ajuste Doble Gumbel.

Doble Gumbel													
Elipse	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 20	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 500	Tr = 1000	Tr = 2000	Tr = 5000	Tr = 10000	Area
E0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.01
E1	0.58	0.70	0.78	0.82	0.86	0.89	0.90	0.93	0.94	0.95	0.97	0.97	1086.39
E2	0.78	0.75	0.86	0.85	0.86	0.90	0.93	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	1857.62
E3	0.65	0.77	0.86	0.82	0.78	0.76	0.75	0.75	0.75	0.76	0.77	0.78	6710.04
E4	0.81	0.76	0.80	0.83	0.87	0.89	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	1.01	4814.84
E5	0.63	0.83	0.87	0.73	0.85	0.94	1.03	1.14	1.22	1.29	1.38	1.41	8775.70
E6	0.72	0.73	0.80	0.80	0.77	0.76	0.76	0.76	0.77	0.77	0.78	0.78	6492.81
RH_22	0.65	0.74	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.87	16308.91

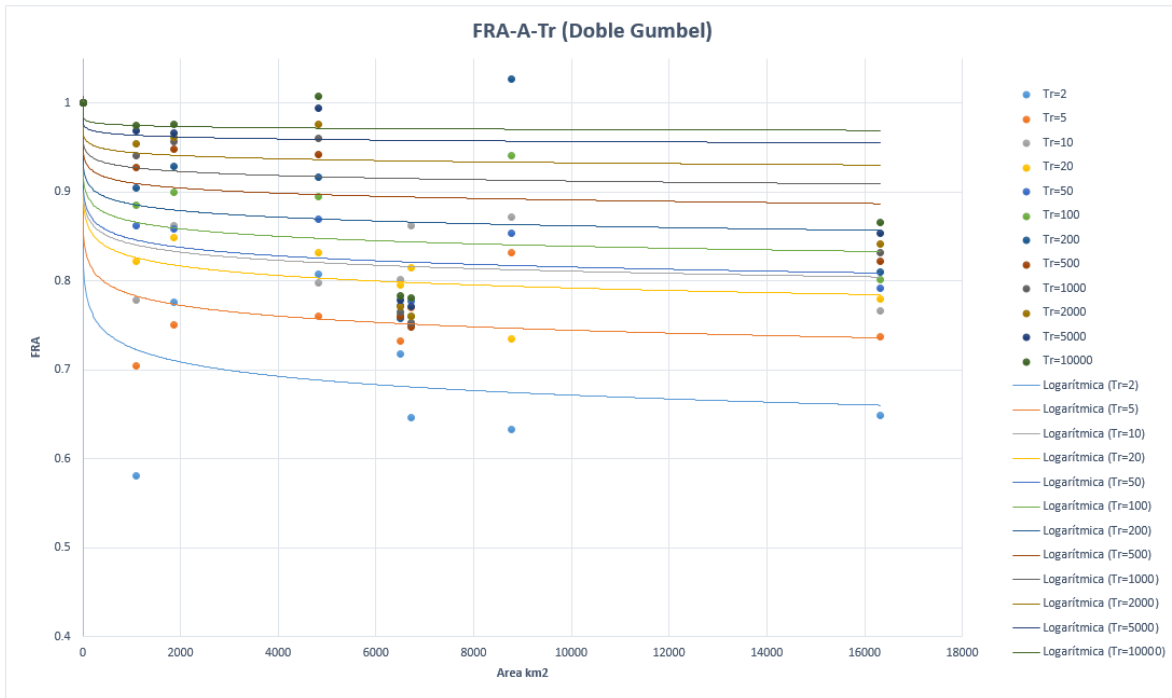


Figura 5.78. Ajuste Doble Gumbel para FRA-A-Tr.

ECUACIONES FRA PARA CADA PERIODO DE RETORNO, AJUSTES GUMBEL Y DOBLE GUMBEL

Las ecuaciones del FRA para cada periodo de retorno se muestran a continuación, en donde la variable independiente x se puede expresar en términos de área en km^2 para una cuenca en específico, los ajustes son Gumbel y Doble Gumbel.

Ajuste Gumbel

Tabla 5.26. Ecuación del FRA para cada periodo de retorno, ajuste Gumbel.

Tr [Años]	Ecuación	R ²
2	$y = -0.023 \ln(x) + 0.8889$	0.8475
5	$y = -0.018 \ln(x) + 0.9087$	0.8357
10	$y = -0.016 \ln(x) + 0.918$	0.8048
20	$y = -0.014 \ln(x) + 0.9252$	0.7557
50	$y = -0.013 \ln(x) + 0.9326$	0.6717
100	$y = -0.012 \ln(x) + 0.9372$	0.6011
200	$y = -0.011 \ln(x) + 0.9411$	0.5307
500	$y = -0.01 \ln(x) + 0.9455$	0.4441
1000	$y = -0.009 \ln(x) + 0.9484$	0.3861
2000	$y = -0.008 \ln(x) + 0.9509$	0.3355
5000	$y = -0.008 \ln(x) + 0.9538$	0.2789
10000	$y = -0.007 \ln(x) + 0.9558$	0.2434

Y: Variable dependiente.

X: Variable independiente, que se puede expresar en términos de área (km²).

Ajuste Doble Gumbel

Tabla 5.27. Ecuación del FRA para cada periodo de retorno, ajuste Doble Gumbel.

Tr [Años]	Ecuación	R ²
2	$y = -0.023 \ln(x) + 0.8849$	0.6577
5	$y = -0.017 \ln(x) + 0.905$	0.7582
10	$y = -0.013 \ln(x) + 0.9337$	0.6902
20	$y = -0.015 \ln(x) + 0.9337$	0.8683
50	$y = -0.014 \ln(x) + 0.9421$	0.7746
100	$y = -0.012 \ln(x) + 0.9513$	0.4415
200	$y = -0.011 \ln(x) + 0.9593$	0.2263
500	$y = -0.008 \ln(x) + 0.9681$	0.0914
1000	$y = -0.007 \ln(x) + 0.9739$	0.0439
2000	$y = -0.005 \ln(x) + 0.9794$	0.0197
5000	$y = -0.003 \ln(x) + 0.9854$	0.0058
10000	$y = -0.002 \ln(x) + 0.9891$	0.0023

Y: Variable dependiente.

X: Variable independiente, que se puede expresar en términos de área (km²).

5.5.2. DISTRIBUCIÓN DE AJUSTE PARA LA REGIÓN DEL ISTMO

Para la zona del Istmo, conforme a los registros de las estaciones ocupadas para ello, la mejor distribución es la Gumbel, Figura 5.79.

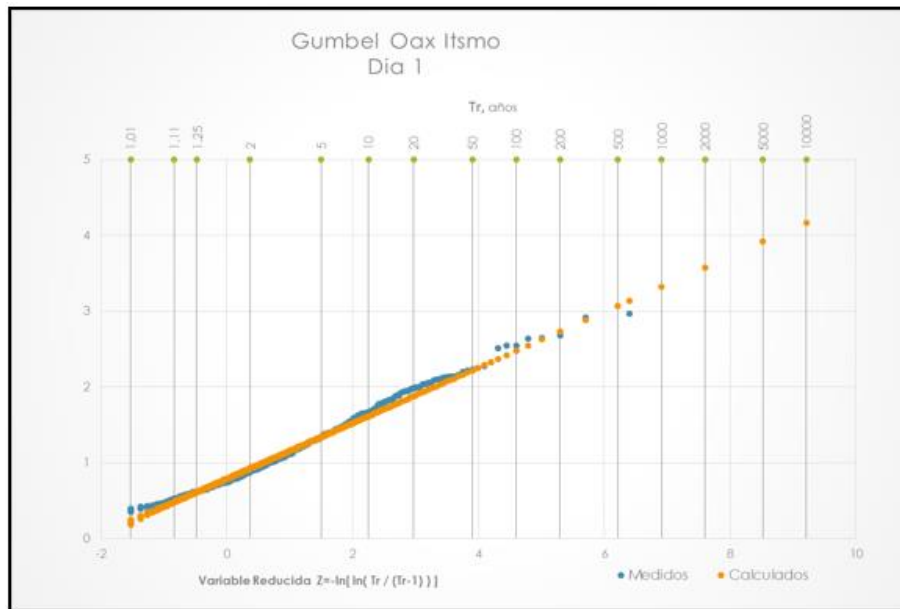


Figura 5.79. Distribución Gumbel, para región del Istmo. [Estudio para regionalizar los gastos generados por Avenidas Máximas, Instituto de Ingeniería UNAM, CENAPRED, 2017].

Los factores regionales se obtienen al considerar los valores máximos anuales de precipitación diaria de cada estación, estos valores se normalizan dividiéndolos entre su media, de tal manera que, se obtiene una muestra con un gran número de elementos. A esta muestra se le ajusta la función de distribución de probabilidad (en caso de la región del istmo se ocupa la Gumbel) y se estima los valores de esta región asociados a distintos periodos de retorno, los factores regionales para el istmo se muestran en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28. Factores regionales, región Istmo. [Estudio para regionalizar los gastos generados por Avenidas Máximas, Instituto de Ingeniería UNAM, CENAPRED, 2017].

Tr [años]	Factor Regional
2	0.92
5	1.34
10	1.61
20	1.88
50	2.22
100	2.48
200	2.73
500	3.07
1000	3.32
2000	3.58
5000	3.92
10000	4.17

La zona de estudio se ubica en mayor parte en la región del Istmo, ubicando las estaciones: 20027, 20039, 20048 y 20149.

5.5.3. FACTOR DE CONVECTIVIDAD PARA LA ZONA DE ESTUDIO

Para obtener la precipitación de una hora y para duraciones menores de 24 horas, para la construcción de las tormentas, se utilizaron los factores de Baeza (R) (Convectividad), que es el factor de lluvia de 24 hrs en relación con la lluvia de 1 hr y la tabla modificada de Chen y Bell (Luna, 2013).

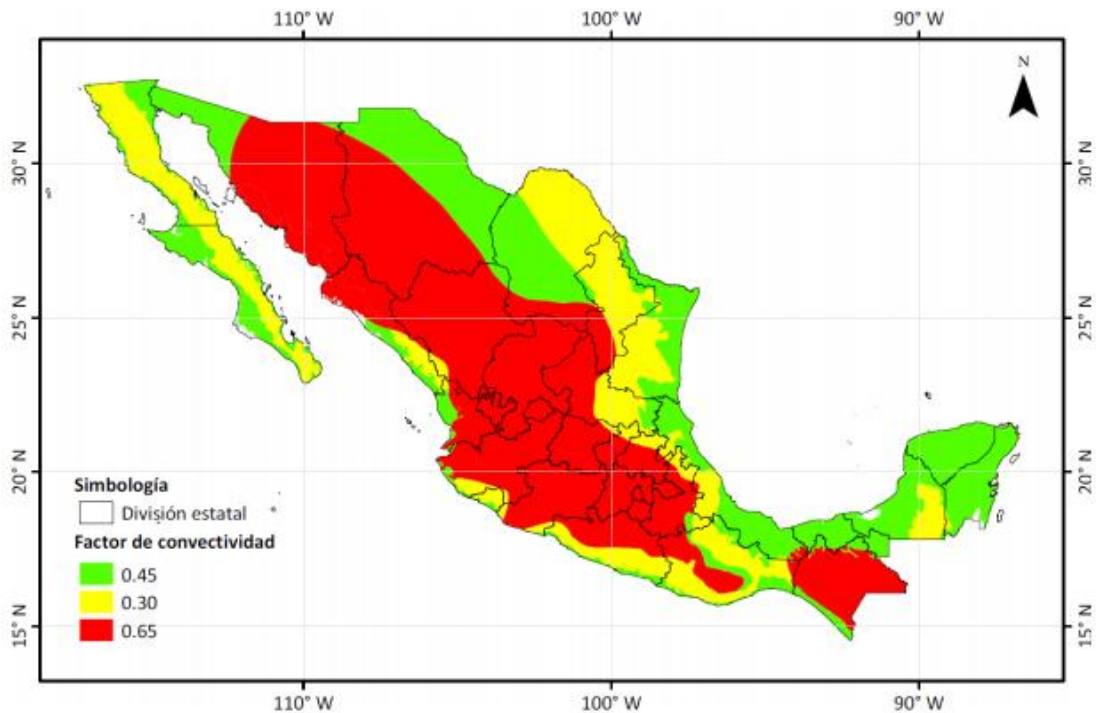


Figura 5.80. Factores de Convectividad. [Baeza, 2007, Actualización, Labrada M. 2018].

La zona de estudio en donde se presentan tres ciudades importantes y que están al lado del cauce del río Los Perros se encuentran dentro de la zona con un Factor de Convectividad de 0.45 (Figura 5.81), este valor se utilizará para la generación de las tormentas estadísticas.

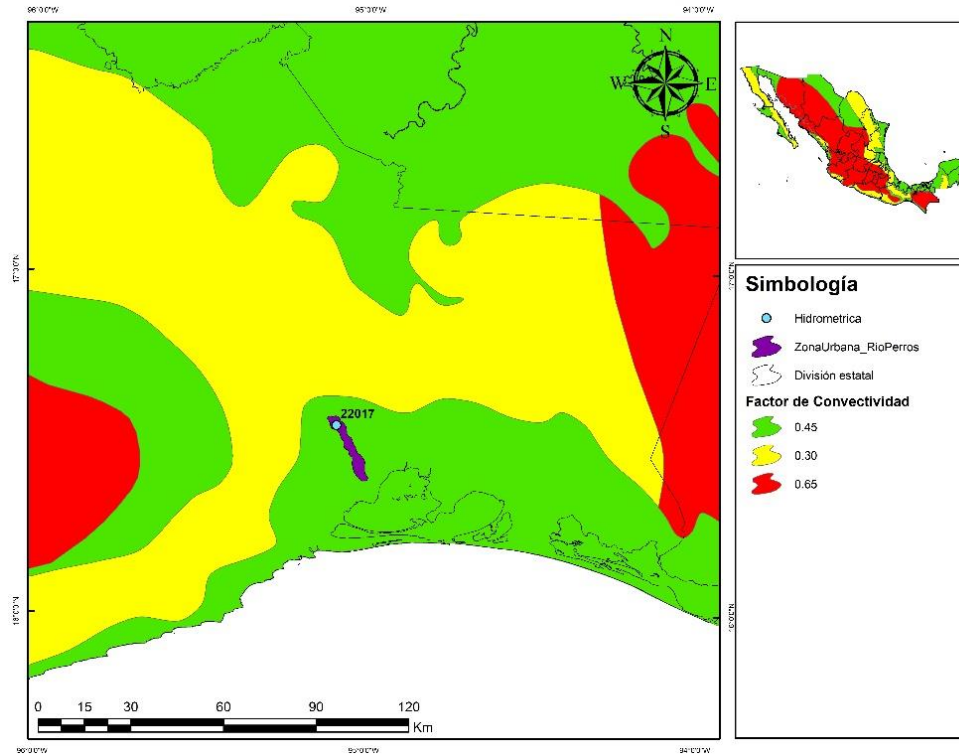


Figura 5.81. Ubicación de la zona de estudio para Factor de Convectividad.

Chen (1983), realizó estudios sobre las precipitaciones para diferentes periodos de retorno apoyado en los estudios generados por *USBW (TP 40)*, y obtuvo una fórmula generalizada de intensidad-duración-periodo de retorno para cualquier localidad en los Estados Unidos. De acuerdo con el estudio de Chen, se requiere obtener la altura de lluvia para un periodo de retorno de 10 años tanto para 1 hora (P1 10) como para 24 horas (P24 10). Con estos datos se obtienen los cocientes $R = (P1 T / P24 T)$ para cualquier periodo de retorno "T" y $x = (P1 100 / P1 10)$, para cualquier duración "t".

Además, encontró que el cociente R que relaciona la altura de lluvia de 1 hora con la de 1 día varía entre un 10% - 60% con la ubicación geográfica y que probablemente es independiente del periodo de retorno. Estas relaciones fueron utilizadas para la construcción de la ecuación (73) con la cual se puede calcular la precipitación para cualquier duración y periodo de retorno.

$$P_t^T = \frac{a_1 P_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(t + b)^c} \left(\frac{t}{60} \right) \quad (73)$$

Válida para $T \geq 1$ año y $5 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ h}$.

Donde:

P_t^T es la altura de precipitación en milímetros para una duración t en minutos y un periodo de retorno T en años.

a_1 , b_1 y c_1 son parámetros de la tormenta que se determinan según el factor de la relación $R = P_1^T / P_{24}^T$; t es la duración en minutos.

$x = P_1^{100} / P_1^{10}$, es la relación de lluvias P_1^{100} y P_1^{10} , correspondiente a una duración igual a 1 h y periodos de retorno igual a 100 y 10 años, respectivamente.

Una vez definido el valor de R que corresponda al sitio de estudio, los valores correspondientes a cualquier duración menor que 24 horas se obtienen mediante la Tabla 5.29 que los relaciona con los de 1 hora. En este caso se tomó una duración de 1 día para un Δt de 10 minutos.

Tabla 5.29. Relación $K = P_d^T / P_1^T$ modificada en función de R y la duración d .
[Modificada de Luna, 2013].

d [min]	d [hrs]	K en función de d y el factor de convectividad $R = P_1^T / P_{24}^T$							
		R=0.10	R=0.20	R=0.30	R=0.40	R=0.45	R=0.50	R=0.60	R=0.65
10	0.17	0.293	0.390	0.432	0.454	0.462	0.469	0.481	0.487
15	0.25	0.380	0.485	0.536	0.565	0.575	0.584	0.600	0.608
30	0.50	0.612	0.699	0.745	0.773	0.783	0.793	0.809	0.816
60	1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
120	2.00	1.646	1.424	1.317	1.250	1.225	1.203	1.166	1.151
150	2.50	1.934	1.595	1.435	1.337	1.300	1.268	1.215	1.193
180	3.00	2.207	1.750	1.538	1.410	1.363	1.322	1.254	1.226
210	3.50	2.468	1.892	1.631	1.475	1.417	1.367	1.286	1.253
240	4.00	2.719	2.024	1.715	1.532	1.465	1.407	1.314	1.275
270	4.50	2.961	2.148	1.793	1.584	1.508	1.443	1.337	1.294

CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO DE LA CUENCA DEL RÍO PERROS DE LA RH 22 USANDO UN MODELO LLUVIA ESCURRIMIENTO DISTRIBUIDO

d [min]	d [hrs]	K en función de d y el factor de convectividad $R = P_1^T/P_{24}^T$							
		R=0.10	R=0.20	R=0.30	R=0.40	R=0.45	R=0.50	R=0.60	R=0.65
300	5.00	3.196	2.266	1.865	1.631	1.547	1.475	1.358	1.311
330	5.50	3.425	2.378	1.933	1.675	1.583	1.504	1.377	1.326
360	6.00	3.649	2.485	1.997	1.716	1.616	1.531	1.395	1.339
390	6.50	3.867	2.587	2.057	1.755	1.647	1.556	1.410	1.351
420	7.00	4.081	2.686	2.115	1.791	1.676	1.579	1.425	1.362
450	7.50	4.291	2.781	2.170	1.825	1.704	1.601	1.438	1.373
480	8.00	4.497	2.874	2.223	1.858	1.730	1.621	1.451	1.382
510	8.50	4.700	2.963	2.273	1.889	1.754	1.641	1.463	1.391
540	9.00	4.899	3.050	2.322	1.919	1.778	1.659	1.474	1.399
570	9.50	5.096	3.134	2.369	1.947	1.800	1.677	1.484	1.407
600	10.00	5.289	3.216	2.414	1.975	1.822	1.694	1.494	1.415
630	10.50	5.480	3.297	2.458	2.001	1.842	1.710	1.504	1.422
660	11.00	5.669	3.375	2.501	2.026	1.862	1.725	1.513	1.429
690	11.50	5.855	3.452	2.542	2.051	1.881	1.740	1.522	1.435
720	12.00	6.039	3.527	2.582	2.074	1.900	1.754	1.530	1.441
750	12.50	6.221	3.600	2.622	2.097	1.918	1.768	1.538	1.447
780	13.00	6.401	3.672	2.660	2.120	1.935	1.781	1.545	1.452
810	13.50	6.580	3.743	2.697	2.141	1.952	1.794	1.553	1.458
840	14.00	6.756	3.812	2.734	2.162	1.968	1.807	1.560	1.463
870	14.50	6.931	3.880	2.769	2.183	1.984	1.819	1.567	1.468
900	15.00	7.104	3.947	2.804	2.203	1.999	1.831	1.573	1.473
930	15.50	7.275	4.013	2.838	2.222	2.014	1.842	1.580	1.477
960	16.00	7.445	4.078	2.872	2.241	2.029	1.853	1.586	1.482
990	16.50	7.614	4.142	2.904	2.260	2.043	1.864	1.592	1.486
1020	17.00	7.781	4.205	2.936	2.278	2.057	1.875	1.598	1.490
1050	17.50	7.947	4.266	2.968	2.296	2.070	1.885	1.604	1.495
1080	18.00	8.112	4.328	2.999	2.313	2.084	1.895	1.609	1.499

d [min]	d [hrs]	K en función de d y el factor de convectividad $R = P_1^T / P_{24}^T$							
		R=0.10	R=0.20	R=0.30	R=0.40	R=0.45	R=0.50	R=0.60	R=0.65
1110	18.50	8.275	4.388	3.029	2.330	2.096	1.905	1.615	1.502
1140	19.00	8.437	4.447	3.059	2.347	2.109	1.914	1.620	1.506
1170	19.50	8.598	4.506	3.088	2.363	2.122	1.924	1.625	1.510
1200	20.00	8.758	4.564	3.117	2.379	2.134	1.933	1.630	1.513
1230	20.50	8.917	4.621	3.146	2.395	2.146	1.942	1.635	1.517
1260	21.00	9.075	4.678	3.174	2.411	2.157	1.951	1.640	1.520
1290	21.50	9.232	4.734	3.201	2.426	2.169	1.959	1.645	1.524
1320	22.00	9.388	4.789	3.228	2.441	2.180	1.968	1.649	1.527
1350	22.50	9.542	4.843	3.255	2.455	2.191	1.976	1.654	1.530
1380	23.00	9.696	4.897	3.282	2.470	2.202	1.984	1.658	1.533

Como los valores no registran los factores pertenecientes a intervalos de 10 minutos, se procedió a interpolar con un ajuste Polinomial, para un factor de convectividad de 0.45, Figura 5.82.

