



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**MODELACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE ÁREAS CON
RIESGOS DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO LA
SIERRA, EN LOS ESTADOS CHIAPAS Y TABASCO, MÉXICO**

RODRIGO ROBLERO HIDALGO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

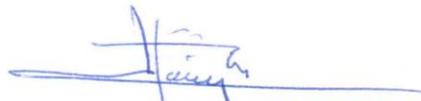
2013

La presente tesis titulada: **“Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgos de inundación en la cuenca del río La Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco, México”**, realizada por el alumno: Rodrigo Roblero Hidalgo, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Jesús Chávez Morales

ASESOR



Dr. Oscar L. Palacios Vélez

ASESOR



Dr. Ramón Arteaga Ramírez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2013

Agradecimientos

Gracias a Dios por darme la oportunidad de vida, por cumplir mi sueño, de terminar una etapa más de mi preparación, por llenarme de alegría y guiarme en el camino del bien.

Al CONACYT, Colegio de Postgraduados y al Postgrado de Hidrociencias, por brindarme todo el apoyo y permitirme ser parte de su gran historia.

A la Empresa Manejo Integral de Cuencas S.A. de C.V. Por cobijarme en sus instalaciones y encontrar en todos, compañeros de trabajo y amigos.

A la Maestra Elibeth Torres Benites, quien me brindó todo su apoyo moral y técnico y que debería estar en mi Consejo Particular y en el Jurado y que por razones de fuerza mayor no le fue posible.

Al Dr. Jesús Chávez Morales, por toda la paciencia y dedicación que me ha brindado, por llenarme de conocimiento y por ser un ejemplo a seguir.

A los Doctores Oscar Palacios Vélez y Ramón Arteaga Ramírez por sus atinadas observaciones recomendaciones y guía para mejorar mi trabajo.

A todos los profesores que me han llenado de conocimiento y apoyo a lo largo de mi vida.

Dedicatoria

A mis queridos padres: Romelia Hidalgo Domínguez y Rodrigo Néstor Roblero Herrera, por todo el apoyo que me han brindado, así como la formación que desde casa he recibido, lo que soy se los debo a ellos.

A mis hermanos: Mario Antonio, Ausencio Heredi, Néstor Alberto, por todo el cariño incondicional.

A mis abuelos: Arturo (†) y Elvira, Felicidad (†) y Eluvia (†), por esa calidad humana, que me han regalado.

A Elibeth Torres Benites, mi admiración por ser una mujer de lucha, le agradezco por todo ese apoyo que me ha brindado, por la confianza y por ser parte de mi formación profesional.

A mis sobrinos (as): Karen, Luis Antonio, Mauricio, Viviana, Eduardo, Yordi, Axel y Alejandro por llenar mi vida de alegría.

A la familia Hidalgo Domínguez y Roblero Herrera, por brindarme todo el apoyo y contar siempre con ellos.

Para la familia Torres Benítez, al Profesor Luis y Cecilia, por esa calidez humana y humildad que los representa.

Para mis siempre amigos: Armando y Vale por contar en todo momento con su apoyo.

Sinceramente

Rodrigo Roblero Hidalgo

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	3
2.1. HIPÓTESIS	3
2.2. OBJETIVO GENERAL.....	3
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	4
3.1. CAUSAS QUE GENERAN UNA INUNDACIÓN.....	4
3.2. INUNDACIONES EN EL MUNDO	5
3.3. INUNDACIONES EN MÉXICO	6
3.4. INUNDACIONES EN TABASCO	8
3.5. MEDIDAS DE MITIGACIÓN CONTRA INUNDACIONES	8
3.5.1. Reforestación, prácticas de conservación de suelo y agua	8
3.5.2. Medidas estructurales.....	9
3.5.3. Acciones institucionales.....	10
CAPÍTULO 4. REVISIÓN DE LITERATURA	12
4.1. EL CICLO HIDROLÓGICO.....	12
4.1.1. Precipitación	15
4.1.2. Intercepción	17
4.1.3. Evapotranspiración	21
4.1.4. Infiltración	28
4.1.5. Escurrimiento superficial.....	32
4.2. CUENCA HIDROLÓGICA	35
4.2.1. Definiciones	36
4.3. ESTUDIO DE CUENCAS HIDROLÓGICAS	36
4.3.1. Delimitación digital	37
4.3.2. Compilación de la información	37
4.3.3. Reconocimiento preliminar.....	38
4.3.4. Elaboración de mapas de cuencas a partir de información cartográfica.....	38
4.3.5. Topografía	38
4.3.6. Parteaguas	40
4.3.7. Hidrografía.....	40

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	41
4.4.1. Parámetros lineales asociados a la hidrografía	41
4.4.2. Parámetros lineales y de área de la cuenca.....	47
4.4.3. Parámetros asociados al relieve	51
4.4.5. Tiempo de concentración.....	53
4.5. ANÁLISIS METEOROLÓGICO.....	53
4.5.1. Acervo de la información meteorológica.....	53
4.5.2. Integración de datos meteorológicos.....	54
4.5.3. Cálculo de datos faltantes.....	54
4.5.4. Análisis meteorológico	54
4.5.5. Análisis de la información de precipitación.....	54
4.6. ANÁLISIS HIDROMÉTRICO	56
4.6.1. Hidrometría	56
4.6.2. Estaciones hidrométricas	57
4.6.3. Acervos de información hidrométrica	58
4.6.4. Análisis de la información hidrométrica	58
4.7. MODELOS	60
4.7.1. Importancia de los modelos	60
4.7.2. Clasificación de los modelos.....	61
4.8. MODELACIÓN EN CUENCAS HIDROLÓGICAS	62
4.8.1. Modelos hidrológicos	62
4.8.2. Modelos hidráulicos	64
4.9. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL SISTEMA MIKE	71
4.9.1. Modelación de la evapotranspiración en MIKE SHE	79
4.9.2. Modelación de la infiltración con MIKE SHE	83
4.9.3. Modelación del flujo superficial en cuencas hidrológicas.....	90
4.10. MODELACIÓN HIDRÁULICA CON EL MODELO MIKE 11	93
4.10.1. Estructura integrada por módulos	94
4.10.2. Componentes del modelo	95
4.11. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	97
4.11.1. Modelo Nash.....	98
4.12. PROPUESTAS DE OBRA CONTRA INUNDACIONES	99
4.12.1. Acciones estructurales para evitar o reducir inundaciones	99

4.12.2. Acciones estructurales para evitar o reducir inundaciones por lluvia local...	100
4.12.3. Acciones no estructurales para evitar o reducir inundaciones	100
CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS	101
5.1. MATERIALES.....	101
5.1.1. Ubicación de la zona de estudio	104
5.1.2. Reconocimiento preliminar de campo	109
5.2. MÉTODOS	111
5.2.1. Elaboración del mapa base de la cuenca hidrológica.....	113
5.2.2. Caracterización de la cuenca hidrológica.....	115
5.2.3. Análisis hidrometeorológico	133
5.2.4. Modelación hidrológica con el modelo MIKE SHE.....	174
5.2.5. Simulación del proceso lluvia-escorrimento.....	192
5.2.6. Modelación hidráulica con el modelo MIKE 11	195
CAPÍTULO 6. RESULTADOS.....	217
6.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO	217
6.2. VALIDACIÓN.....	223
6.3. ESTIMACIÓN DE ZONAS DE RIESGO	228
6.4. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	230
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	241
CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES	243
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA	244
ANEXOS.....	248

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Ciclo hidrológico.....	12
Figura 4.2. Representación del proceso de interceptación.....	17
Figura 4.3. Factores de efectos del escurrimiento, (Tetumo, 1993).....	33
Figura 4.4. Ciclo del escurrimiento, (De Weist, 1967)	34
Figura 4.5. Diagrama del escurrimiento, (Tetumo, 1993)	35
Figura 4.6. Parámetro área de una cuenca que influye en el escurrimiento superficial	47
Figura 4.7. Parámetro de la forma de una cuenca que influye en el escurrimiento superficial	48
Figura 4.8. Parámetro de sinuosidad del cauce que influye en el escurrimiento superficial	49
Figura 4.9. Efecto de la forma de la cuenca en los hidrogramas de salida.....	50
Figura 4.10. Clasificación de modelos.....	61
Figura 4.11. Representación esquemática del modelo MIKE SHE (Refsgaard et al., 1995)	73
Figura 4.12. Interface del modelo MIKE SHE.....	74
Figura 4.13. Parámetros de modelación y variables.....	78
Figura 4.14. Representación gráfica y datos de entrada de MIKE 11.....	94
Figura 4.15. Esquema centrado de Abbott de los 6 puntos	97
Figura 5.1. Cartas topográficas escala 1:50,000, que cubren el área de estudio	103
Figura 5.2. Imagen satelital del río La Sierra.....	104
Figura 5.3. Región hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta, (SRH, 1980).....	105
Figura 5.4. Ubicación de la cuenca del río La Sierra	106
Figura 5.5. Configuración de estaciones hidrométricas en los ríos La Sierra y Teapa (SRH, 1980).....	108
Figura 5.6. Río La Sierra a la altura de la cuenca alta Puente Portugal.....	110
Figura 5.7. Río Teapa a la altura de El Refugio.....	110
Figura 5.8. Metodología general de la modelación con el MIKE	112
Figura 5.9. Delimitación de la cuenca río La Sierra con WMS 8.3.....	114
Figura 5.10. Generador climático Climgen	118
Figura 5.11. Área de influencia por estación	121
Figura 5.12. Precipitación diaria estación meteorológica 27042 Tapijulapa de 1962 a 2007	138

Figura 5.13. Precipitación máxima en 24 horas, por meses, en todo su registro histórico, estación meteorológica 27042 Tapijulapa.....	141
Figura 5.14. Hidrograma de gastos diarios estación 30111 Oxolotán de 1965 a 1999 ...	148
Figura 5.15. Gastos máximos en 24 horas, por mes, en todo su registro histórico, estación hidrométrica 30111 Oxolotán.....	151
Figura 5.16. Unidad de respuesta hidrológica Chacté.....	155
Figura 5.17. Sincronización de estaciones en el sistema Chacté.....	157
Figura 5.18. Unidad de respuesta hidrológica Almandro.....	158
Figura 5.19. Avenida máxima presentada en el sistema Almandro.....	159
Figura 5.20. Sincronización de estaciones en el sistema Almandro.....	160
Figura 5.21. Unidad de respuesta hidrológica Oxolotán.....	161
Figura 5.22. Avenida máxima presentada en el sistema Oxolotán.....	163
Figura 5.23. Sincronización de estaciones en el sistema Oxolotán.....	164
Figura 5.24. Unidad de respuesta hidrológica Tapijulapa.....	165
Figura 5.25. Avenida máxima presentada en el sistema Tapijulapa.....	167
Figura 5.26. Sincronización de estaciones en el sistema Tapijulapa.....	168
Figura 5.27. Unidad de respuesta hidrológica Teapa.....	169
Figura 5.28. Avenida máxima presentada en el sistema Teapa.....	170
Figura 5.29. Sincronización de estaciones en el sistema Teapa.....	171
Figura 5.30. Unidad de respuesta hidrológica Puyacatengo.....	172
Figura 5.31. Sincronización de estaciones en el sistema Puyacatengo.....	173
Figura 5.32. Límite del modelo.....	176
Figura 5.33. Topografía.....	178
Figura 5.34. Base de datos de precipitación.....	179
Figura 5.35. Área de influencia de las estaciones meteorológicas y precipitación.....	180
Figura 5.36. Base de datos de evapotranspiración de referencia.....	181
Figura 5.37. Área de influencia para la evapotranspiración de referencia.....	182
Figura 5.38. Base de datos para vegetación.....	183
Figura 5.39. Uso de suelo y vegetación.....	185
Figura 5.40. Número de Manning.....	187
Figura 5.41. Curva de retención de humedad.....	190
Figura 5.42. Modelo de conductividad hidráulica.....	190
Figura 5.43. Unidades de suelo.....	191
Figura 5.44. Elementos del modelo hidrológico.....	193