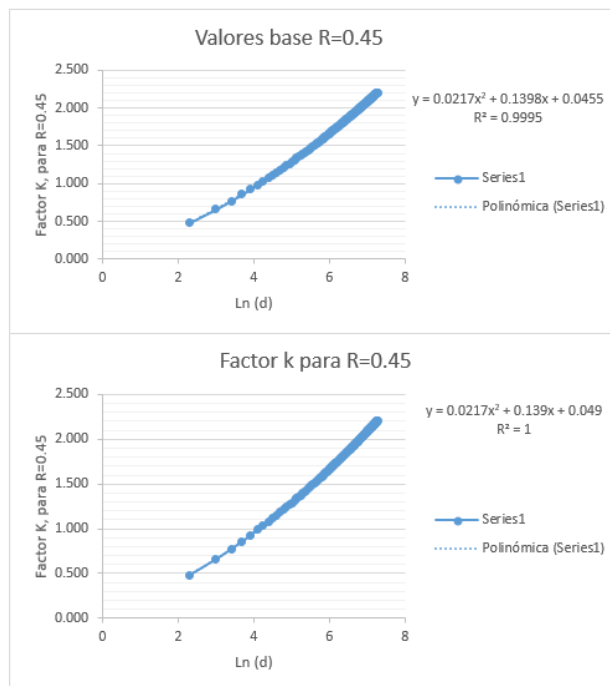


Figura 5.82. Ecuación Polinomial de interpolación, R=045.

Obteniendo los valores para $R=0.45$, con un delta de tiempo de 10 min, Tabla 5.30.

Tabla 5.30. Interpolación para valores del factor k para cada 10 minutos, $R=0.45$.

d [min]	R=0.45	d [min]	R=0.45	d [min]	R=0.45	d [min]	R=0.45
10	0.482	360	1.620	710	1.899	1060	2.072
20	0.659	370	1.631	720	1.905	1070	2.077
30	0.772	380	1.642	730	1.910	1080	2.081
40	0.856	390	1.652	740	1.916	1090	2.085
50	0.924	400	1.662	750	1.922	1100	2.089
60	1	410	1.672	760	1.928	1110	2.093
70	1.031	420	1.682	770	1.933	1120	2.097
80	1.075	430	1.691	780	1.939	1130	2.101
90	1.114	440	1.700	790	1.944	1140	2.105
100	1.150	450	1.709	800	1.950	1150	2.109
110	1.182	460	1.718	810	1.955	1160	2.112
120	1.212	470	1.727	820	1.960	1170	2.116
130	1.240	480	1.736	830	1.966	1180	2.120
140	1.266	490	1.744	840	1.971	1190	2.124
150	1.291	500	1.752	850	1.976	1200	2.128
160	1.314	510	1.761	860	1.981	1210	2.131
170	1.336	520	1.768	870	1.986	1220	2.135
180	1.357	530	1.776	880	1.991	1230	2.139
190	1.376	540	1.784	890	1.996	1240	2.142
200	1.395	550	1.792	900	2.001	1250	2.146
210	1.413	560	1.799	910	2.005	1260	2.149
220	1.431	570	1.806	920	2.010	1270	2.153
230	1.447	580	1.814	930	2.015	1280	2.157
240	1.464	590	1.821	940	2.020	1290	2.160
250	1.479	600	1.828	950	2.024	1300	2.163
260	1.494	610	1.835	960	2.029	1310	2.167
270	1.508	620	1.841	970	2.033	1320	2.170
280	1.522	630	1.848	980	2.038	1330	2.174
290	1.536	640	1.855	990	2.042	1340	2.177
300	1.549	650	1.861	1000	2.047	1350	2.181
310	1.562	660	1.868	1010	2.051	1360	2.184
320	1.574	670	1.874	1020	2.055	1370	2.187
330	1.586	680	1.880	1030	2.060	1380	2.191
340	1.598	690	1.887	1040	2.064	1390	2.194
350	1.609	700	1.893	1050	2.068	1400	2.197
						1410	2.200
						1420	2.203
						1430	2.207
						1440	2.210

5.5.4. TORMENTAS ESTADÍSTICAS

Al contar con la información a 10 min se realizan las tormentas estadísticas para cada periodo de retorno. La precipitación media de cada estación se multiplica por el factor regional correspondiente al periodo de retorno a obtener, posteriormente con el apoyo del factor de reducción por área y del factor de convectividad se obtiene la precipitación a 1 hora para cada periodo de retorno, al contar con las precipitaciones a 1 hora y cada periodo de retorno multiplicamos el factor k obtenido en la tabla 5.25 para 10 minutos.

Al multiplicar por el factor k obtenemos las precipitaciones acumuladas a las que obtendremos los incrementos para cada Δt , estos incrementos los ordenaremos por el método de bloques alternos y llegaremos a los hietogramas de diseño para cada periodo de retorno.

- **Tr 50 Años**

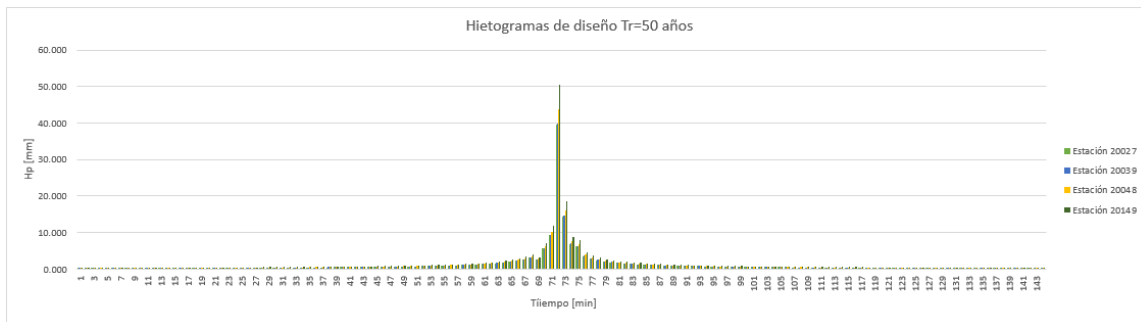


Figura 5.83. Hietograma de diseño, Tr 50 años.

- **Tr 100 Años**

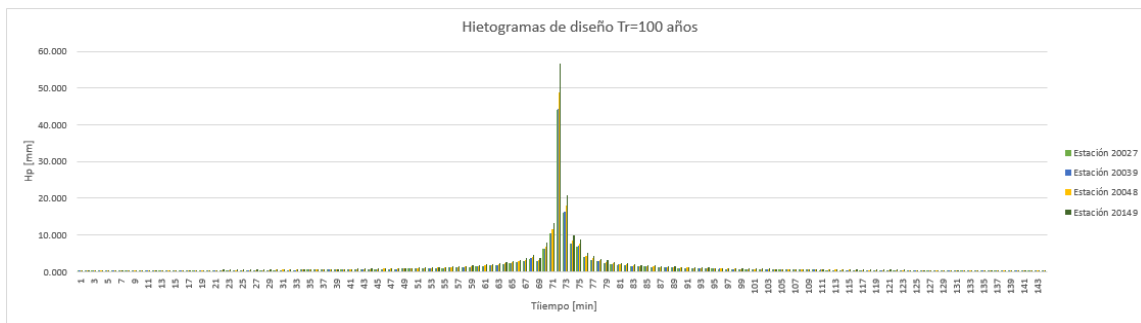


Figura 5.84. Hietograma de diseño, Tr 100 años.

- **Tr 500 Años**

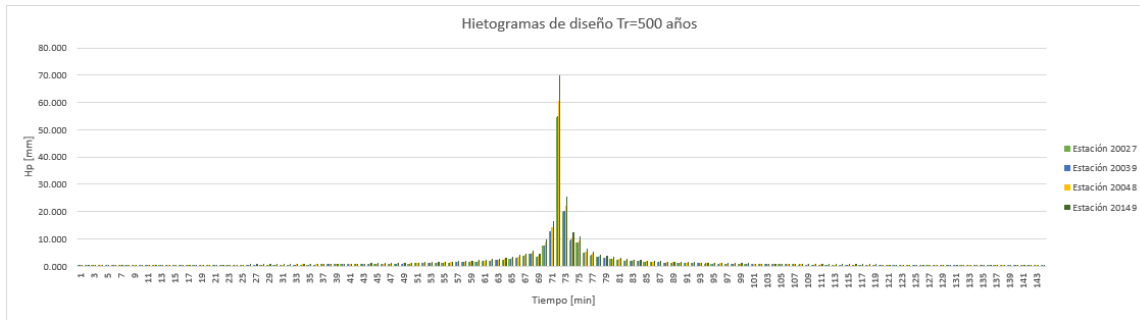


Figura 5.85. Hietograma de diseño, Tr 500 años.

- **Tr 1000 Años**

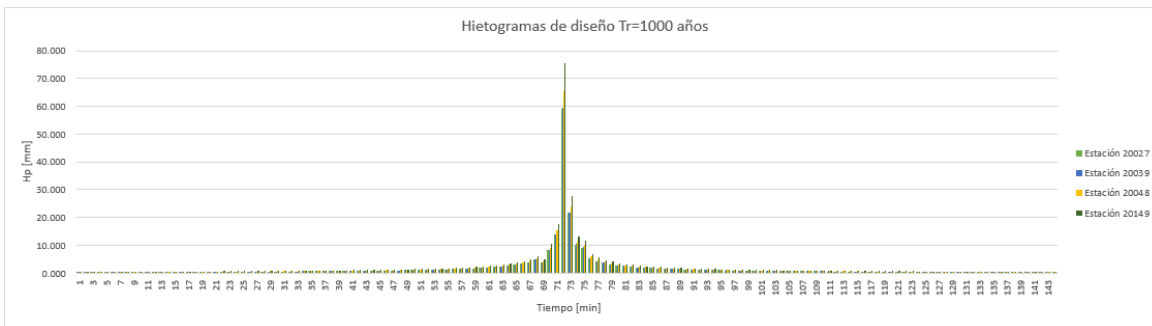


Figura 5.86. Hietograma de diseño, Tr 1000 años.

- **Tr 5000 Años**

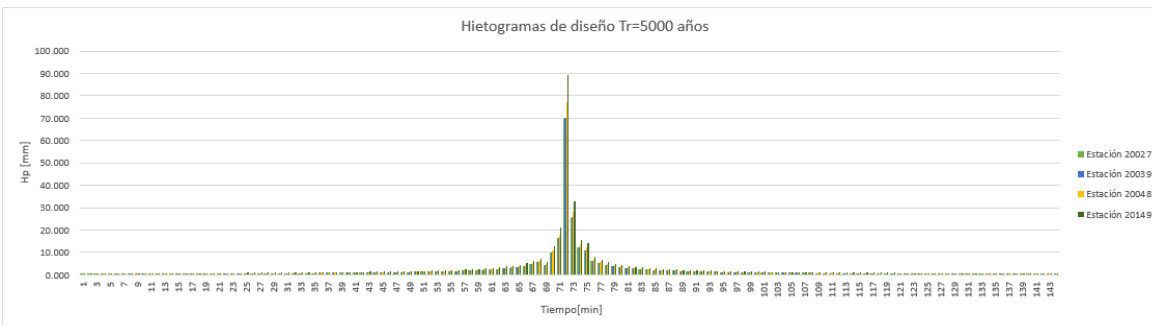


Figura 5.87. Hietograma de diseño, Tr 5000 años.

- **Tr 10000 Años**

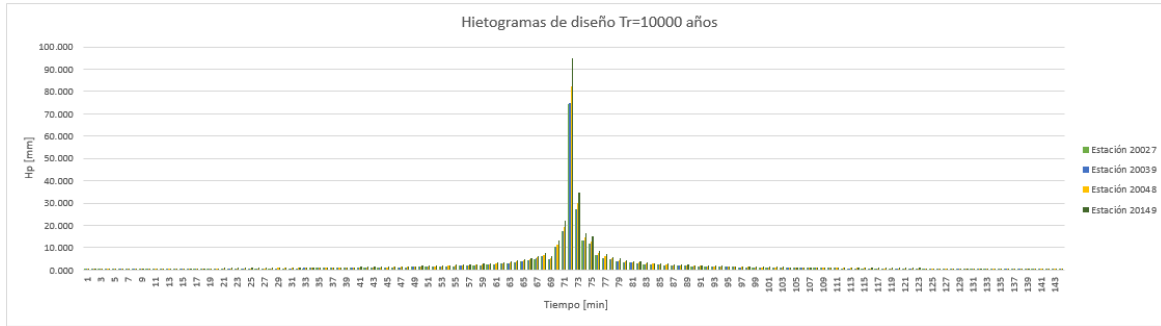


Figura 5.88. Hietograma de diseño, Tr 10000 años.

Al obtener las precipitaciones de diseño para cada estación, ingresamos al programa MPE para obtener la lluvia media de la cuenca en estudio para cada periodo de retorno con los parámetros de calibración (Figura 5.63) obtenidos en capítulos anteriores. Estas precipitaciones medias se muestran en la tabla 5.31.

Tabla 5.31. Precipitaciones medias asociadas a periodos de retorno.

Tr [años]	Hp [mm]
2	77.17
5	112.40
10	135.04
20	157.69
50	186.21
100	208.01
200	228.98
500	257.50
1000	278.47
2000	300.28
5000	328.80
10000	349.77

5.6. AVENIDAS DE DISEÑO

Con las tormentas estadísticas de 24 horas con intervalo de tiempo a cada 10 minutos, ingresamos los valores al programa MPE, para generar el hidrograma con los parámetros obtenidos en la calibración del evento (Figura 5.63).

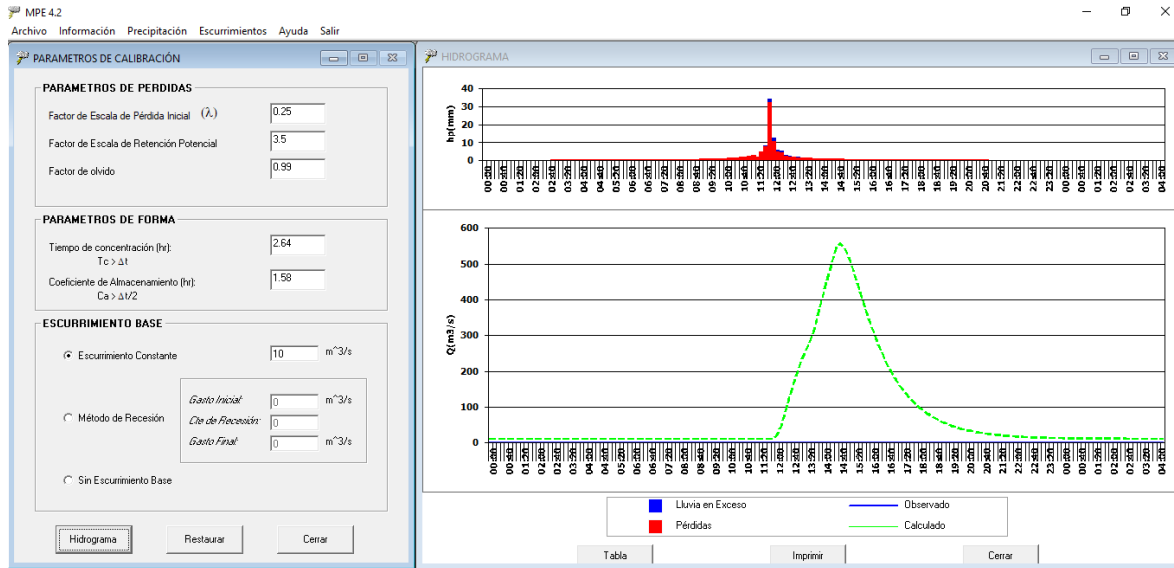


Figura 5.89. Generación de avenida de diseño, T_r 20 años.

Al contar con las tormentas estadísticas se procede a obtener los caudales de diseño (gasto pico) para cada periodo de retorno, con los parámetros calibrados anteriormente, los resultados se muestran en la tabla 5.32 (gastos de pico) y figura 5.90 (hidrogramas de diseño).

Tabla 5.32. Caudal de pico total para cada periodo de retorno.

Tr [años]	Q [m3/s]
2	23.49
5	124.35
10	299.79
20	557.61
50	992.23
100	1406.82
200	1871.83
500	2586.01
1000	3163.78
2000	3805.82
5000	4700.63
10000	5393.39

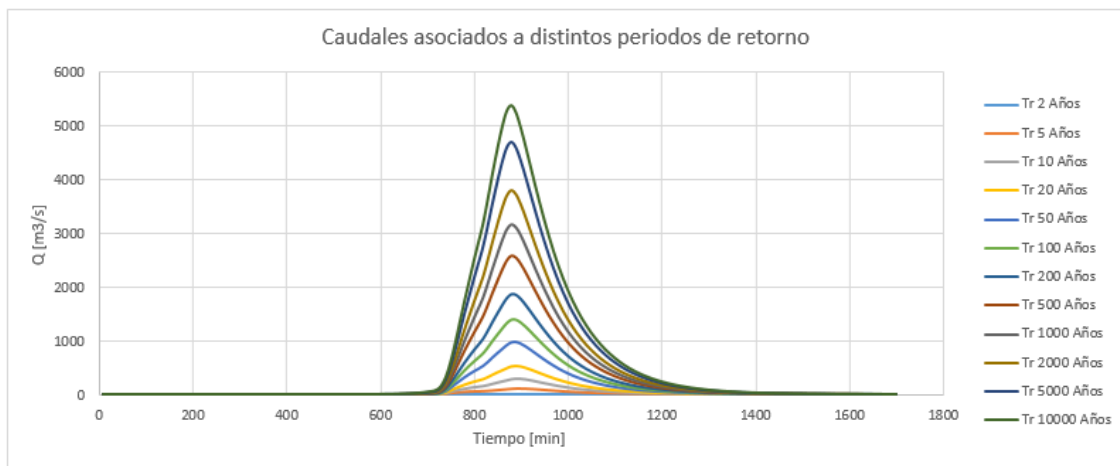


Figura 5.90. Hidrogramas de diseño para distintos periodos de retorno.