Figura 5.45. Estimación del movimiento de agua (WM)	194
Figura 5.46. Comandos en Hec GeoRAS para la generación de las secciones transversales.....	196
Figura 5.47. Características geométricas del río La Sierra	196
Figura 5.48. Seccionamiento del río La Sierra	197
Figura 5.49. Sección transversal en el cadenamiento 244+045	198
Figura 5.50. Interface inicial de MIKE 11	199
Figura 5.51. Aplicación para la configuración de la red hidrográfica.....	200
Figura 5.52. Coordenadas extremas y proyección del área de trabajo.....	201
Figura 5.53. Plano cartesiano para la conformación de la red hidrográfica	201
Figura 5.54. Propiedades de la red hidrográfica construida	202
Figura 5.55. Red hidrográfica para simulación hidráulica	203
Figura 5.56. Estructura del archivo RLS.txt para secciones transversales	204
Figura 5.57. Ejemplo de presentación de una sección transversal del rio San Pedro, Km 0+362.41	206
Figura 5.58. Condiciones de frontera archivo riolasierra.bnd11	207
Figura 5.59. Parámetros del modelo hidrodinámico riolasierra.hd11	208
Figura 5.60. Acoplamiento del modelo hidrológico con el hidráulico	209
Figura 5.61. Proceso de simulación	210
Figura 5.62. Ruta de acceso al visualizador de resultados MIKE VIEW	211
Figura 5.63. Vista de la red hidrográfica en MIKE VIEW	212
Figura 5.64. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Almandro cadenamiento Km 91+233.549	213
Figura 5.65. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Oxolotán cadenamiento Km 121+496.810	213
Figura 5.66. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Tapijulapa cadenamiento Km 13+3518.224	214
Figura 5.67. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Teapa cadenamiento Km 43+646.559	214
Figura 5.68. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Puyacatengo cadenamiento Km 29+211.526.....	215
Figura 5.69. Perfil del cauce simulado	216
Figura 6.1. Gasto medido vs simulado en la estación hidrométrica 30135 Almandro.	220
Figura 6.2. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30111 Oxolotán	221
Figura 6.3. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30093 Tapijulapa ...	221

Figura 6.4. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30032 Teapa	222
Figura 6.5. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30135 Almandro	225
Figura 6.6. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30111 Oxolotán	226
Figura 6.7. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30093 Tapijulapa ...	226
Figura 6.8. Cañón de Itzantún, como propuesta para la construcción de una presa de almacenamiento	231
Figura 6.9. Propuesta de emplazamiento de un estructura tipo presa	232
Figura 6.10. Propuesta de sección tipo media para el desazolve y conformación de los bordo de protección marginal del Km 137+919 al Km 242+612.....	232
Figura 6.11. Sección propuesta en la estación 137+919.....	233
Figura 6.12. Sección propuesta en la estación 242+612.....	234
Figura 6.13. Función de la presa de almacenamiento en el cañón Itzantún	235
Figura 6.14. Nivel de aguas máximo alcanzado por la avenida de 1989	235
Figura 6.15. Simulación para las condiciones del evento del 9 de noviembre al 3 de diciembre de 1990.....	236
Figura 6.16. Nivel de aguas máximo alcanzado por la avenida de 1990, con la altura del bordo final de 20 msnm en la corona de los bordos	237
Figura 6.17. Sección en el cadenamamiento 242+612, para el evento de 1990	237

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Rawls et al., 1982), α y n son los parámetros de Van Genuchten.....	31
Cuadro 4.2. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Carsel et al., 1988), α y n son los parámetros de Van Genuchten.....	32
Cuadro 4.3. Componentes y características especiales del modelo MIKE SHE	75
Cuadro 4.4. Valores promedio de los parámetros de los modelo de Van Genuchten y Van Genuchten-Mualem para suelos de distintas texturas	88
Cuadro 4.5. Valores típicos del coeficiente de Manning para distintos usos de suelo (Donigian et al., 1983)	93
Cuadro 5.1. Área y por ciento de superficie por subcuenca	115
Cuadro 5.2. Características morfométricas, fisiográficas e hidrografía de la cuenca del río La Sierra.....	116
Cuadro 5.3. Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río La Sierra.....	117
Cuadro 5.4. Áreas de influencia por estación	120
Cuadro 5.5. Climas predominantes en la cuenca	122
Cuadro 5.6. Precipitación media mensual y anual	123
Cuadro 5.7. Superficie ocupada por isoyetas.....	124
Cuadro 5.8. Temperatura mensual y anual	125
Cuadro 5.9. Superficie ocupada para cada temperatura media anual.....	126
Cuadro 5.10. Evaporación media mensual y anual en mm	127
Cuadro 5.11. Superficie ocupada para cada intervalo de evaporación media anual.....	128
Cuadro 5.12. Superficie ocupada para cada intervalo de evapotranspiración media anual	128
Cuadro 5.13. Superficies de estructuras geológicas	130
Cuadro 5.14. Superficie ocupada por cada tipo de suelo	131
Cuadro 5.15. Superficie de uso de suelo y vegetación.....	132
Cuadro 5.16. Estaciones meteorológicas ubicadas en las cuencas del río La Sierra y del río Teapa.....	134
Cuadro 5.17. Estaciones hidrométricas ubicadas en las cuencas del río La Sierra y del río Teapa.....	135
Cuadro 5.18. Segmentos de la matriz de precipitación diaria, estación meteorológica 27042 Tapijulapa.....	137