Para el proceso de transformación de la precipitación en escurrimiento por lo regular es mediante modelos de parámetros concentrados, que utilizan valores medios, por lo que no pueden considerar las variaciones espaciales al interior de una cuenca, del tipo y uso de suelo ni de la precipitación. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten dividir la cuenca en celdas cuadradas cada una con sus características específicas y, con el Modelo Numérico del Terreno, se da seguimiento a las trayectorias del escurrimiento directo hasta llegar al sitio de estudio. Estas nuevas condiciones llevan cada vez más al uso de los modelos de parámetros distribuidos para hacer un modelado de cuenca más preciso.

CAPITULO 6. MODELACIÓN BIDIMENSIONAL

La simulación de las avenidas de diseño se realiza con apoyo de la herramienta computacional Iber (Bladé, et al., 2014) para los gastos que se obtuvieron en el análisis de tormentas estadísticas. Se realiza simulaciones de prueba para poder verificar la continuidad del flujo a través de las zonas en donde transita el río.

6.1. DEPURACIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

Al observar el modelo digital de terreno (MDT) se detectó zonas del río en donde el flujo del río está siendo obstruido por árboles, conservando las elevaciones de las copas de dicha vegetación, así como de las estructuras de pasos vehiculares existentes a lo largo del río.

Al realizar un análisis más detallado de elevaciones, se observaron elevaciones con una diferencia de hasta 10 metros con respecto al nivel del espejo de agua. Al empalmar estas elevaciones se detectó que las elevaciones “extrañas” correspondían a estructuras (puentes) y vegetación (árboles) que no fueron depuradas del modelo **LIDAR**, Figura 6.1. Por este motivo se realizó una depuración del MDT.



Figura 6.1. Sección del río con influencia de elevaciones de árboles.

Con apoyo en la herramienta Global Mapper se observaron las elevaciones en estos puntos corroborando las diferencias de elevaciones, Figura 6.2.

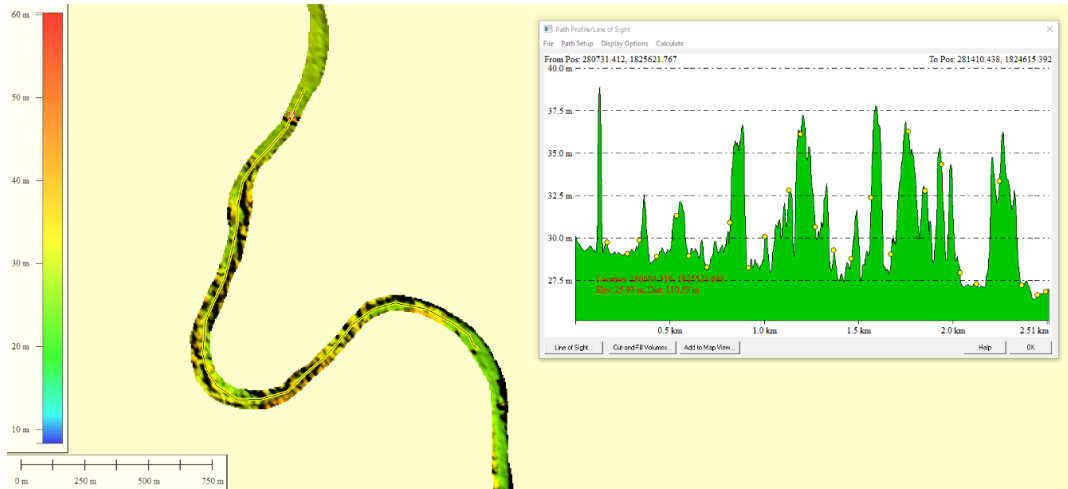


Figura 6.2. Diferencias de elevaciones corroboradas, Global Mapper.

Seleccionamos las partes a depurar del *shapfile*, posteriormente se realiza un clip para el ráster, Figura 6.3 y 6.4.

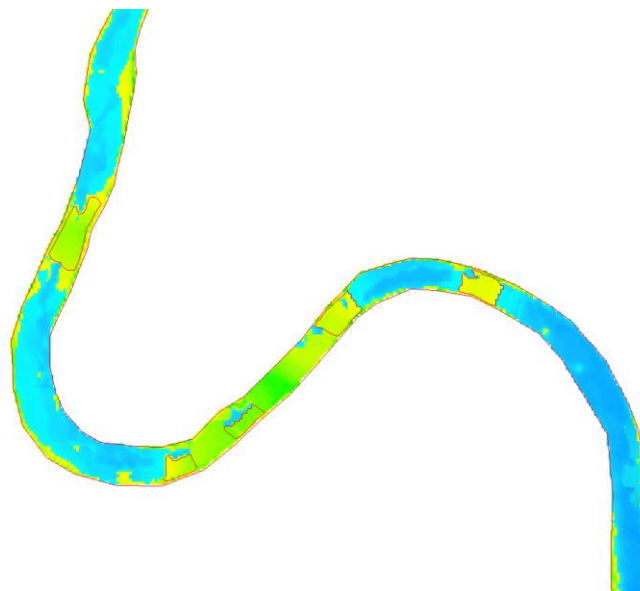


Figura 6.3. Selección de partes a depurar.

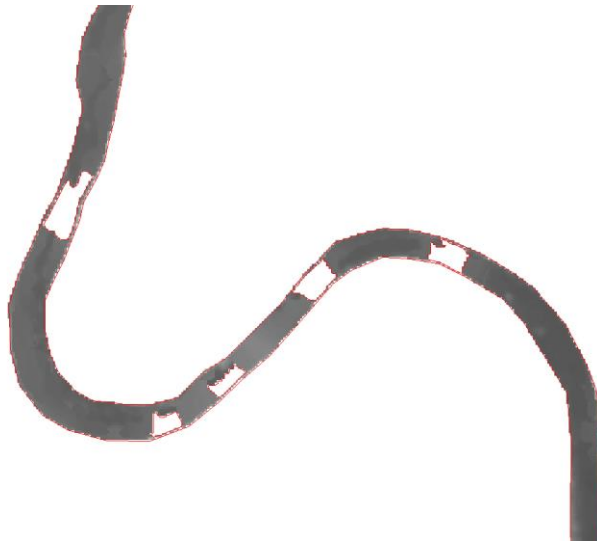


Figura 6.4. Extracción de las partes a depurar del ráster.

Con la herramienta de *Raster Calculator* procedemos a identificar los espacios vacíos, Figura 6.5.

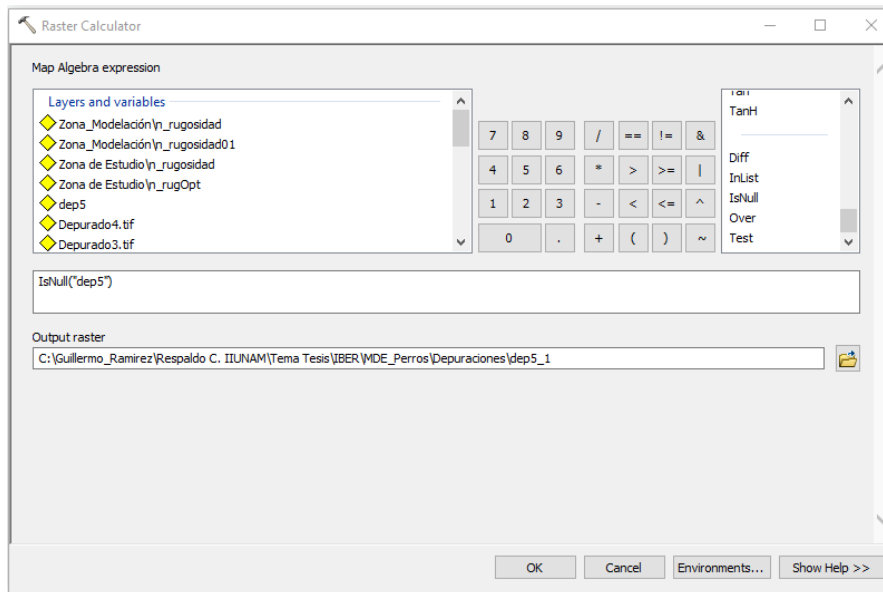


Figura 6.5. Identificación de espacios.

Posteriormente se asigna el tamaño de celda para el llenado de vacíos utilizando un promedio de los valores más cercanos al espacio a rellenar, Figura 6.6.

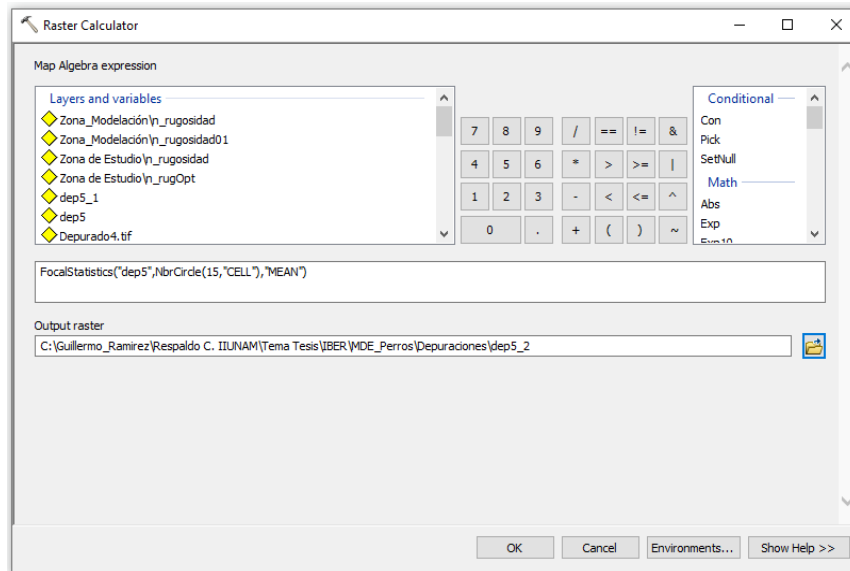


Figura 6.6. Llenado de vacíos utilizando el promedio de los valores más cercanos.

Esta acción genera un nuevo ráster con un buffer de 15 metros, este nuevo ráster es el resultado de realizar un promedio de las elevaciones más cercanas, Figura 6.7.

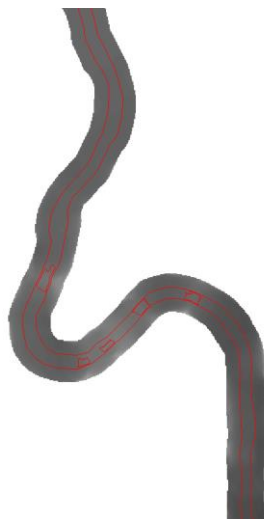


Figura 6.7. Generación de buffer de 15 metros.

Al generar el llenado con el buffer de 15 metros se interpola con el ráster original para respetar las elevaciones de las zonas que están correctas e incluir la nueva elevación desarrollada con el promedio, Figura 6.8 y 6.9.

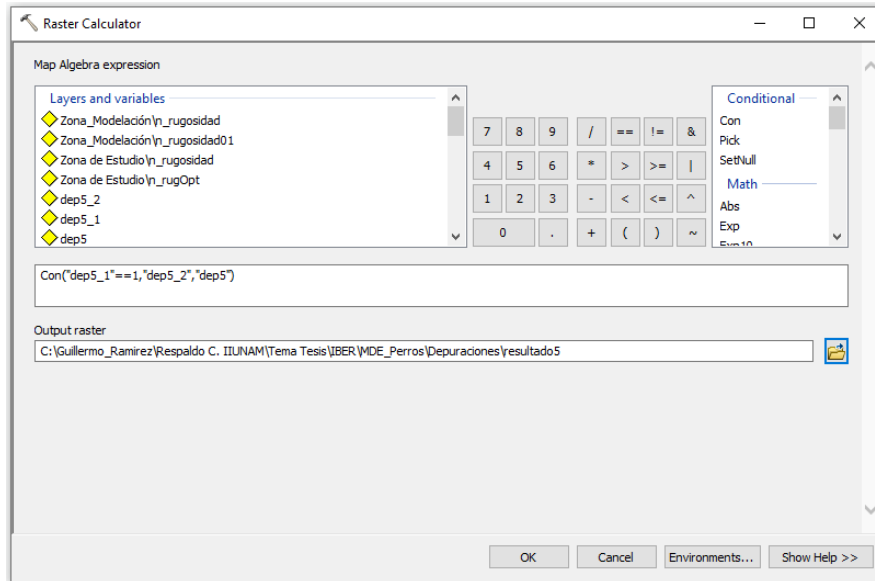


Figura 6.8. Interpolación de la nueva elevación con las elevaciones originales.

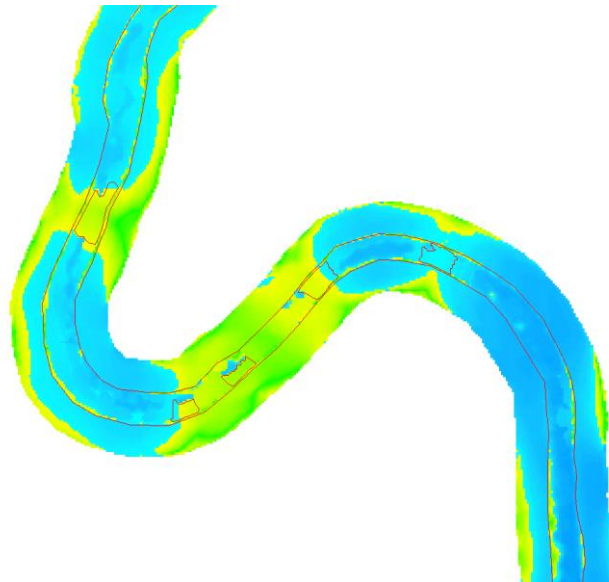


Figura 6.9. Resultado de la interpolación.

Se realiza un clip para volver a obtener el ráster con respecto a la forma del río. Este procedimiento se realiza las veces que sea necesario hasta lograr depurar en mayor parte las zonas en donde se generen elevaciones que no correspondan.

Se compara el MDT original con los errores en la elevación con el MDE con correcciones, Figura 6.10.

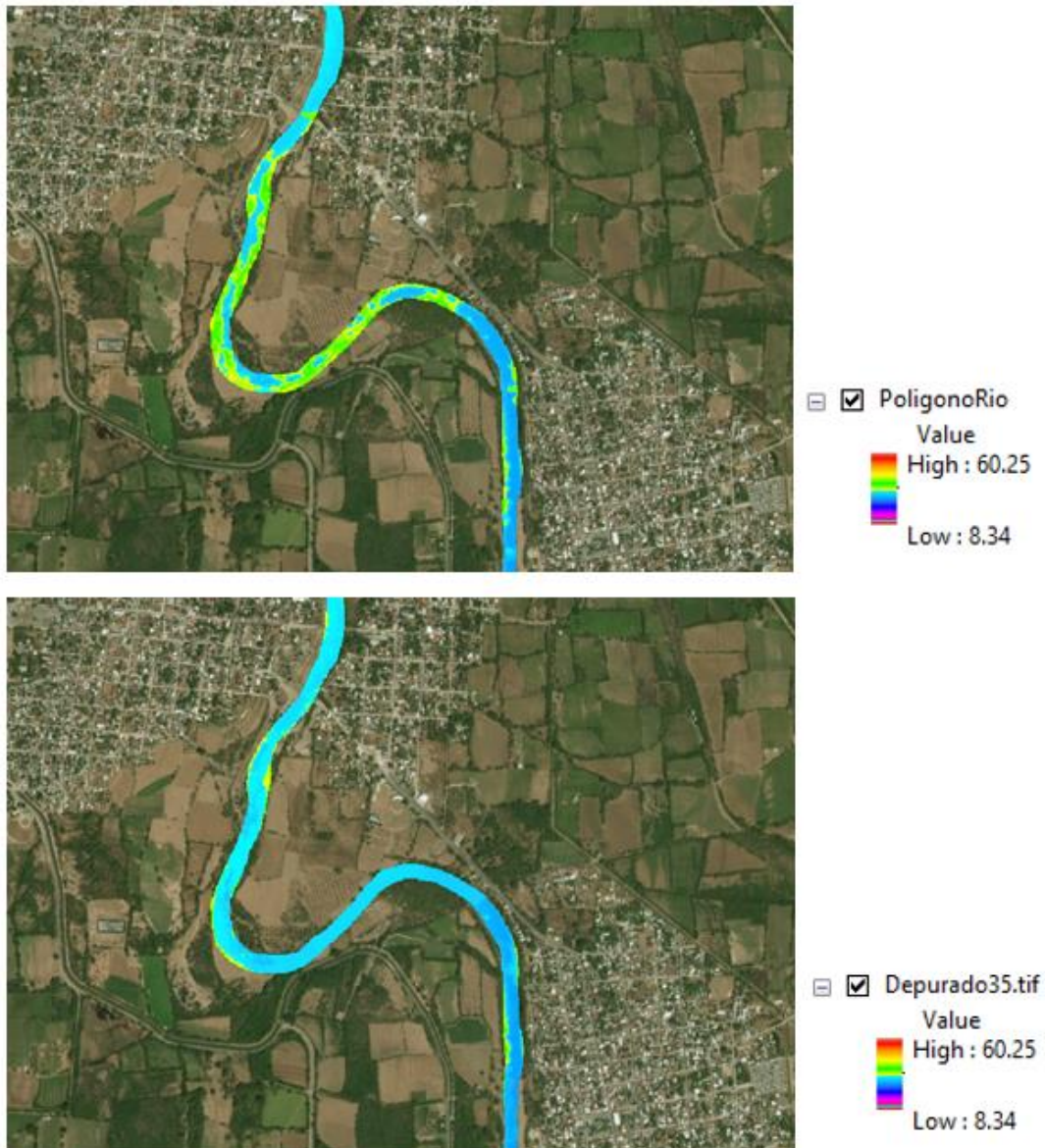


Figura 6.10. Comparación de elevaciones originales con elevaciones depuradas.

Se verifica para las elevaciones depuradas la variación de las elevaciones con respecto al nivel de espejo de agua.

Elevaciones originales sin depuración de modelo digital de terreno **LIDAR**, Figura 6.11.

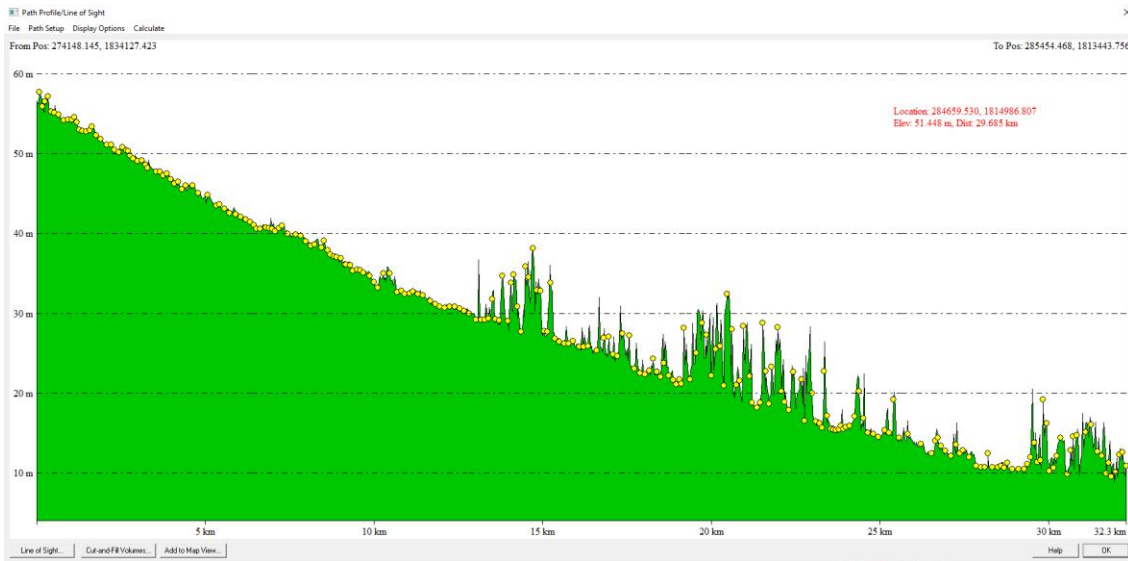


Figura 6.11. Elevaciones originales del terreno.

Elevaciones posteriores a la aplicación de un proceso de depurado, Figura 6.12.

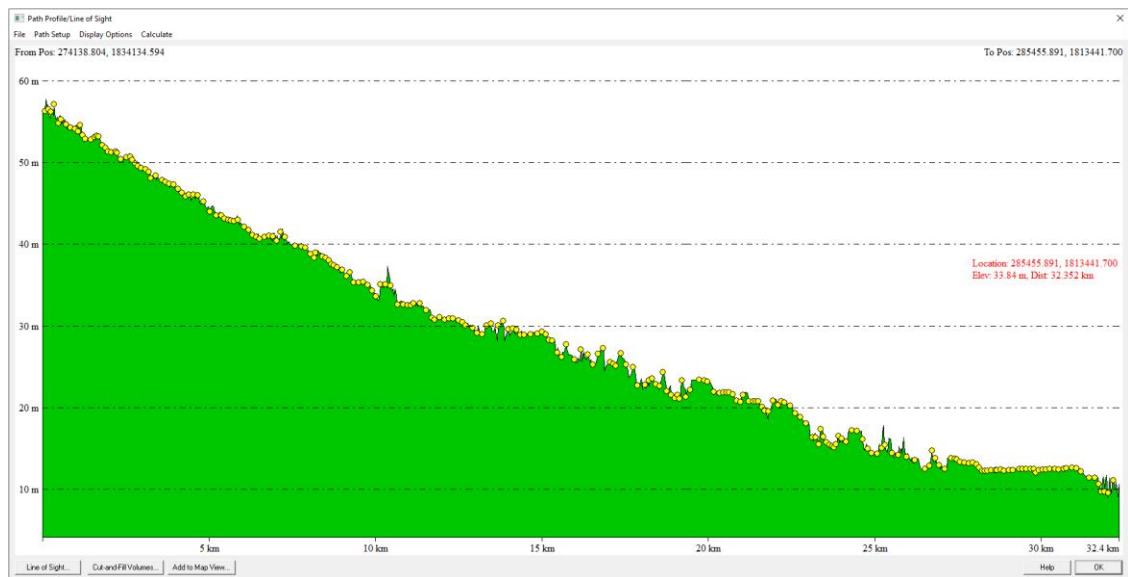


Figura 6.12. Elevaciones con un proceso de depurado.

6.2. MODELO IBER

Al contar con las elevaciones depuradas para asegurar un flujo continuo en el río, se procede a simular los hidrogramas calculados en capítulos anteriores para determinar el comportamiento del río en la zona de estudio para diferentes periodos de retorno.

Para iniciar el proceso de simulación se importa el archivo *Shapefile* de la geometría de la zona de estudio (Figura 6.13), generada en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

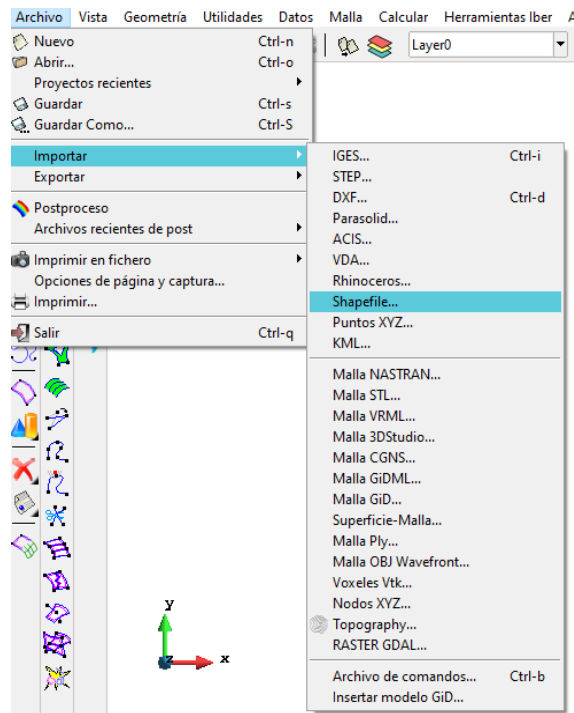


Figura 6.13. Importación archivo Shapefile.

El colapsar la geometría permite unir puntos de trazo y generar la menor cantidad de líneas para la generación de superficies (NURBS), Figura 6.14. Es importante realizar el *shapefile* que carguemos en Iber con la opción “*Union*”, debido a que considera cada zona como parte independiente, de esta forma generamos una malla adecuada para su uso.

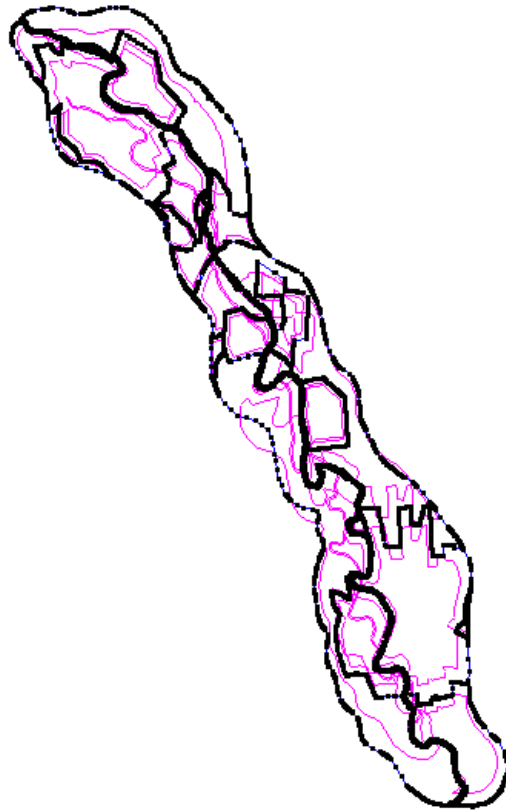


Figura 6.14. Modelo colapsado de la zona de estudio.

Con el modelo colapsado y generado las superficies (NURBS), se asigna la **n de Manning** al modelo. Para esta asignación se apoya en el archivo “**manning.txt**” que se generó anteriormente (Figura 6.15).

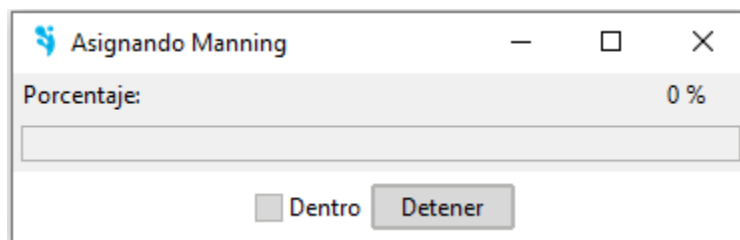


Figura 6.15. Asignación n de Manning forma automática.

Al intentar cargar el archivo se mostró un error por este motivo se asignaron los usos de suelo de forma manual con las áreas definidas de cada uso.

Para realizar la asignación del uso de suelo se sigue la ruta **(Datos-Rugosidad-Uso del Suelo)**. En la Figura 6.16 se visualiza los usos asignados a la zona de estudio.

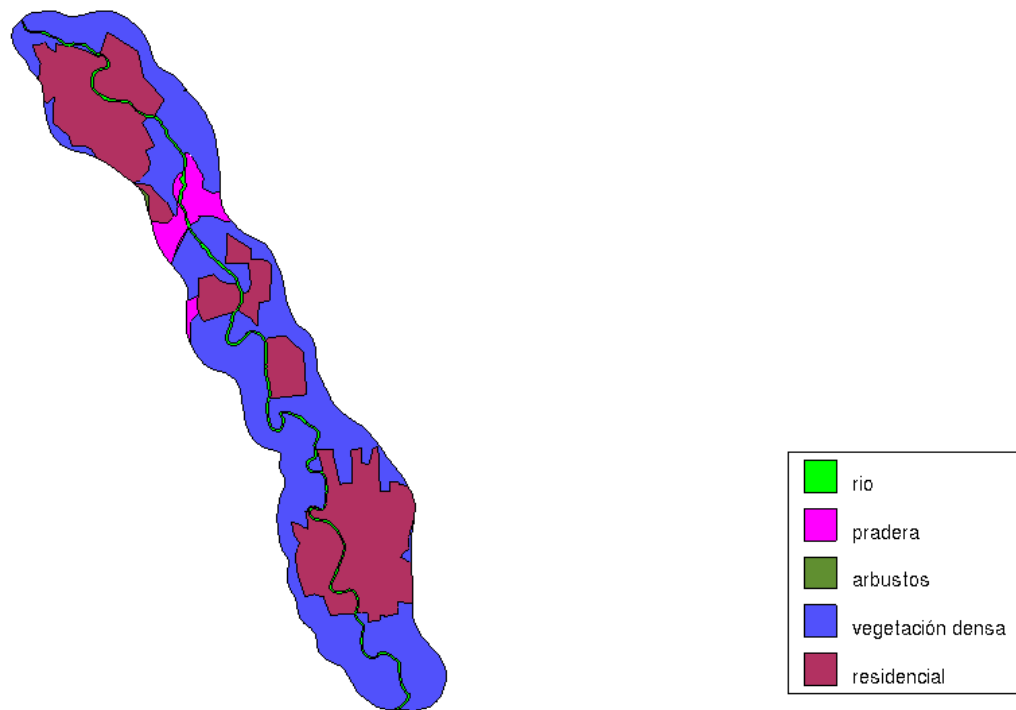


Figura 6.16. Asignación de los Usos de Suelo.

Al contar con los usos de suelo, se procede a ingresar las propiedades hidráulicas, iniciando con las condiciones de frontera **(Datos-Hidrodinámica-Condiciones de Contorno)**, Figura 6.17.

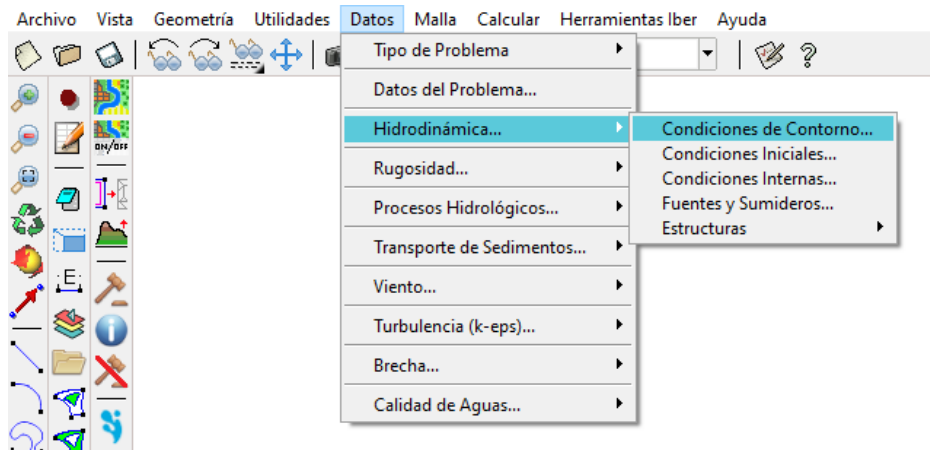


Figura 6.17. Ruta para ingresar las condiciones de frontera.

Los gastos de entrada son los que se obtuvieron en el capítulo anterior, estos son los que se ingresarán al modelo para realizar el análisis de inundación y riesgo, Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Gastos a ingresar al modelo.

Tr [años]	Q [m ³ /s]
2	13.49
5	114.35
10	289.79
20	547.61
50	982.23
100	1396.82
200	1861.83
500	2576.01
1000	3153.78
2000	3795.82
5000	4690.63
10000	5383.39

Con los gastos obtenidos en capítulos anteriores se procede a ingresar el hidrograma calculado. Es importante mencionar que se modelarán (por importancia y facilidad de cálculos computacionales) los periodos de retorno de 20, 50 y 100 años.

Hidrograma ingresado. $T_r = 20$ años

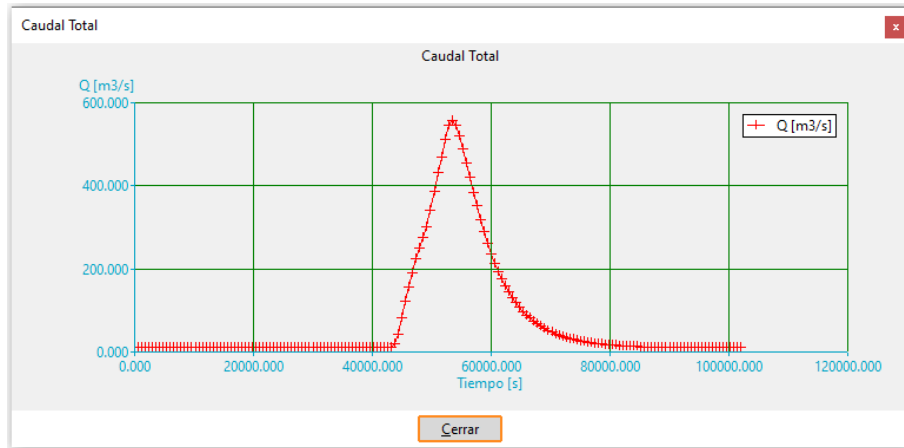


Figura 6.18. Hidrograma ingresado para un T_r de 20 años.

Se asigna la entrada del hidrograma, Figura 6.19.

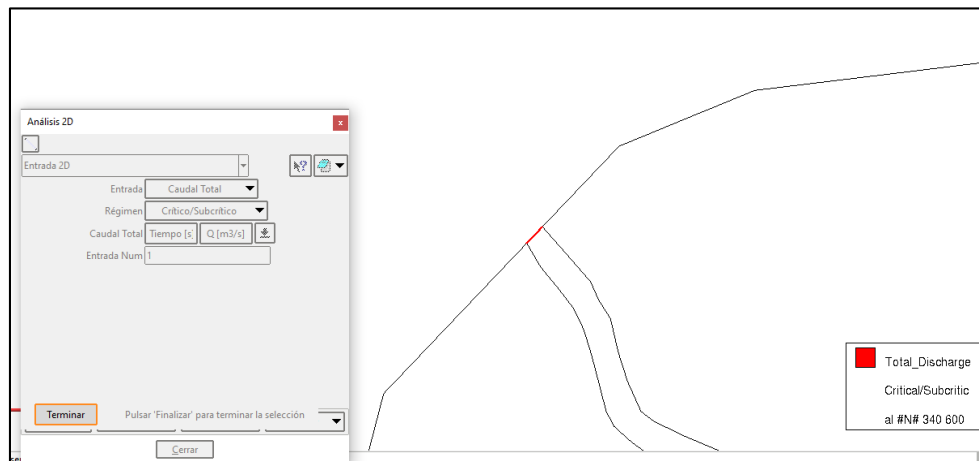


Figura 6.19. Asignación de entrada del hidrograma.

Se asigna la salida, Figura 6.20.

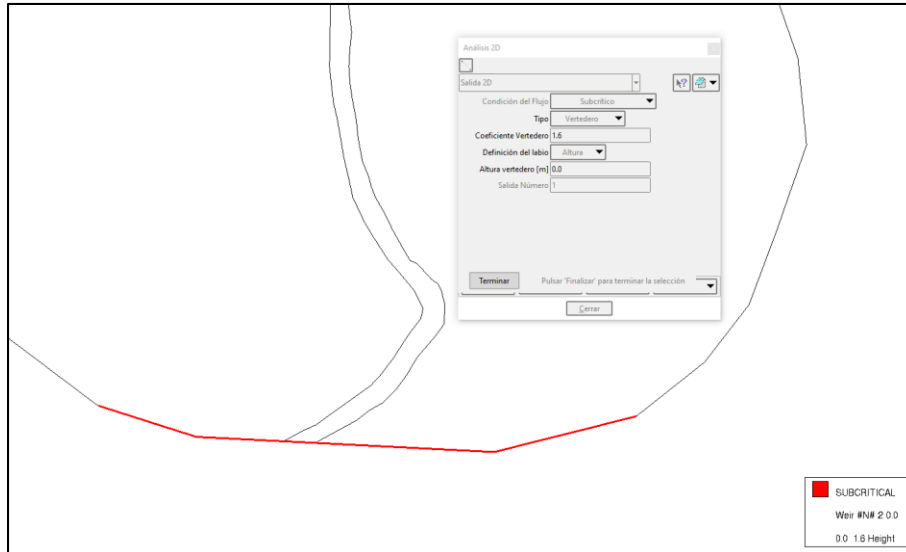


Figura 6.20. Asignación de salida del hidrograma.

Se ingresa la precipitación total en la zona de estudio para asegurar un evento de lluvia y que influye directamente en el río (**Datos-Procesos Hidrológicos-Definición de Hietogramas**), Figura 6.21.

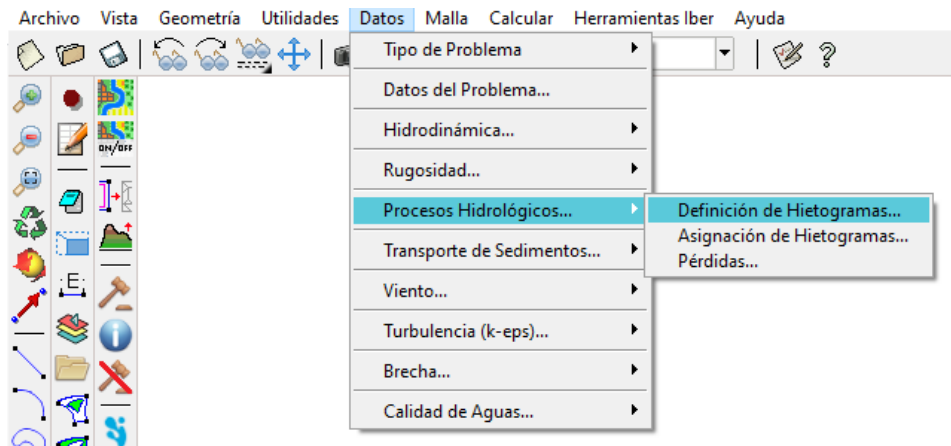


Figura 6.21. Ruta para definición de las precipitaciones.

Precipitaciones para un Tr de 20 años, Figura 6.22.

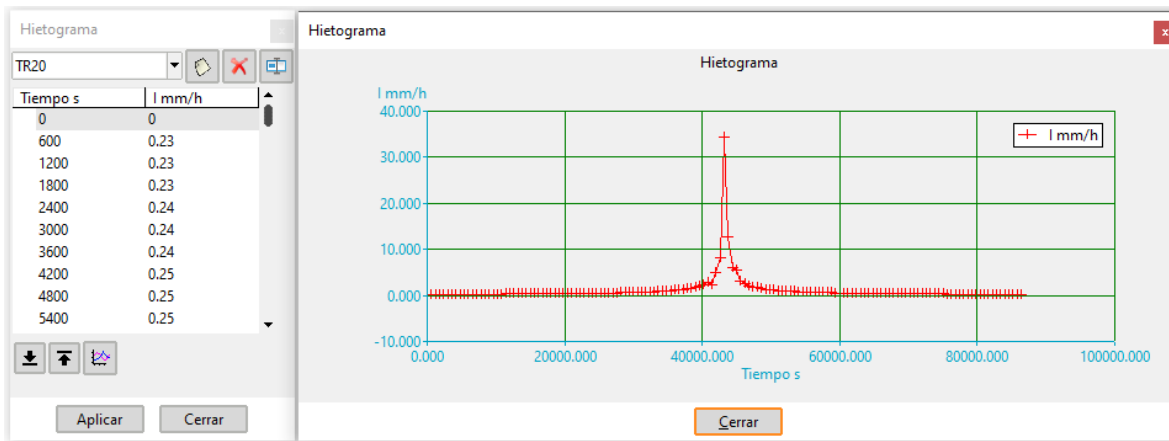


Figura 6.22. Hietograma Tr 20 años.