Cuadro 5.19. Precipitación máxima diaria mensual y anual, estación meteorológica 27042 Tapijulapa.....	139
Cuadro 5.20. Segmentos de la matriz con información de gastos diarios, en la estación hidrométrica 30111 Oxolotán.....	147
Cuadro 5.21. Gasto máximo diario mensual y anual, estación hidrométrica 30111 Oxolotán.....	150
Cuadro 5.22. Ecurrimientos diarios máximos y sus parámetros estadísticos.....	153
Cuadro 5.23. Matriz de coincidencia en el sistema Chacté	156
Cuadro 5.24. Matriz de coincidencia en el sistema Almandro	158
Cuadro 5.25. Matriz de coincidencia en el sistema Oxolotán	162
Cuadro 5.26. Matriz de coincidencia en el sistema Tapijulapa	166
Cuadro 5.27. Matriz de coincidencia en el sistema Teapa	169
Cuadro 5.28. Matriz de coincidencia en el sistema Puyacatengo.....	172
Cuadro 5.29. Índice de área foliar, profundidad de raíces, coeficiente de cultivo y número de Manning para la cobertura vegetal de la cuenca.....	184
Cuadro 5.30. Valores medios para los parámetros de los suelos, en el modelo Van Genuchten.....	189
Cuadro 5.31. Secciones transversales generadas, para cada río	198
Cuadro 5.32. Número de puntos dibujado en planta	205
Cuadro 6.1. Gasto simulado en el análisis de los sistemas hidrometeorológicos del análisis en el río La Sierra	218
Cuadro 6.2. Gasto medio diario medido en estaciones hidrométricas del río La Sierra ..	219
Cuadro 6.3. Gasto simulado en el análisis de validación del modelo hidrometeorológico del río La Sierra.....	224
Cuadro 6.4. Gasto medio diario, medido en las estaciones hidrométricas convencionales del río La Sierra.....	225
Cuadro 6.5. Coeficiente de NASH para la estación 30135 Almandro.....	227
Cuadro 6.6. Coeficiente de NASH para la estación 30111 Oxolotán	227
Cuadro 6.7. Coeficiente de NASH para la estación 30093 Tapijulapa.....	227
Cuadro 6.8. Coeficientes de NASH, coeficiente de determinación, la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME) y el coeficiente de variación de la RCCME	228
Cuadro 6.9. Índice de vulnerabilidad en función de la topografía de la cuenca baja.....	230

MODELACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE ÁREAS CON RIESGOS DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO LA SIERRA, EN LOS ESTADOS CHIAPAS Y TABASCO, MÉXICO

Roblero-Hidalgo, R¹; Chávez-Morales, J².,

RESUMEN

Las inundaciones son fenómenos naturales difíciles de prevenir y controlar por el hombre. En el sureste de México, de forma cíclica se ha visto afectada por inundaciones de origen hidrometeorológico, dejando como consecuencias graves daños en las poblaciones y en el ambiente, ocasionando un gran deterioro en la producción agrícola, pecuaria, forestal, daños en la infraestructura y pérdidas humanas. En el estado de Tabasco, en la cual se encuentra asentada la ciudad de Villahermosa y las zonas aledañas, ha sufrido de inundaciones a través del tiempo en 1918, 1926, 1927, 1932, 1935, 1959, 1968, 1969, 1973, 1980, 1989, 1990, 1995, 1999, 2007, 2008 y 2009.

El objetivo del estudio es realizar la modelación hidrometeorológica, para determinar zonas susceptibles de riesgo de inundaciones en la cuenca del río La Sierra en el estado de Chiapas y Tabasco.

Los materiales que se utilizaron son: la documentación antecedente de la zona, datos diarios de estaciones convencionales meteorológicas e hidrométricas, cartografía impresa y digital, fotografías satelitales, equipo de cómputo y software para la modelación.

El desarrollo del trabajo, consistió de las fases: compilación descriptiva de la región hidrológica y cartográfica, reconocimiento de campo, elaboración de mapa base, delimitación y caracterización de la cuenca, análisis hidrometeorológico,

modelación hidrológica con el modelo MIKE SHE, modelación hidráulica con el modelo MIKE 11, calibración y validación del modelo

Como resultados del estudio, se modeló un área de 4,424.66 km², con su cauce principal que se desarrolla por 245 km, con una pendiente media del 40% y una elevación media de 300 metros; presenta cauces del cuarto orden, con una densidad de drenaje de 0.29 km/km². La geología predominante es caliza sedimentaria, el clima es cálido húmedo, con una precipitación media anual de 1550 a 5200 mm al año, la temperatura anual que oscila de 11°C hasta los 26°C, la evaporación anual en la zona que va desde los 700 hasta los 2200 mm y una evapotranspiración anual que va desde 1000 a 1700 mm. El tipo de suelo predominante en la zona es Luvisol Crómico (Lc). La cobertura vegetal predominante en la zona es del tipo pastizal, con el 30.47% de la superficie total.