Se asigna el hietograma a la zona de estudio (**Datos-Procesos Hidrológicos-Asignación de Hietogramas**). Se visualiza la asignación de la lluvia con Tr 20 años, Figura 6.23.



Figura 6.23. Asignación de la precipitación Tr 20 años.

Se asigna las pérdidas con el método del *Soil Conservation Service (SCS)* con los siguientes números de curva:

Tabla 6.2. Numero de curva conforme a uso de suelo.

Uso de Suelo	NC
Rio	10
Pradera	75
Arbustos	60
Vegetación densa	57
Residencial	90

En la Figura 6.24 se visualiza la asignación del número de curva.

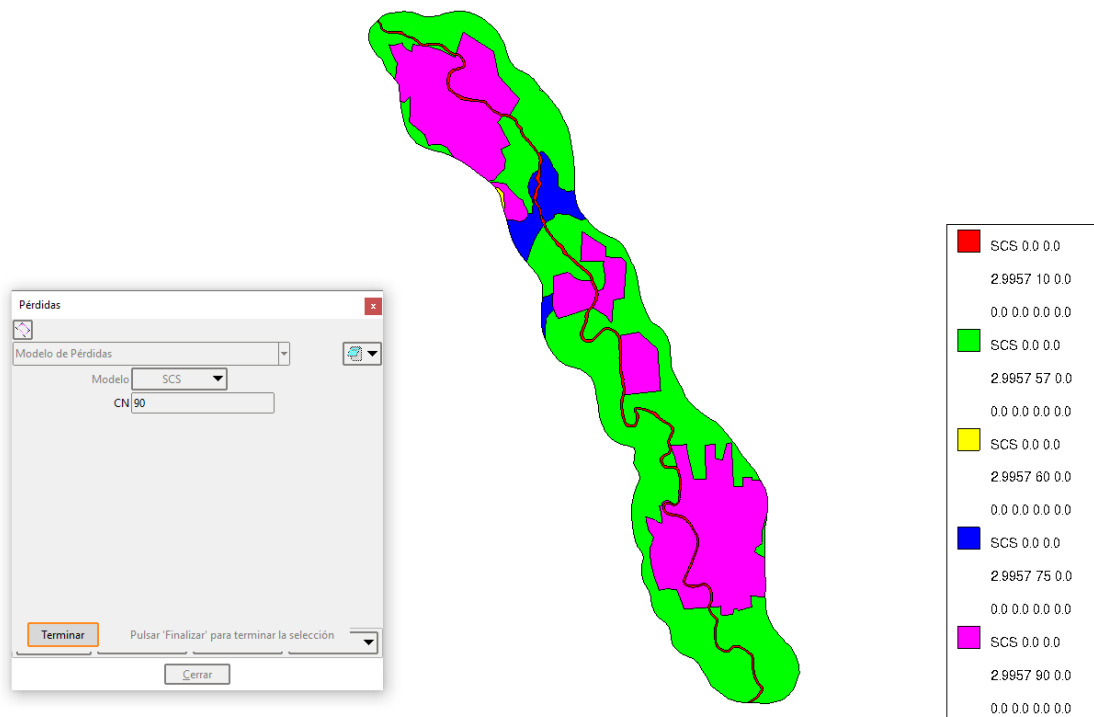


Figura 6.24. Asignación del número de curva, método SCS.

Posteriormente se genera la malla para el modelo. Para esta generación se sigue la siguiente ruta (**Malla-No estructurada-Asignar tamaño a superficies**), Figura 6.25.

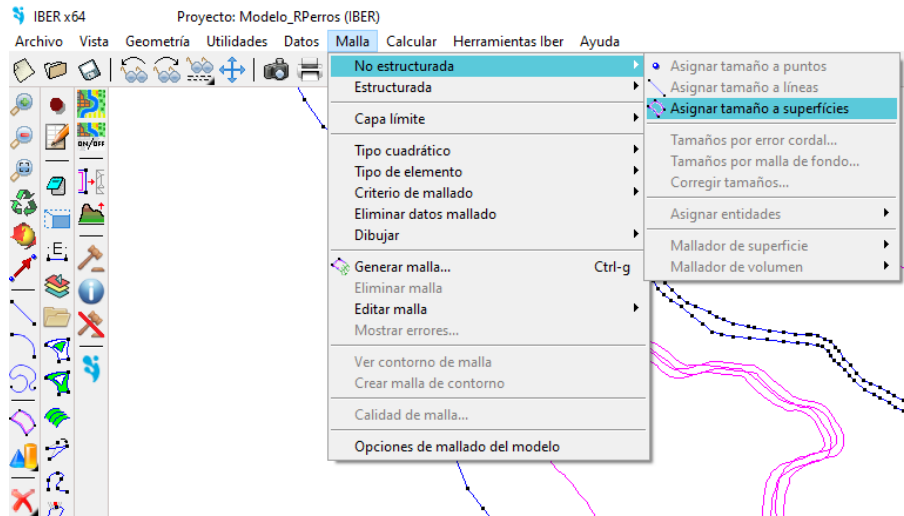


Figura 6.25. Ruta para generación de malla.

Iber tiene otra opción de creación de malla conforme a un **MDT**, esta opción es la de **RTIN**, tiene la ventaja de que optimiza los tamaños de celda pero su desventaja es que asigna los tamaños de malla desde la topografía del sitio, esta desventaja se puede explicar cuando en una zona “plana” se pretende una mayor precisión pero iber asigna un tamaño grande en zonas planas, por consecuencia no se tendrá una precisión adecuada utilizando esta opción de **RTIN**, por este motivo se generó de una forma manual especificando los tamaños de malla conforme a la precisión que deseamos.

La malla se recomienda en la parte del río una décima parte del ancho. El promedio del ancho del río en el modelo es de 60 metros. Por lo que, para el caso de la definición de malla en la parte del río se tomará un valor de 6m, para las zonas urbanas de 25m y para las zonas de vegetación de 50m, Figura 6.26.

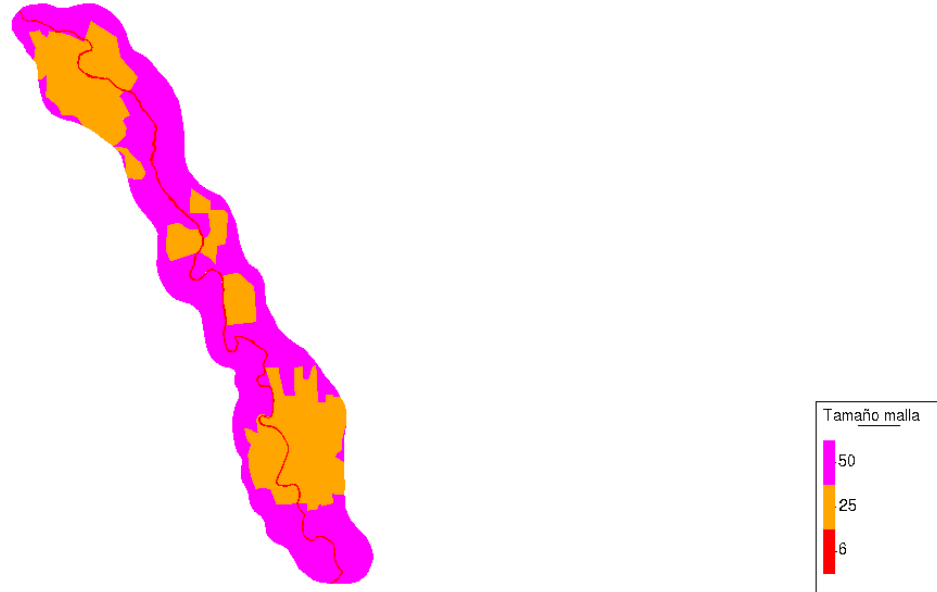


Figura 6.26. Asignación del tamaño de malla.

Al asignar los tamaños de malla se procede a generar los elementos necesarios para mellar la zona de estudio, Figura 6.27.

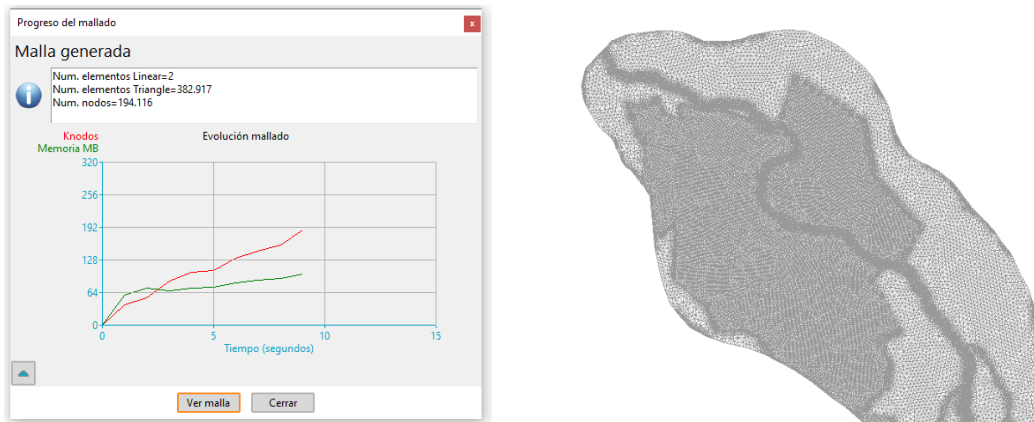


Figura 6.27. Generación de malla para la zona de estudio.

Posteriormente se asignará la elevación al modelo. Para este proceso primero se recorta el **MDT** de la zona de estudio y se exporta el ráster a un formato ASCII. Se carga en Iber siguiendo la ruta (**Herramientas Iber-Malla-Editar-Asignar elevación desde archivo...**). Se importa la elevación del modelo (Figura 6.28) y visualización de la zona de estudio (Figura 6.29).

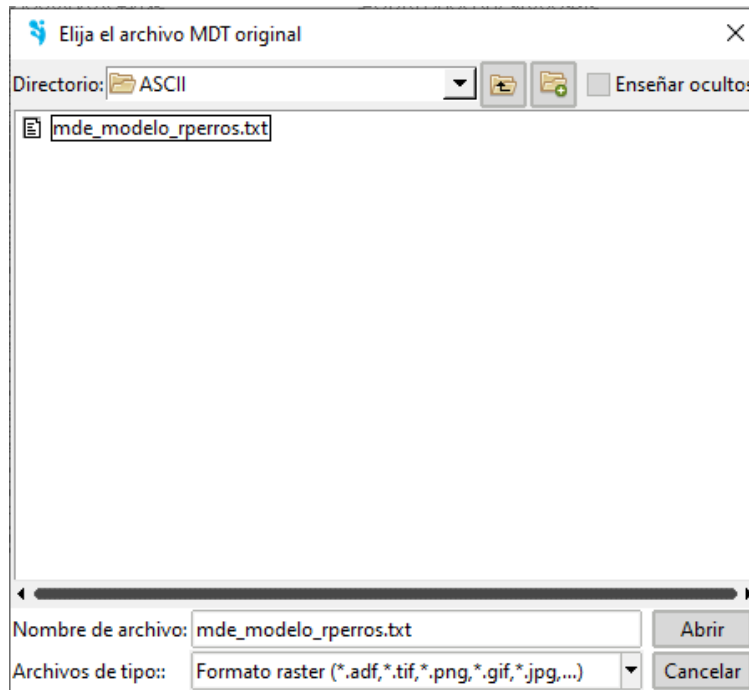


Figura 6.28. Importar elevación para el modelo.

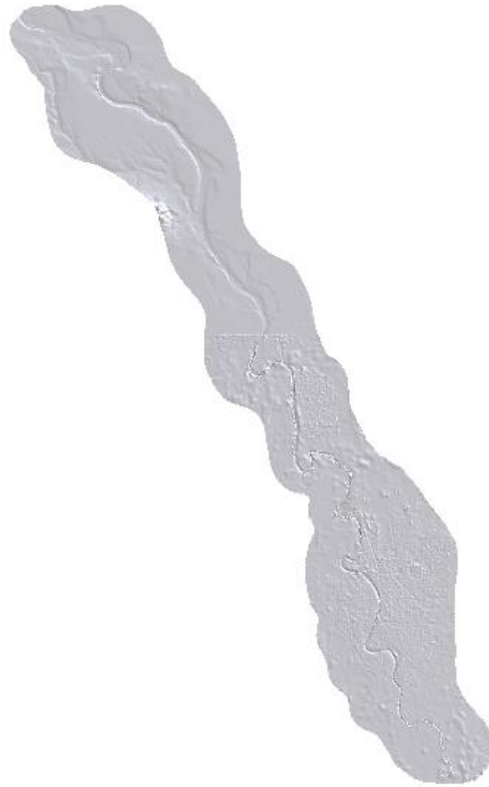


Figura 6.29. Modelo de terreno para la zona de estudio.

Se ingresan los tiempos de simulación, inicialmente el tiempo que se ingresará será la duración del hidrograma que es de 102,000 segundos que equivale a 28.3 horas, Figura 6.30.

Datos

Parámetros de Tiempo | General | Resultados | Peligrosidad personalizada | Turbulencia | Sedimentos | Via Intenso Desagüe | Brecha | Calidad de Aguas | Oleaje | Hidrología

Simulación Nueva

Instante Inicial [s] 0

Tiempo máximo de simulación [s] 102000

Intervalo de Resultados [s] 600

Aceptar Cerrar

Figura 6.30. Ingreso de tiempo de simulación.

Se inicia la simulación (**Calcular-Calcular**), Figura 6.31.

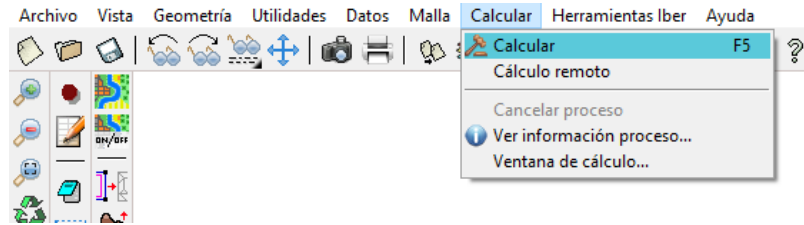


Figura 6.31. Inicio de la simulación.

Se visualiza el proceso de simulación en la ventana de resultados (Figura 6.32), es importante mencionar que el tiempo de simulación depende del número de procesadores a utilizar. Para cada simulación el proceso duró aproximadamente 3 semanas, con un total de 4 núcleos y 8 procesadores lógicos.

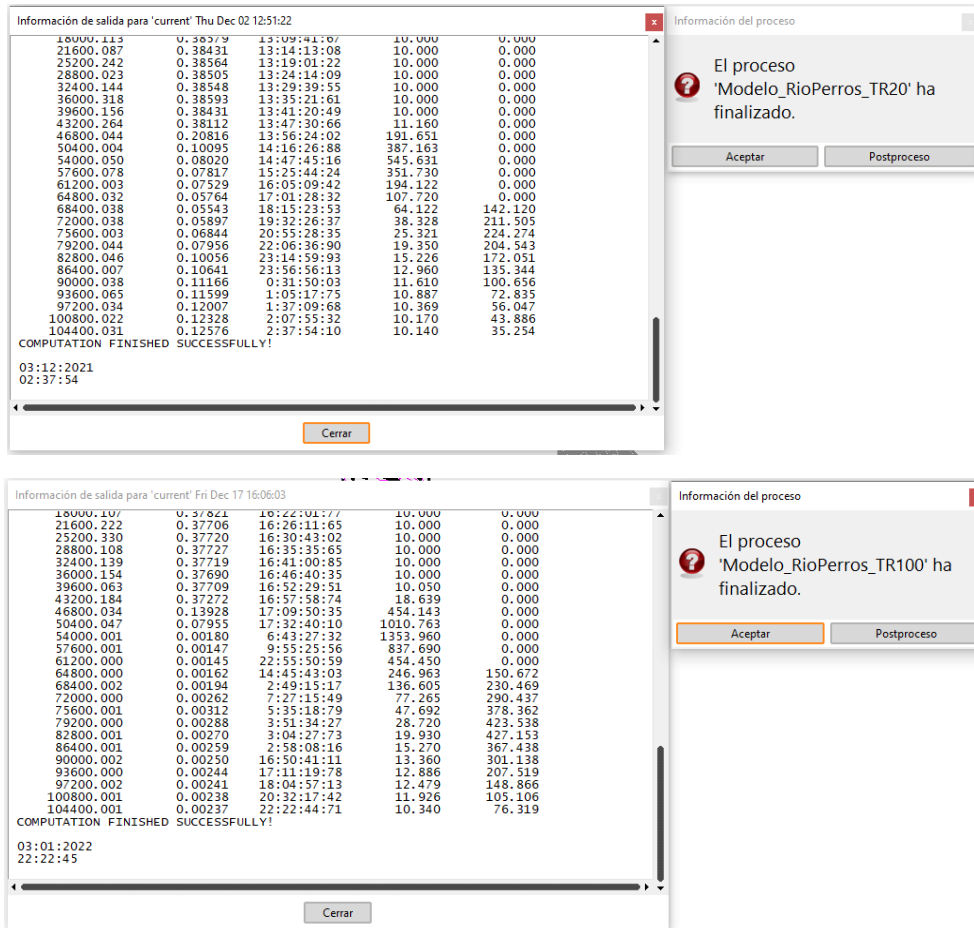


Figura 6.32. Ventana de proceso y término de simulación.

Al término de la simulación se procede a cambiar a la ventana de **Post-Proceso** para visualizar la forma computacional del flujo de agua dentro de la zona de estudio. Se muestra la forma general de la zona (Figura 6.33), la entrada del hidrograma (Figura 6.34).

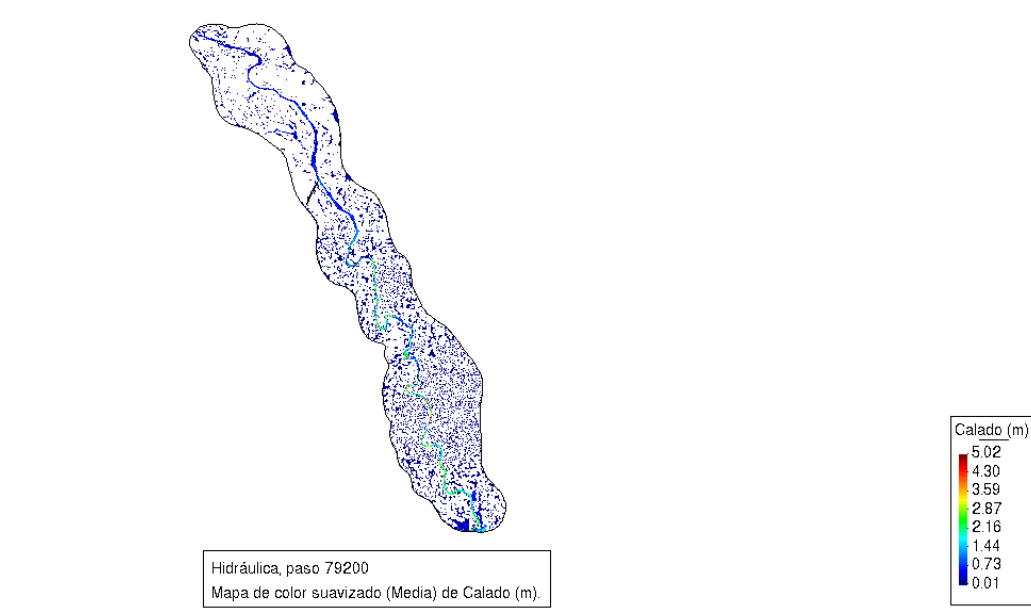


Figura 6.33. Vista general de la zona de estudio con nivel de calado.

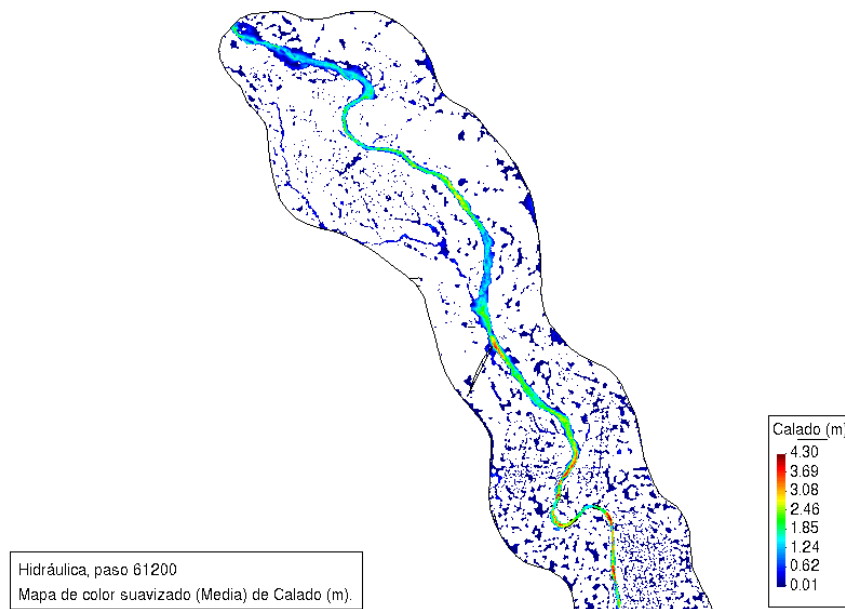


Figura 6.34. Vista de la entrada del hidrograma.

CAPITULO 7. ANALISIS DE RESULTADOS

La situación actual del cauce del río Los Perros se puede observar en la Figura 7.1. En la primera ciudad en estudio denominada Ciudad Ixtepec con una población de 28,082 habitantes (INEGI, 2020) no se observan obras de encauzamiento, el río está delimitado de forma natural con algunos niveles de bordos con vegetación en sus costados.



Figura 7.1. Sección del río Los Perros, Ciudad Ixtepec, Oaxaca.

En la zona sur se localizan las ciudades de Asunción Ixtaltepec y Juchitán de Zaragoza que cuentan con una población de 15,261 y 113,570 habitantes respectivamente (INEGI, 2020). La zona de Ixtaltepec no cuenta con obras pero se observa que el cauce natural está delimitado por vegetación en sus costados, Figura 7.2. En el sitio de Juchitán al ser la ciudad más grande en la zona de estudio si cuenta en partes del cauce con obras de protección, éstas son desde muros de mampostería hasta bordos construidos con el mismo suelo en los costados, Figuras 7.3 y 7.4.



Figura 7.2. Sección del río Los Perros, Ciudad Ixtaltepec, Oaxaca.



Figura 7.3. Sección del río Los Perros con obra de protección, Juchitán, Oaxaca.



Figura 7.4. Sección del río Los Perros con bordes en cauce, Juchitán, Oaxaca.

MODELO IBER

Al realizar la simulación con el modelo bidimensional IBER se puede observar diferentes resultados, al simular los periodos de retorno a 20, 50 y 100 años principalmente debido a que son periodos en los que se consideran de diseño para obras de protección. A continuación, se realiza un análisis detallado de las simulaciones.

Simulación para TR 20 años

Al observar el comportamiento del río Los Perros con las condiciones mencionadas en capítulos anteriores y con un TR de 20 años se pueden visualizar ciertas zonas en donde el cauce del río aumenta, Figura 7.5.

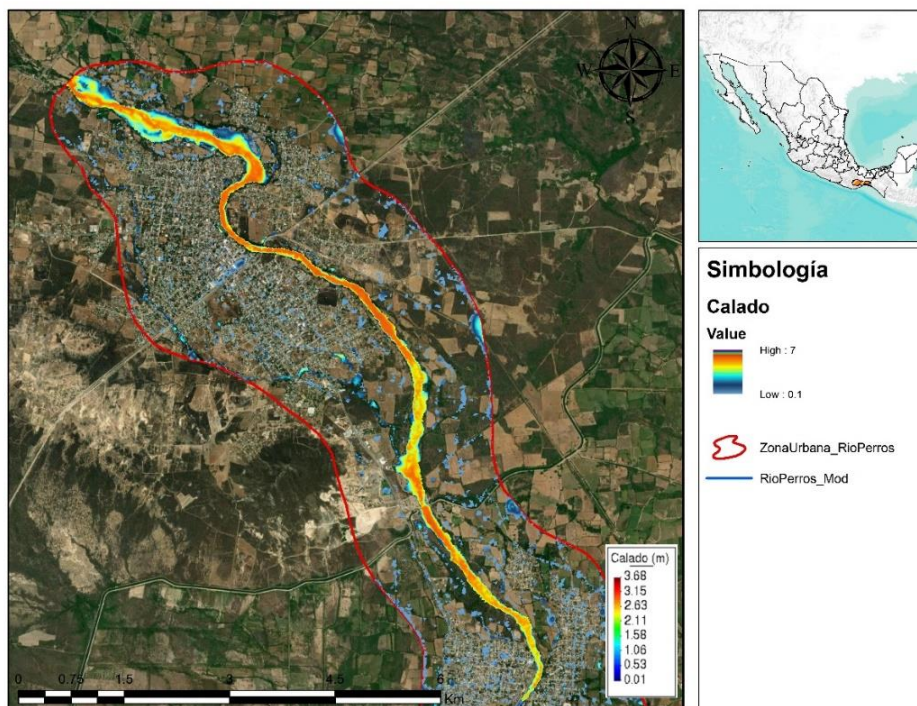


Figura 7.5. Resultado en el tiempo 57600 s, para un TR 20 años.

En la modelación en esta zona se observa un nivel de profundidad de agua hasta 3 metros que afecta a las partes cercanas al río, aunque se observa un desbordamiento para este periodo de retorno, es en una zona donde no se localizan viviendas, Figura 7.6.

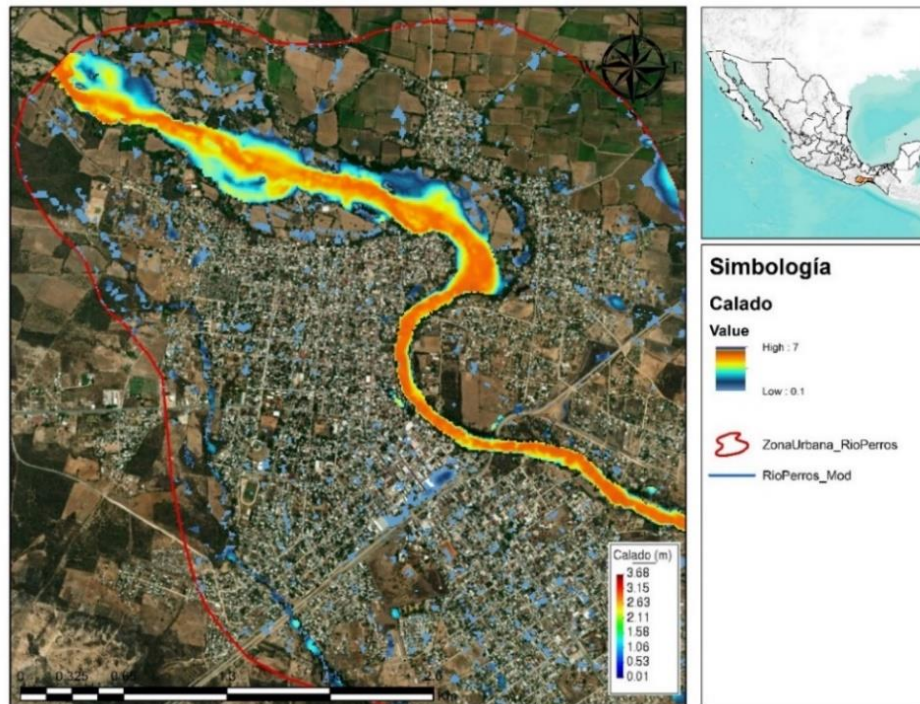


Figura 7.6. Avenida TR 20 años, Ciudad de Ixtotec.

Para las velocidades en esta zona se observan valores de hasta 5.0 m/s en la parte alta de la ciudad, esto se debe a que las pendientes provenientes aguas arriba de la zona de estudio en específico de la cuenca del río Los Perros son mayores que las que se tiene aguas abajo, estas velocidades se muestran en la Figura 7.7.

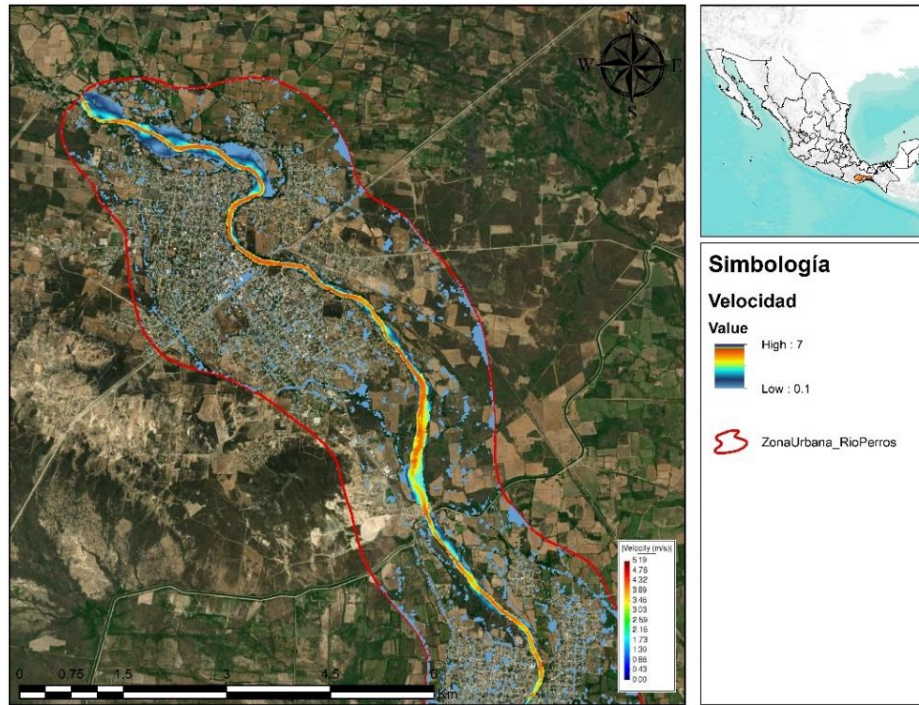


Figura 7.7. Velocidades TR 20 años, Ciudad Ixtepec.

En cuestión de los valores de calado y velocidad para las ciudades de Ixtaltepec y Juchitán, se observan valores de 4 metros en la profundidad de agua (Figura 7.8) y velocidades de 6 m/s (Figura 7.9), la profundidad y velocidad para este periodo de retorno no cuenta con un desbordamiento importante y estos valores se sitúan dentro del cauce del río.

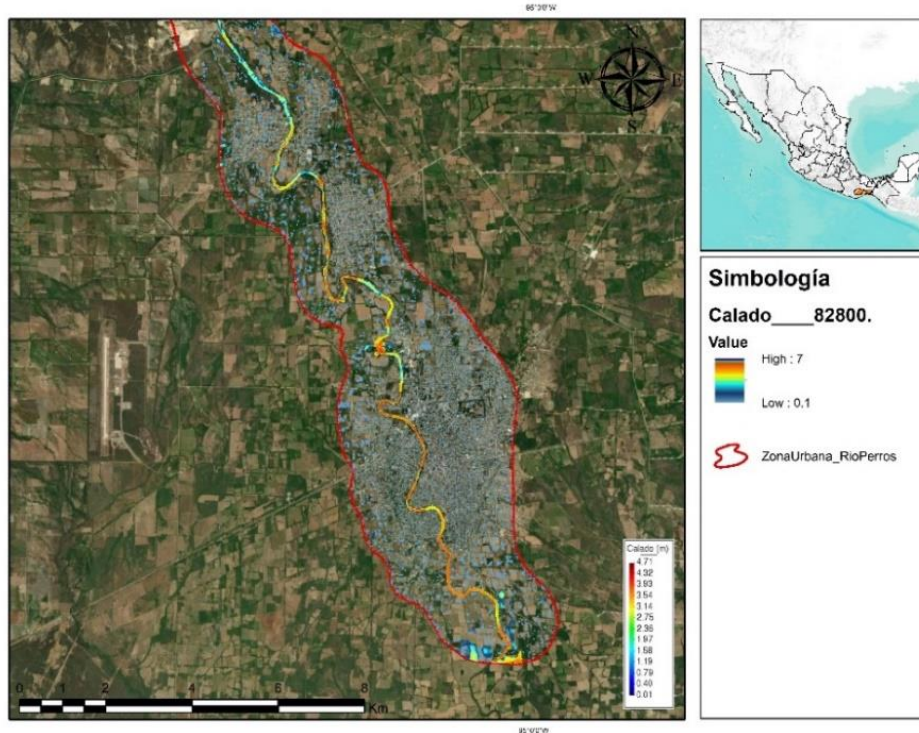


Figura 7.8. Mapa de profundidad de agua para TR 20 años, Ciudades de Ixtaltepec y Juchitán, Oaxaca.

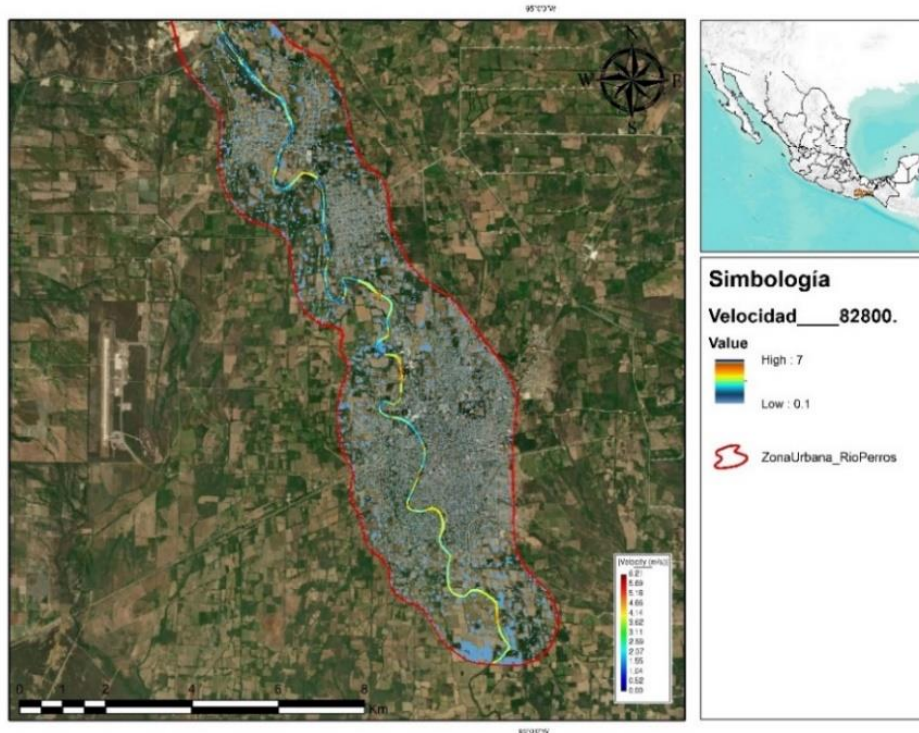


Figura 7.9. Mapa de velocidades TR 20 años, Ciudades de Ixtaltepec y Juchitán, Oaxaca.

Simulación para Tr 50 Años

Para el periodo de retorno de 50 años se observa una profundidad de agua máxima de 4.99 metros, en la ciudad de Ixtepec (Figura 7.10) no se observa un desbordamiento importante, pero en zonas en donde no se cuenta con alguna obra de protección se llega a una profundidad del orden de 1.36 metros sin contar con viviendas afectadas.

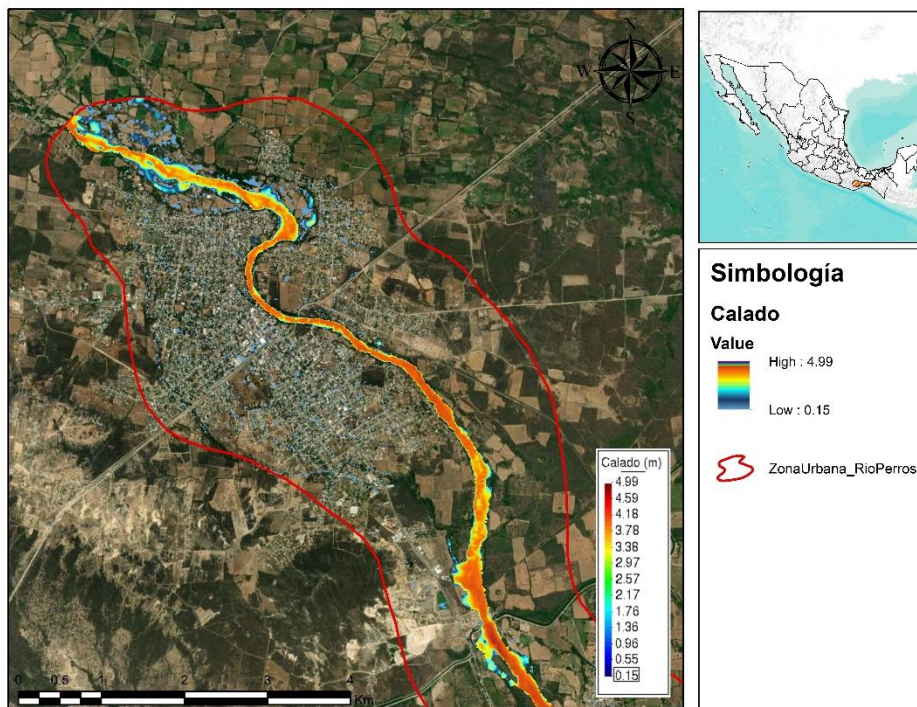


Figura 7.10. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtepec para un TR 50 años.

Para la ciudad de Ixtaltepec se observa una profundidad mayor que en la parte de la ciudad de Ixtepec, el tirante de agua está por el orden de los 4.99 metros desbordando cerca de viviendas con una colindancia corta con respecto al río. En las partes en donde ocurre un desbordamiento se cuenta con un valor de profundidad de 1.76 a 4.18 metros. Figura 7.11.