Se definieron áreas de influencia para las estaciones meteorológicas, utilizando la oscilación térmica, temperatura media, precipitación, evaporación, topografía, subcuencas de acuerdo a la hidrografía y uso de suelo de la zona, mediante un polígono, se digitalizaron las áreas con características semejantes.

Se realizó la sincronización de los registros históricos de 8 estaciones hidrométrica y 26 estaciones meteorológicas, con datos diarios.

Se eligieron los eventos del 18 al 23 de octubre de 1989 y del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990, para definir las zonas de desborde, principalmente en las zonas bajas, haciendo uso del modelo hidrológico MIKE SHE acoplado al modelo hidráulico MIKE 11, generando los hidrogramas simulados, los cuales fueron comparados con los hidrogramas medidos, evaluados mediante la prueba de ajuste del método de Nash (0.84 a 0.98), coeficiente de determinación (0.87 a 0.99), el coeficiente de variación de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (0.09 a 0.29). Se calibró y validó el modelo, determinando las zonas vulnerables a

inundación, zonificando la superficie más afectadas por inundaciones que van desde los 20 cm hasta los 5 metros de profundidad de agua en la superficie.

Como alternativas de solución para disminuir los riesgos de inundación, se propuso la construcción de una presa de almacenamiento en el cañón Itzantún, la conformación de los bordos en la margen y desazolve de la zona baja, disminuyendo las zonas de inundación en un 90%.

PALABRAS CLAVE: Mapas de riesgo, estudio hidrometeorológico, modelo hidrológico e hidráulico.

1 Estudiante de la Maestría en Ciencias en Hidrociencias.

2 Profesor investigador Adjunto, Postgrado de hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados.

HYDROMETEOROLOGICAL MODELING OF FLOOD RISK AREAS IN LA SIERRA BASIN, IN CHIAPAS AND TABASCO STATES, MEXICO

Roblero-Hidalgo, R¹; Chávez-Morales, J².,

ABSTRACT

Floods are natural phenomena difficult to prevent and control by man. In southeastern Mexico, cyclically has been affected by floods hydrometeorological, leaving serious consequences on populations and damage to the environment, resulting in a large decline in agricultural production, livestock, forestry, infrastructure damage and casualties. In the state of Tabasco, in which the city is settled in Villahermosa and surrounding areas, has suffered over time floods in 1918, 1926, 1927, 1932, 1935, 1959, 1968, 1969, 1973, 1980, 1989 , 1990, 1995, 1999, 2007, 2008 and 2009.

The aim of the study is to hydrometeorological modeling to determine risk areas susceptible to flooding in the basin of the river La Sierra in the state of Chiapas and Tabasco.

The materials used are documenting history of the area, daily data of meteorological and hydrometric conventional stations, print and digital mapping, satellite photography, computer equipment and software for modeling.

The development work consisted of phases descriptive compilation of the hydrologic region and mapping, field survey, preparation of base map delineation and characterization of the basin hydrometeorological analysis, hydrological modeling with MIKE SHE model, hydraulic modeling with MIKE 11 model, calibration and validation of the model

As results of the study, we modeled an area of 4424.66 km², with its main channel that develops 245 km, with an average gradient of 40% and an average elevation of 300 meters, presents the fourth-order channels, with a drainage density km/km² 0.29. The predominant sedimentary limestone geology, the climate is hot and humid, with an average annual rainfall of 1550-5200 mm per year, the annual temperature ranging from 11 °C to 26 °C, the annual evaporation in the area from 700 to 2200 mm and an annual evapotranspiration ranges from 1000-1700 mm. The predominant soil type in the area is Chromic Luvisol (Lc). The predominant vegetation in the area is grassland type, with 30.47% of the total area.

Catchment areas were defined for weather stations, using the temperature variation, average temperature, precipitation, evaporation, topography, watersheds according to hydrography and land use of the area by a polygon, digitized areas with similar characteristics.

Synchronization was performed historical records hydrometric stations 8 and 26 weather stations with daily data.

Events were chosen from 18 to 23 October 1989 and from 29 November to 3 December 1990, to define overflow areas, mainly in the lowlands, using MIKE SHE hydrological model coupled to the hydraulic model MIKE 11 generating simulated hydrographs, which were compared with measured hydrographs, evaluated by test method setting Nash (0.84 to 0.98), coefficient of determination (0.87 to 0.99), the coefficient of variation of the square root of the square error mean (0.09 to 0.29). Was calibrated and validated the model, identifying areas vulnerable to flooding, zoning the area most affected by floods ranging from 20 cm to 5 meters depth of water on the surface.

As alternative solutions to reduce flood risks, proposed the construction of a storage dam in the canyon Itzantun, forming the margin levees and dredging of the lower, reducing flood areas by 90%.

KEYWORDS: Risk maps, study hydrometeorological, hydrologic and hydraulic model.

1 Estudiante de la Maestría en Ciencias en Hidrociencias.

2 Profesor investigador Adjunto, Postgrado de hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los desastres por inundaciones como fenómenos naturales son difíciles de prevenir y controlar por el hombre, han prevalecido en toda la historia de la humanidad. Esta visión ha generado políticas y acciones de atención a las emergencias en el momento en que éstas ocurren o después que han ocurrido, resultando insuficientes para disminuir significativamente los daños y pérdidas resultantes, incluyendo pérdidas de vidas.

La región sureste de México, de forma cíclica se ha visto afectada por grandes desastres naturales como inundaciones y además, de origen hidrometeorológico, dejando como consecuencias graves daños en las poblaciones y en el ambiente, ocasionando un gran deterioro en la producción agrícola, pecuaria, forestal, daños en la infraestructura y ocasionando pérdidas humanas.

Para el estado de Tabasco las inundaciones de los años 1999 y 2007, son probablemente las más agresivas y también las mejor documentadas de toda la historia. De manera natural, la planicie de Tabasco, en la cual se encuentra asentada la ciudad de Villahermosa, es una región con alta vulnerabilidad a los eventos de inundación y este fenómeno se ha visto magnificado debido al cambio climático global, y a las modificaciones en los patrones de uso del suelo en la parte alta y media de las cuencas hidrológicas de aportación de agua. Este cambio en el uso del suelo, ha ocasionado el avance de otros fenómenos relacionados: la erosión de los suelos y el transporte de sedimentos, mismos que propician el azolvamiento de cuerpos de agua y daños en las obras de infraestructura. A pesar de ello, pocos han sido los esfuerzos que se han implementado en las partes altas y medias de las cuencas como medidas de prevención, mitigación o control de las inundaciones en las partes bajas.

Una de las zonas de peligro son los asentamientos humanos a orillas de los ríos y cuando se trata de enfrentarse con escurrimientos de grandes avenidas resulta



prácticamente imposible disminuir las pérdidas humanas y materiales. Es claro que dichos problemas se agravan por una falta de políticas para regular el uso de los recursos naturales, el desarrollo urbano, la deforestación y la construcción de obras civiles en zonas de alto riesgo de inundación.

Por las razones expuestas se presenta un estudio hidrometeorológico para definir las zonas de riesgo con alto peligro de inundaciones. Para ello se utilizarán los modelos de simulación hidrometeorológica de la serie MIKE (DHI, 2005): MIKE SHE en la modelación hidrológica y el MIKE 11 en la modelación hidráulica.



CAPÍTULO 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPÓTESIS

Los estudios hidrometeorológicos, son la base para la generación de mapas de riesgos contra inundaciones en la cuenca del Río La Sierra y Teapa en el estado de Chiapas y Tabasco.

2.2. OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio mediante modelación hidrometeorológica, para determinar zonas susceptibles de riesgo de inundaciones en la cuenca del río La Sierra en el estado de Chiapas y Tabasco.

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Delimitar y caracterizar la cuenca del río La Sierra.
- Utilizar el modelo hidrológico MIKE, para estimar la relación lluvia escurrimiento en avenidas extremas.
- Calibración del modelo hidrológico con datos meteorológicos e hidrométricos históricos observados.
- Utilizar el modelo hidráulico calibrado para definir aéreas con posible riesgo de inundación en puntos estratégicos de la cuenca.
- Elaborar un mapa de riesgo en las partes bajas de la cuenca sujetas a inundaciones en la ciudad de Villahermosa y zonas aledañas.



CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

La inundación, es el proceso que se produce cuando el caudal que se genera por la precipitación en una cuenca hidrológica, supera la capacidad de los cauces de los ríos para conducirlo y se desbordan; los excesos de agua pueden cubrir las partes bajas provocando inundaciones, afectando a poblaciones y zonas aledañas.

En las regiones del Río La Sierra se pueden originar en la temporada de lluvias y ciclones a partir de mayo y hasta finales de octubre, o en la época de invierno de octubre a febrero. Al precipitar grandes cantidades de agua en poco tiempo, el suelo se satura y deja de absorber o infiltrar el agua, generando escurrimientos que aumentan el nivel de ríos, presas o lagos, que al llenarse podrían desbordarse y favorecer al estancamiento temporal en zonas bajas produciendo una inundación.

3.1. CAUSAS QUE GENERAN UNA INUNDACIÓN

CENAPRED (2001) indica que son provocadas por:

- Exceso de precipitación: La lluvia, nieve o granizo extremos, son el origen principal de la formación de escurrimientos.
- Ciclones tropicales: En la temporada de ciclones (de mayo a noviembre) se generan lluvias torrenciales y la sobre elevación del nivel del mar, produciendo que las olas se adentren a tierra, inundando grandes áreas.
- Falla de obras hidráulicas: Cuando se rompe una presa, dique o bordo y toda el agua almacenada es liberada súbitamente dirigiéndose a las zonas bajas.
- Actividades humanas: Los efectos de las inundaciones se ven agravados por el ser humano, ya que en zonas urbanas, la colocación de grandes superficies de asfalto y concreto, produce la impermeabilización artificial del suelo y la necesidad de desalojar las aguas pluviales acumuladas mediante sistemas de alcantarillado.



- La deforestación: Al talar los bosques y al utilizar los terrenos para cultivo se desnuda al suelo de su cobertura vegetal, se facilita la erosión y se favorece al escurrimiento.

3.2. INUNDACIONES EN EL MUNDO

Las inundaciones son una de las catástrofes que mayor número de víctimas producen en el mundo. Se calcula que en el siglo XX fallecieron 32 millones de personas por este motivo. Para prevenir y mitigar sus efectos, es importante conocer su origen y manifestaciones, así como fomentar una conciencia preventiva en la comunidad (CENAPRED, 2001).

A pesar del desarrollo de tecnologías avanzadas en previsión y comunicación, las inundaciones siguen causando estragos, debido a las crecidas en los ríos y a las elevaciones de los niveles de agua en las zonas costeras producidas por lluvias torrenciales, fusión de la nieve, deshielo, ciclones tropicales, oleajes y mareas, tsunamis, corrientes de fango y roturas de presas.