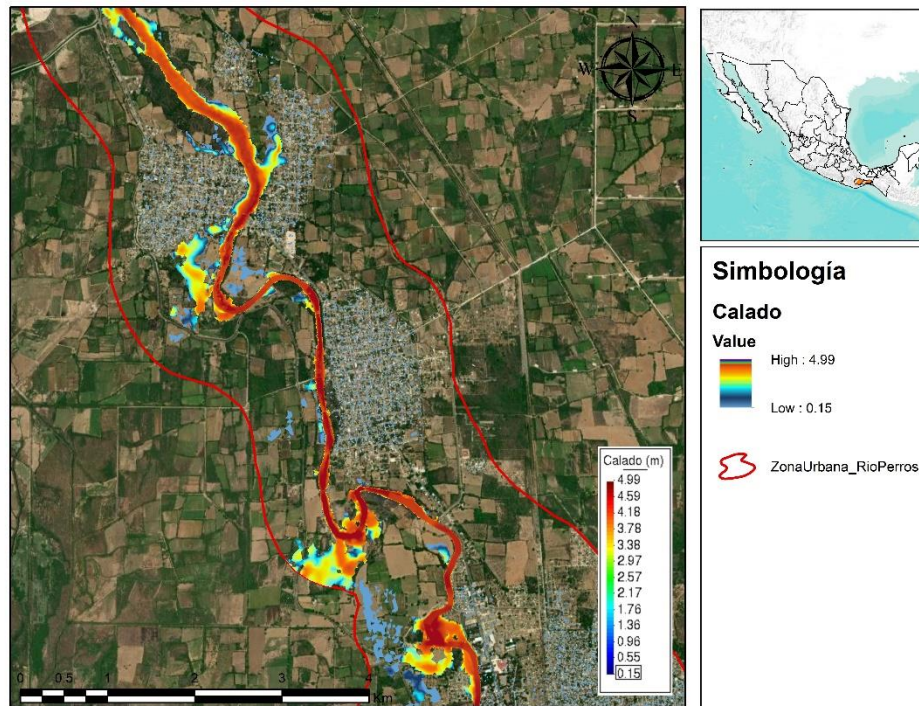


Figura 7.11. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 50 años.

La ciudad de Juchitán es afectada por los flujos presentados en la ciudad de Ixtaltepec que es la zona aguas arriba en la parte poniente, al observar el comportamiento del río en el paso por la ciudad no se observa un desbordamiento dentro de la ciudad, aunque si en la parte sur y salida del río con una profundidad de agua entre 1.16 a 4.59 metros, Figura 7.12.

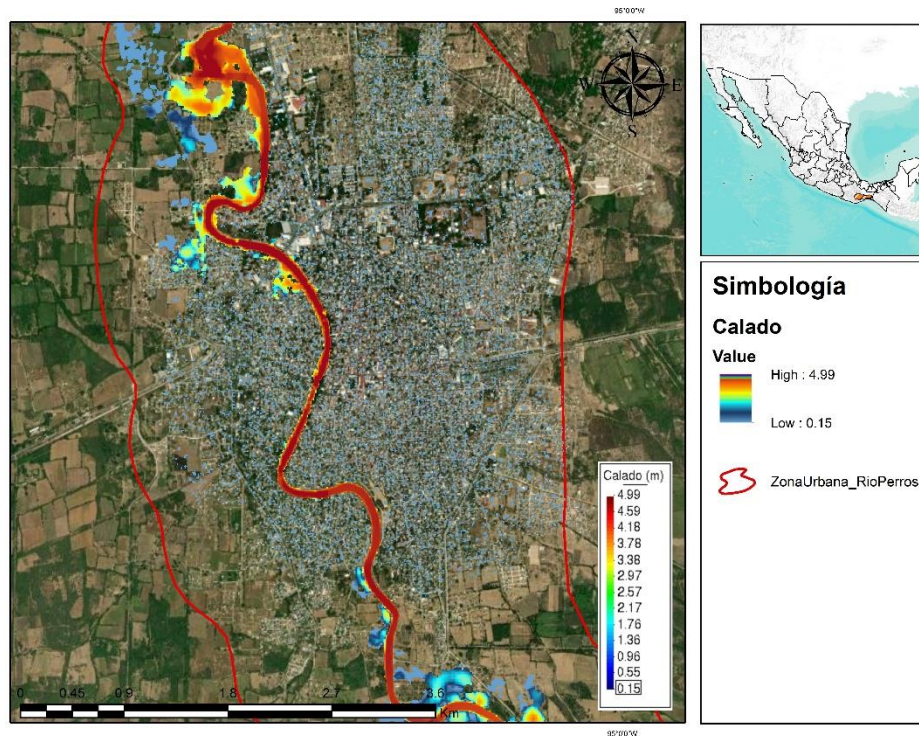


Figura 7.12. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 50 años.

En cuestión de las velocidades para el periodo de retorno de 50 años en la ciudad de Ixtepec los valores son del rango de 1.13 a 6.79 m/s en donde el valor más significativo se presenta dentro del cauce del río y los valores más bajos fuera de este y en zonas en donde no se localizan viviendas principales. Figura 7.13.

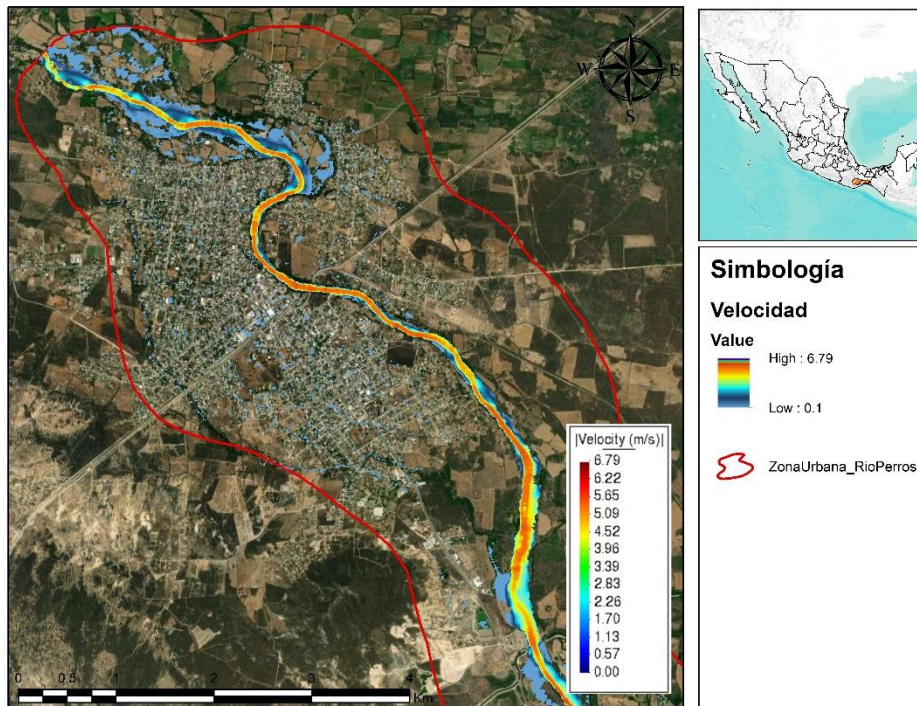


Figura 7.13. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 50 años.

En la ciudad de Ixtaltepec las velocidades mayores continúan presentándose dentro del cauce del río, aunque al observar el desbordamiento en diferentes zonas estas llegan a tener una velocidad entre 1.13 a 1.70 m/s ampliándose el área de afectación fuera del cauce del río, principalmente en la colonia “Centenario” en donde empieza a verse esta afectación. Figura 7.14.

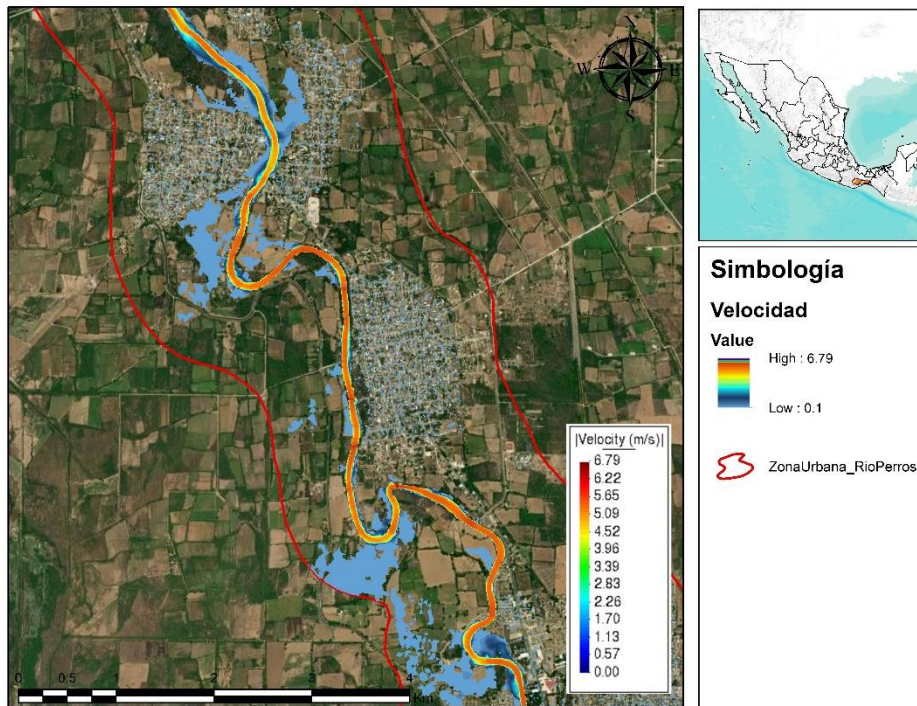


Figura 7.14. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 50 años.

En la ciudad de Juchitán las velocidades continúan dentro de cauce del río, las predominantes son las que anteceden de aguas arriba y en la salida de la zona de estudio, estas velocidades son entre 0.57 a 2.26 m/s sin afectar viviendas de la ciudad, las velocidades dentro del cauce tienen un valor de 4.52 a 5.65 m/s. Figura 7.15.

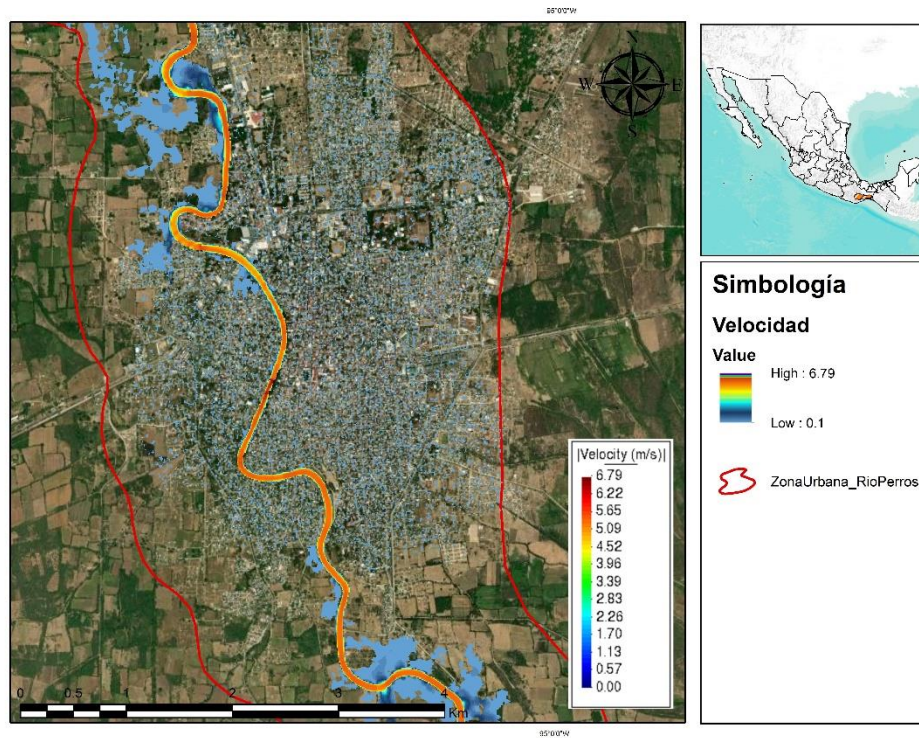


Figura 7.15. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 50 años.

TR 100 Años

Para el periodo de retorno de 100 años la profundidad del agua aumenta de una forma considerable provocando desbordamientos con una mayor afectación. La ciudad de Ixtepec al ser la primera ciudad no se observan desbordamientos importantes en las zonas urbanas, aunque si en las zonas en donde ingresa el hidrograma, los desbordamientos fuera de cauce del río son del orden de 1.33 a 2.51 metros de profundidad, Figura 7.16.

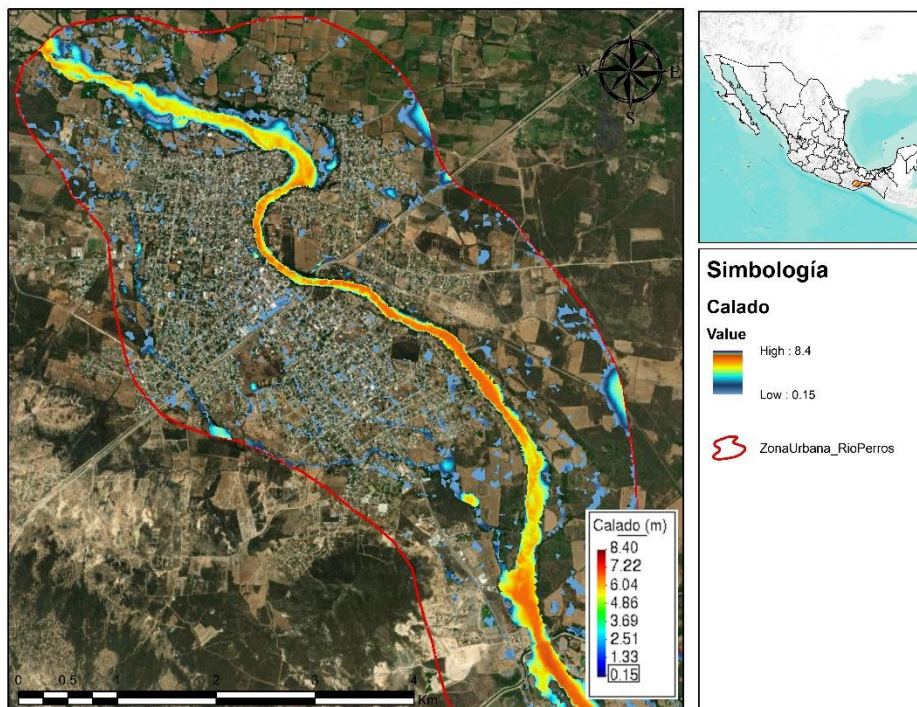


Figura 7.16. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtepec para un TR 100 años.

La ciudad que más se afecta es la de Ixtaltepec al contar con desbordamientos dentro de la zona urbana, los valores llegan a una profundidad de agua de 6.04 metros en la que afecta varias viviendas cercanas al río. Figura 7.17. La colonia más afectada por esta avenida es la denominada Centenario en donde se observa una afectación de 4 a 5 cuadras de viviendas.

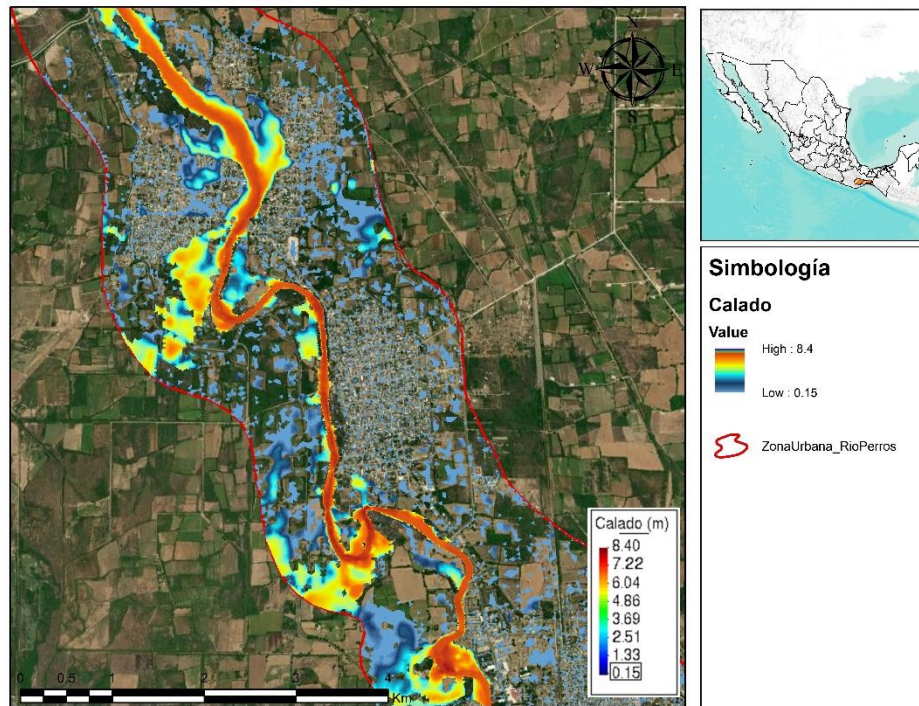


Figura 7.17. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.

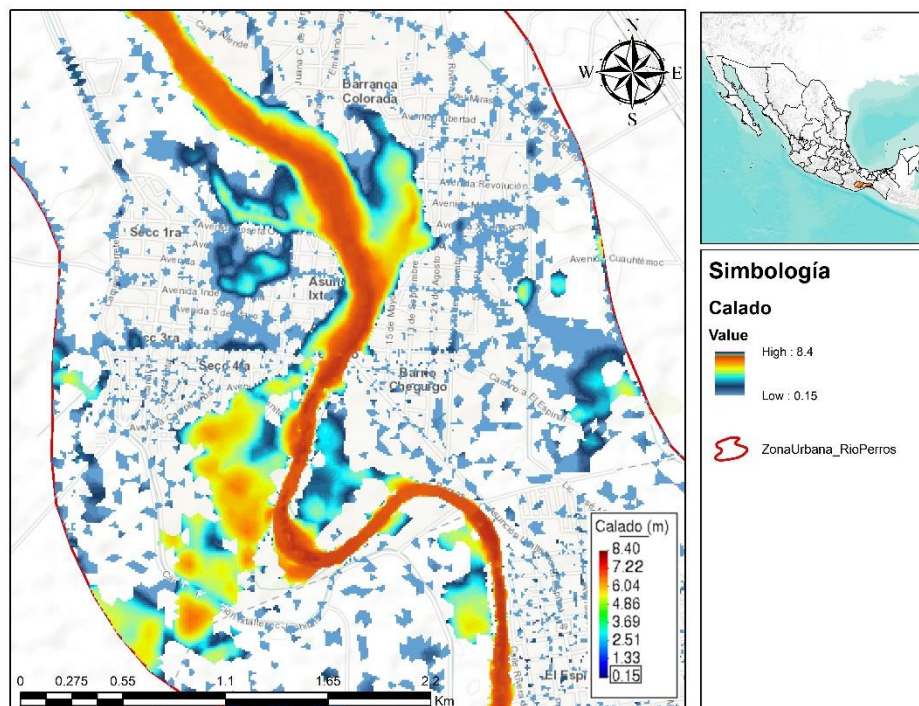


Figura 7.18. Afectación en zona urbana, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.

En la zona donde se observa el desbordamiento con una profundidad mínima de 15 centímetros y hasta de 3.69 metros se localizan viviendas como las que se muestra en la Figura 7.19.



Figura 7.19. Tipo de vivienda, ciudad Ixtaltepec.

En la zona afectada al observar el cauce del río se puede notar que no hay obras que permitan dar seguridad a la zona urbana y que mitigue la afectación a las viviendas cercanas. Figura 7.20.



Figura 7.20. Cauce del río Los Perros en condición actual, ciudad Ixtaltepec.

La ciudad de Juchitán se ve afectada en la zona poniente por parte de los desbordamientos provenientes de la ciudad de Ixtaltepec con un orden de entre 1.33 a 6.04 metros de profundidad de agua fuera del cauce. La zona que se afecta es la de los fraccionamientos Reforma y los Fresnos, ambas en la parte poniente del río. Figuras 7.21 y 7.22.