De las zonas más afectadas en el mundo y de los eventos más impactantes en el último siglo se pueden referir los siguientes (CENAPRED, 2001):

- El continente asiático es el que más sufre intensamente los peligros del agua, ya que este se producen entre el 90 y el 95 % de las muertes debidas a inundaciones.
- China ha venido luchando desde los inicios de su historia contra el carácter impetuoso del río Amarillo, y pese a ello, se relata que en los últimos 3500 años se han producido 1500 inundaciones en su llanura.
- En la India el río Ganges produce grandes crecidas, con llanuras de inundación de más de 300 km² de extensión que afectan a más de 200 millones de personas.
- Las crecidas relámpago de carácter catastrófico con un elevado número de víctimas mortales han sido frecuentes en el último decenio: Nimes (Francia) en



1988, Vaison La Romaine (Francia) en 1992, Génova (Italia) en 1993 o Biescas (España) en 1996.

- Las inundaciones de 1993 en Alemania ocasionaron pérdidas con un valor de 661 millones de euros.
- En Francia las inundaciones de septiembre a enero de 1992 provocaron la pérdida de 100 vidas humanas y daño económico.
- En Italia, aproximadamente 3000 zonas se han visto afectadas por inundaciones en los últimos 100 años.
- De todos los desastres naturales de los Estados Unidos, las inundaciones son las principales causas de muerte. En términos de pérdidas físicas, las inundaciones son responsables del 40% de los daños a la propiedad ocasionados por todos los desastres naturales.
- En América Central en el 2006 el huracán Mitch, afectó a Nicaragua y Honduras, barriendo puentes, caminos, pueblos y plantaciones, causando 6 billones de dólares en daños y matando quizás a 9000 personas. Mitch fue una de las tormentas atlánticas más mortales del siglo y la inundación fue la peor del siglo en Honduras. Las casas que estuvieron por 150 años en pueblos coloniales fueron arrancadas por el desborde de ríos.

3.3. INUNDACIONES EN MÉXICO

Las inundaciones en nuestro país se presentan en muchas zonas de las llanuras costeras (CENAPRED, 2001):

- En 1949, lluvias de invierno en el estado de Sinaloa y Sonora, provocaron el desbordamiento de los ríos Yaqui, Fuerte y Mayo. Más de 35 localidades quedaron inundadas. Al menos 9,000 casas fueron dañadas.
- En 1967 el huracán Beulah, afectó los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Yucatán y Quintana Roo, estimando pérdidas de aproximadamente 500 millones de dólares y viéndose afectadas 25,000 personas.
- En 1967, el huracán Katrina causó serios daños en los estados de Guerrero, Península de Baja California, Sonora y Nayarit. Se registraron gastos máximos



históricos en los ríos: Balsas con 3,881 m³/s, La Unión con 1,400 m³/s, Tecpan con un gasto de 3,550 m³/s. Finalmente en el mismo río Balsas en la presa el Infiernillo se registró el máximo histórico de la República Mexicana con un gasto de 20,000 m³/s. La población afectada fue de 30,000 personas con 15 muertes registradas.

- En 1988 el huracán Gilberto provocó daños en los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila. El número de personas damnificadas fue de 139,374 con 225 muertes. Se estima que hubo pérdidas del orden 766 millones de dólares. Gilberto tocó suelo mexicano, en Quintana Roo, como categoría 5, provocando vientos de hasta 300 km/h en Cozumel con oleaje de hasta 5 m de altura. Posteriormente lo hizo, en Tamaulipas, como categoría 4. Fue en esta parte del país donde se registraron los mayores daños por precipitación pluvial (Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas). Este huracán causó el 50% de las pérdidas del sector agrícola del país en ese año. Adicionalmente, resultaron seriamente dañadas amplias zonas turísticas, agrícolas y boscosas. Se calcula que el huracán Gilberto provocó, a su paso por la República Mexicana, una precipitación total acumulada de aproximadamente 90,000 millones de m³.
- En 1999 la Depresión Tropical 11, afectó los estados de Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco. El número de personas afectadas fue 1,904,000 con 387 muertes. Se estima que hubo pérdidas del orden 807.50 millones de dólares.
- En 2002 el huracán Isidoro afectó los estados de Campeche y Yucatán. El número de personas damnificadas fue 500,000 con 4 muertes. Se estima que hubo pérdidas del orden 870 millones de dólares.
- El huracán Stan, causó inundaciones y desprendimientos de cerros en los países centroamericanos de Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua además del sur de México durante los días 3, 4 y 5 de octubre de 2005, provocando aproximadamente 1620 muertes.



3.4. INUNDACIONES EN TABASCO

La planicie de Tabasco, en la cual se encuentra asentada la ciudad de Villahermosa y las zonas aledañas, ha sufrido de inundaciones a través del tiempo.

En 1918, se inundó la calle de Juárez, cerca de los portales en Tabasco, con un nivel promedio de 2 metros. En 1926 cerca de los hoteles Pasaje y Palacio, se reporta un nivel de 1.5 metros. En 1927, la calle Juárez, reporta un nivel de 1.5 metros. En 1932 se reporta en la calle Juárez, un nivel de 1 metro. Otros eventos similares han ocurrido en 1926, 1927, 1932, 1935, 1959, 1968, 1969, 1973, 1980, más recientemente en 1989, 1990, 1995, 1999, 2007, 2008 y 2009 por lluvias torrenciales, las inundaciones probablemente mejor documentas de la historia, han dejado 329 muertos, 295,000 damnificados en la zona y daños arriba de los 10,000 millones de pesos (CENAPRED, 2001).