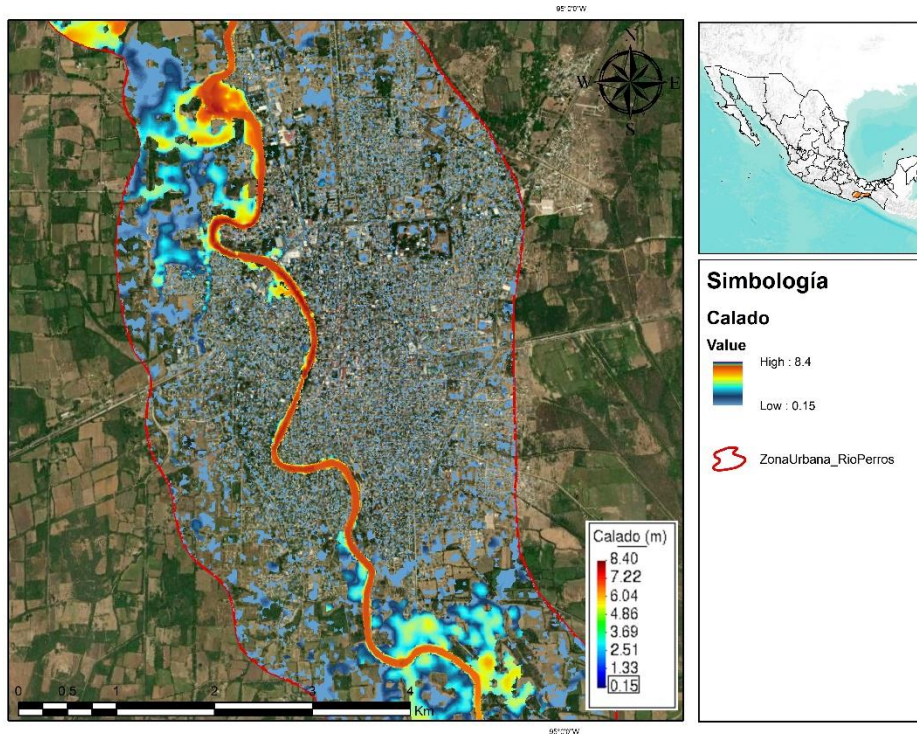


Figura 7.21. Resultado de la profundidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 100 años.

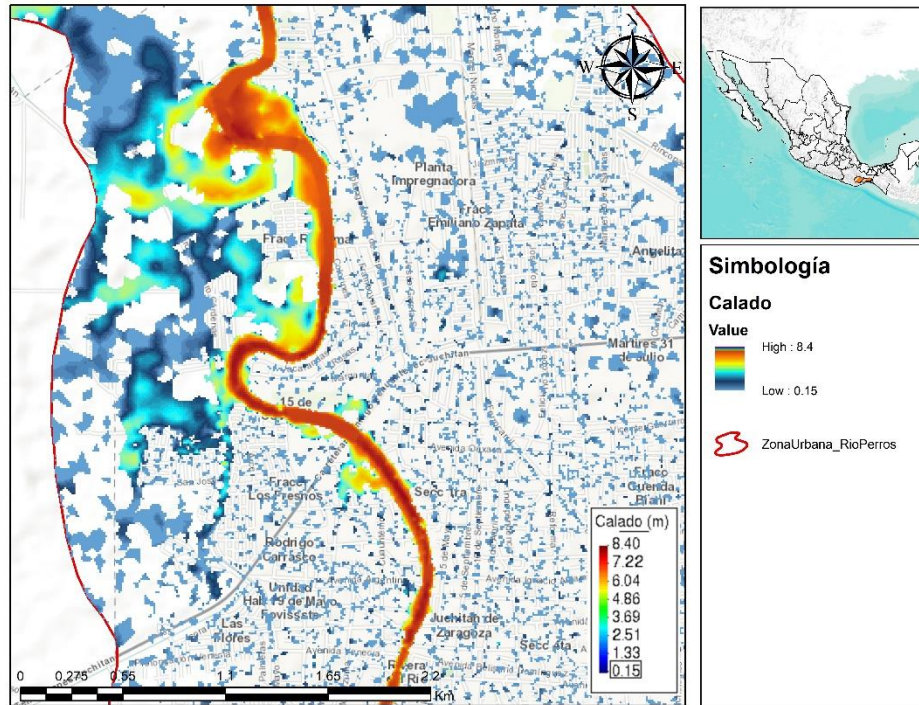


Figura 7.22. Afectación en zona urbana, Ciudad Juchitán para un TR 100 años.

En las velocidades que se desarrollan fuera del río, en la ciudad de Ixtepec está en el rango de 1.25 a 2.50 m/s similares al periodo de retorno de 50 años, dentro del cauce se desarrollan velocidades más elevadas de hasta 6.25 m/s, Figura 7.23.

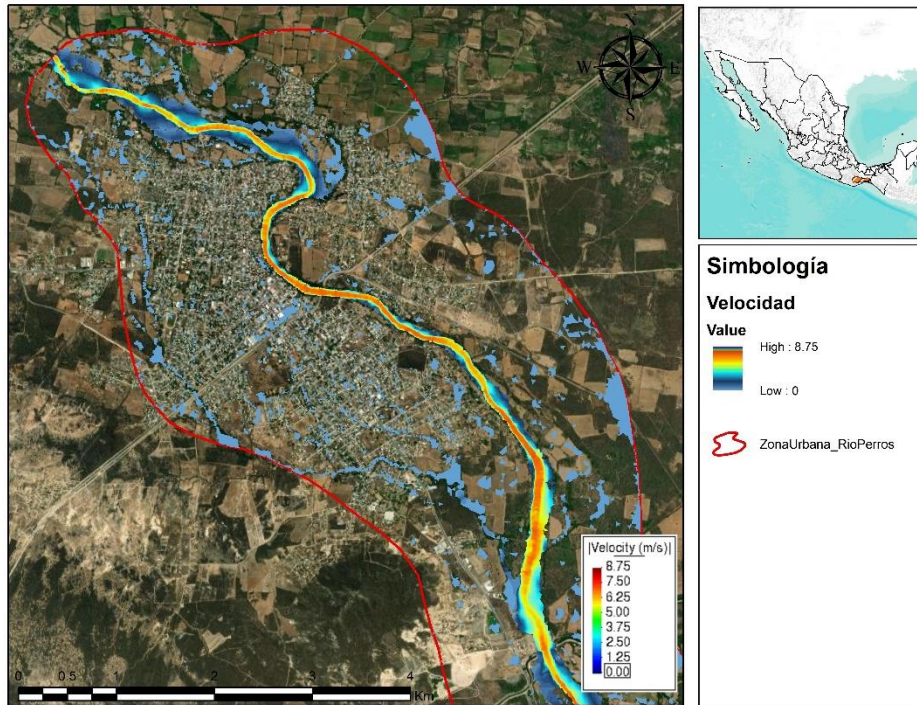


Figura 7.23. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.

En la ciudad de Ixtaltepec de igual manera se observan resultados similares a las del TR 50 pero la diferencia es que abarca una mayor área de afectación, que llega a la zona urbana con velocidades fuera del río de 1.25 a 2.50 m/s y dentro del cauce del orden de los 6.25 m/s, Figura 7.24.

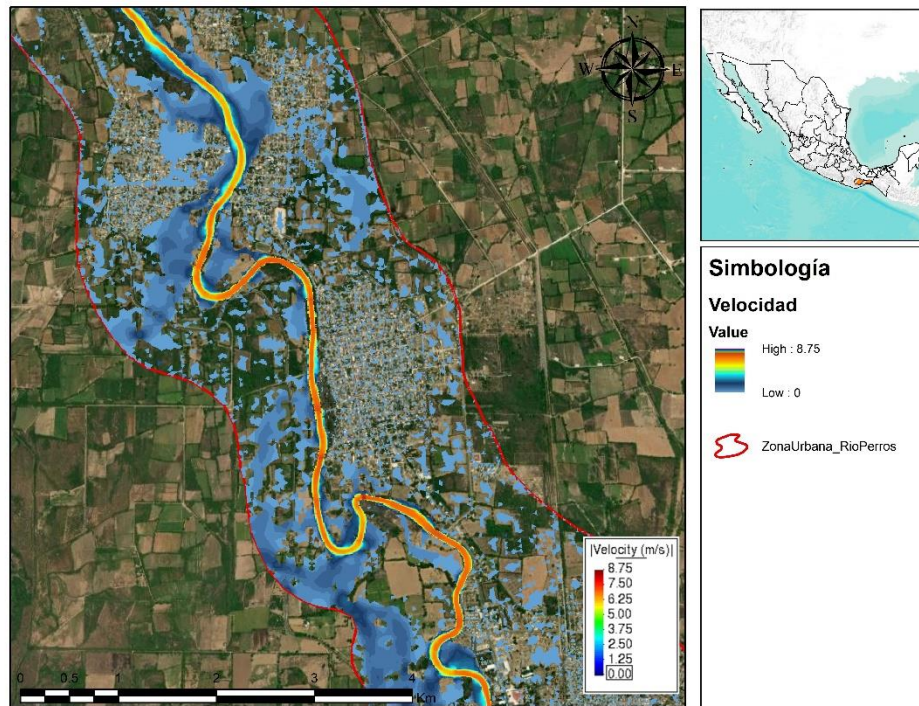


Figura 7.24. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Ixtaltepec para un TR 100 años.

En Juchitán de igual forma se amplía la zona de desbordamiento, aunque las velocidades no son muy grandes fuera del río generan afectaciones a las viviendas de la zona poniente de la ciudad, Figura 7.25.

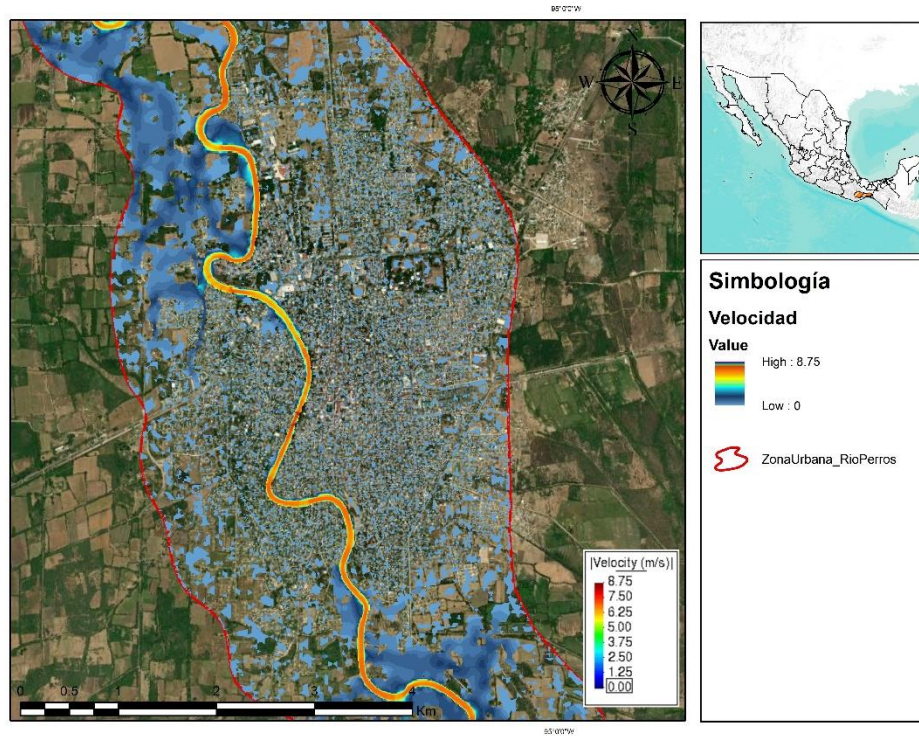


Figura 7.25. Resultado de la velocidad en el tiempo 68400 s, Ciudad Juchitán para un TR 100 años.

CONCLUSIONES

El Modelo para Pronóstico de Esgurrimento (MPE) es una herramienta para estimar el hidrograma de escurrimento, que al ser un modelo de parámetros distribuidos considera de una forma más sencilla las pérdidas por evapotranspiración que se presenta en el intervalo de una tormenta a otra. Con apoyo en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite dividir la cuenca en partes pequeñas “píxeles” cada una con características específicas y con los modelos numéricos de terreno (MNT) dar seguimiento a las diferentes trayectorias del escurrimento directo hasta llegar al sitio de estudio distribuyendo la lluvia con el método de Shepard.

En la obtención del Factor de Reducción por Área (FRA) de la región hidrológica 22 que pertenece la zona de estudio de la presente tesis, se tomaron en cuenta un total de 17 estaciones de las 4 regiones en que se dividió la región hidrológica obtenida del estudio de regionalización realizado por el Instituto de Ingeniería en 2017 para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Se obtuvo un FRA con un coeficiente de determinación de 0.885 considerando como bueno el ajuste. Para mejorar el FRA es necesario contar con un mayor número de registros y de estaciones para la región y poder estimar de una forma más exacta estos factores.

Para la cuenca del río Los Perros los parámetros de calibración se tuvieron que ajustar a los registros medidos en la estación hidrométrica y en las estaciones climatológicas más cercanas, con el cual el evento del año de 1997 con el que se calibró el modelo y por el registro de los gastos máximos instantáneos de la estación hidrométrica, resultó ser el más adecuado para la estimación de las tormentas estadísticas y posteriormente las avenidas de diseño.

Para obtener avenidas de diseño posteriores al año 2000 es necesario que las estaciones climatológicas tengan un registro más amplio ya que algunas estaciones fueron suspendidas antes de este año, como lo es la estación 20052 (Ixtaltepec), que se encuentra cerca de la zona de estudio y modelación, pero sólo tiene registro hasta el año de 1982. Por este motivo se debe tener en cuenta la correcta operación tanto de las estaciones climatológicas como hidrométricas en sus respectivas mediciones.

Al realizar la estimación de avenidas de diseño es importante mencionar que el modelo LIDAR que encontramos en la página del INEGI no está depurada adecuadamente, esto debido a que en capítulos anteriores se tuvo de depurar el modelo en la zona del río, ya que presentaban desviaciones de flujos de agua en simulaciones de prueba. Con ayuda del SIG se depuró de una forma que conservara las elevaciones más apegadas a la realidad, eliminando elevaciones pertenecientes a los árboles y estructuras de paso como lo son puentes vehiculares, por lo que la calidad de esta información no es muy confiable y genera un margen de error en los resultados.

El modelo bidimensional IBER es una herramienta útil para simular las avenidas obtenidas para la zona de estudio. Las mallas utilizadas otorgan precisión en la zona del río (6 metros) y en la zona urbana (25 metros) donde se centra el análisis de inundación en las ciudades por las que pasa el río Los Perros. La asignación de los valores de rugosidad y uso de suelo se asignaron de forma manual, pero con base en los usos de suelo del INEGI para esta zona de estudio.

Al observar el comportamiento del río con avenidas de diseño a diferentes periodos de retorno para los resultados obtenidos del modelo bidimensional, en específico en los TR de 20, 50 y 100 años, se observan velocidades mayores a 5 m/s por lo que se recomienda realizar un análisis posterior de erosión y sedimentación para el cauce del río y sus alrededores, por considerarse una velocidad elevada que provocaría un deterioro sobre la superficie de contacto del río, llevando sedimentos a las partes en donde la velocidad disminuye como son las partes cercanas al cauce en los puntos de desbordamiento.

Las profundidades de agua que se obtienen son de un valor máximo de 4.86 – 6.04 metros fuera del cauce del río, estos valores se presentan en la avenida de diseño de 100 años periodo de retorno. Es importante evaluar el daño con este valor de profundidad para las zonas afectadas, ya que abarca parte de zona habitacional, más específico en el fraccionamiento denominado “Reforma” de la ciudad de Juchitán, Oaxaca.

Al obtener los resultados de las profundidades y velocidades en las tres ciudades, se da una base para poder realizar mapas de vulnerabilidades físicas como lo desarrolla el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) junto con mapas y curvas de severidades en la combinación de la profundidad y la velocidad.

En México actualmente no se cuenta con una definición por parte de una entidad de gobierno de lo que se puede considerar un encharcamiento o una inundación, lo que provoca que sea un análisis muy subjetivo ya que no se establece un valor mínimo para poder considerarse una inundación y se basa más cuando se presenta alguna afectación en viviendas o infraestructura.

Con lo que se cuenta actualmente es con la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (<https://public.wmo.int/es>) que menciona que a partir de 8 pulgadas (20.32 cm) de profundidad de agua, ya se considera una inundación. Si nos basamos en la definición de la OMM se pueden identificar zonas en donde la profundidad del agua es superior a 20 centímetros y empieza a tener una afectación en las viviendas, en donde se podrán desarrollar los análisis de costos por afectación de vulnerabilidad física y que dependerán de las condiciones de las viviendas como del material con que estén construidas, para nuestro estudio se contempló una profundidad de 15 cm para observar la zona de afectación.

Para mitigar afectaciones en zonas urbanas o en zonas de cultivo se pueden proponer diferentes sistemas de protección y regulación en el cauce, como son el levantamiento de bordos o sistema de represas en la parte aguas arriba de la cuenca del río Los Perros en donde su topografía es más detallada, esto para aumentar su tiempo de concentración y propiciar más la infiltración solventando el gasto máximo de las avenidas.

Este estudio da el inicio para análisis posteriores en la zona, ya que en últimos años ha registrado diferentes desbordamientos del cauce del río Los Perros como lo es la zona de la ciudad de Juchitán que en el año 2021 registró la afectación de viviendas y en donde al ver la simulación con un TR de 100 años se puede corroborar este suceso. Aunque no se contempló el registro del 2021 al no estar todavía en la base de datos, da como necesidad de contar con registros lo más actualizados posibles, para estimar nuevas avenidas de diseño que lleguen a presentarse en años posteriores.

REFERENCIAS

1. Aparicio Mijares, Francisco Javier. (2017) *“Fundamentos de Hidrología de Superficie”*, Ed. Limusa, México.
2. Baeza Ramirez, Carlos. (2007) *“Estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia”*, Tesis Maestría Posgrado UNAM.
3. Becerril Olivares, Mauricio. (2018) *“Estimación de Avenidas de Diseño para los Ríos del Oriente Utilizando Análisis Estadístico y la Mayoración de Tormentas Históricas”*, Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México.
4. Bladé, E., Cea, L., Correstein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014) *“Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”*. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 30(1) pp. 1-10.
5. Breña Puyol, A. Felipe, Jacobo Villa, M. Antonio. (2006) *“Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial”*, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
6. Domínguez Mora, Ramón, Arganis Juárez, Maritza Liliana, Carrizosa Elizondo, Eliseo, Fuentes Mariles, Guadalupe Esther, Hincapié López, Carolina. (2017) *“Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana, Tomo II”*, Instituto de Ingeniería UNAM.
7. Domínguez Mora, Ramón, Baldemar Méndez, Antonio, Esquivel Garduño, Gabriela y Mendoza Resendiz, Alejandro. (2008) *“Manual del Modelo de Pronóstico de Esguerrimiento MPE”*, Instituto de Ingeniería UNAM.
8. Escalante Sandoval, Carlos Agustín y Reyes Chávez, Lilia. (2020) *“Hidrología Urbana”*, Apuntes. Posgrado de Ingeniería UNAM, México.
9. Escalante Sandoval, Carlos Agustín y Reyes Chávez, Lilia. (2008) *“Técnicas Estadísticas en Hidrología”*, Facultad de Ingeniería, México.

10. Hincapié López, Carolina. (2016) *“Actualización de las Avenidas de Diseño y de las Políticas de Operación del Sistema de Presas del Río Santiago”*, Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México.
11. Labrada Montalvo, Patricia. (2018) *“Análisis regional para lluvias de diseño con duraciones menores a un día”*, Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México.
12. Martínez Cocoltzi, Adrián Alejandro. (2017) *“Regionalización de Datos de Escurrimiento para la Estimación de Avenidas de Diseño en la Región Hidrológica 30”*, Tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, México.
13. Sánchez Martínez, Sinuhé Alejandro. (2017) *“Actualización de los factores de reducción por área para distintas regiones de la república mexicana”*, Tesis Maestría Posgrado UNAM.
14. Torres, N. (2013). *“Obtención de Factores de Reducción por Área usando el método de Regionalización. Aplicación a la Cuenca del Río Sonora”*, Tesis de Maestría Posgrado UNAM, México.