3.5. MEDIDAS DE MITIGACIÓN CONTRA INUNDACIONES

Para llevar a cabo medidas en contra de los daños causados por inundaciones, es indispensable emprender acciones de protección. Estas pueden ser de dos tipos: medidas estructurales (construcción de obras), o medidas no estructurales (indirectas o institucionales).

3.5.1. Reforestación, prácticas de conservación de suelo y agua

Las practicas de reforestación, conservación de suelo y agua, se utilizan para revertir el proceso de degradación de las zonas altas de las cuencas.

Reforestación: es la actividad que consiste en repoblar mediante arboles zonas que en el pasado estaban forestadas, mediante especies adaptables.



Prácticas de conservación de suelo y agua: Es un conjunto de prácticas aplicadas para promover el uso sustentable del suelo, tienen por objeto el control de la erosión, conservación de la humedad, control del escurrimiento superficial, riego, drenaje y el desarrollo de los recursos hidráulicos.

Tanto la reforestación como las prácticas de conservación de suelo y agua modifican los siguientes factores.

- Reduce la erosión hídrica y eólica.
- Aumenta la infiltración de la lluvia.
- Reduce la pérdida de humedad por evaporación.
- Mantiene la temperatura.
- Mejora las condiciones de germinación.
- Mejora la estabilidad estructural de los suelos.
- Estimula la actividad biológica del suelo.
- Aumenta la porosidad.
- Favorece el control biológico de las plagas.
- Reduce el enmalezamiento.
- Disminuye el escurrimiento.

3.5.2. Medidas estructurales

El objetivo de las medidas estructurales, es evitar o mitigar los daños provocados por una inundación, mediante la construcción de obras.

A. Obras de regulación. Existen obras que interceptan directamente el agua de lluvia o la que escurre por los cauces para almacenarla y posteriormente, descargarla en forma controlada, es decir, sin provocar o minimizando las inundaciones aguas abajo. Por otra parte las obras de mejoramiento de cuencas han cobrado importancia pues su objetivo es propiciar una mejor infiltración del agua de lluvia, disminuyendo y regulando el escurrimiento superficial para atenuar los efectos de las inundaciones (CENAPRED, 2001).



B. Obras de rectificación. Su función es facilitar la conducción del agua por su cauce, dragando los ríos para conservar o incrementar su capacidad hidráulica. Algunas de las estructuras que forman parte de este grupo de obras son: la rectificación de los cauces (por medio de la canalización o el entubamiento de los ríos), o bien, el incremento de la pendiente (mediante el corte de meandros).

C. Obras de protección. Confinan el agua dentro del cauce del río (bordes longitudinales a lo largo del río), o bien evitan que la inundación alcance poblaciones o zonas de interés.

3.5.3. Acciones institucionales

Este tipo de medidas se basa en la planeación, organización, coordinación y ejecución de acciones que buscan disminuir los daños causados por las inundaciones. Pueden ser de carácter permanente o aplicable. Las principales acciones se relacionan con la conservación y el cuidado de las cuencas, la elaboración de mapas de riesgo y reordenamiento territorial, la vigilancia y alerta, la operación de la infraestructura hidráulica, los planes de protección civil, la difusión de boletines de alerta, evacuación de personas y la alerta hidrometeorológica en tiempo real (CENAPRED, 2001).

A. Acciones permanentes. Se refiere básicamente a la normatividad de uso de suelo, con lo que se posibilita la delimitación de las zonas inundables bajo diferentes escenarios, relacionando la magnitud del evento con el área afectada. El objetivo es que una vez que se ha identificado las zonas potencialmente inundables se definan los usos de suelo de acuerdo con el valor económico de los bienes.

Mapas de riesgo: Es la representación gráfica de los potenciales daños en un sitio (ciudad, localidad, vía de comunicación, etc.), generados por algún fenómeno natural



o antropogénico (inundación, sismo, deslaves, explosión de material químico, etc.) que lo afecte (CENAPRED, 2001).

B. Acciones de operación durante la temporada de lluvia. Ante la presencia de un fenómeno hidrometeorológico capaz de generar una inundación, se llevan a cabo medidas cuya finalidad es conocer su evolución durante sus diferentes fases (ocurrencia y cuantificación de la precipitación; transformación en escurrimiento superficial; regulación a lo largo del cauce, desfaseamiento en el tiempo y atenuación del gasto máximo; operación de la infraestructura hidráulica, etc.).

Se pueden tener tres niveles de alerta de acuerdo con el tipo de monitoreo y el nivel de resolución espacial que se desee.

- Primer nivel: se hace uso de satélites meteorológicos con lo que se puede alertar con varios días de anticipación de un fenómeno meteorológico.
- Segundo nivel: se utilizan radares meteorológicos y los boletines del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en este caso se alerta con varias horas de anticipación.
- Tercer nivel: basado en sistemas de alerta hidrometeorológicas tempranas (SAHT), diseñados para alertar la posibilidad de ocurrencia de inundaciones en una cuenca. En este caso es posible dar aviso a la población con cierta anticipación, que puedan ser días, horas e incluso minutos, que puede significar la mitigación de los daños que se puedan producir (CENAPRED, 2001).

CAPÍTULO 4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico se podría definir como el “proceso que describe la ubicación y el movimiento del agua en nuestro planeta”. Es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano vuelve al océano después de pasar por las etapas de precipitación, escorrentía e infiltración.

El concepto de ciclo se basa en el permanente movimiento o transferencia de las masas de agua, tanto de un punto del planeta a otro, como entre sus diferentes estados (líquido, gaseoso y sólido) figura 4.1. Este flujo de agua se produce por dos causas principales: la energía solar y la gravedad.

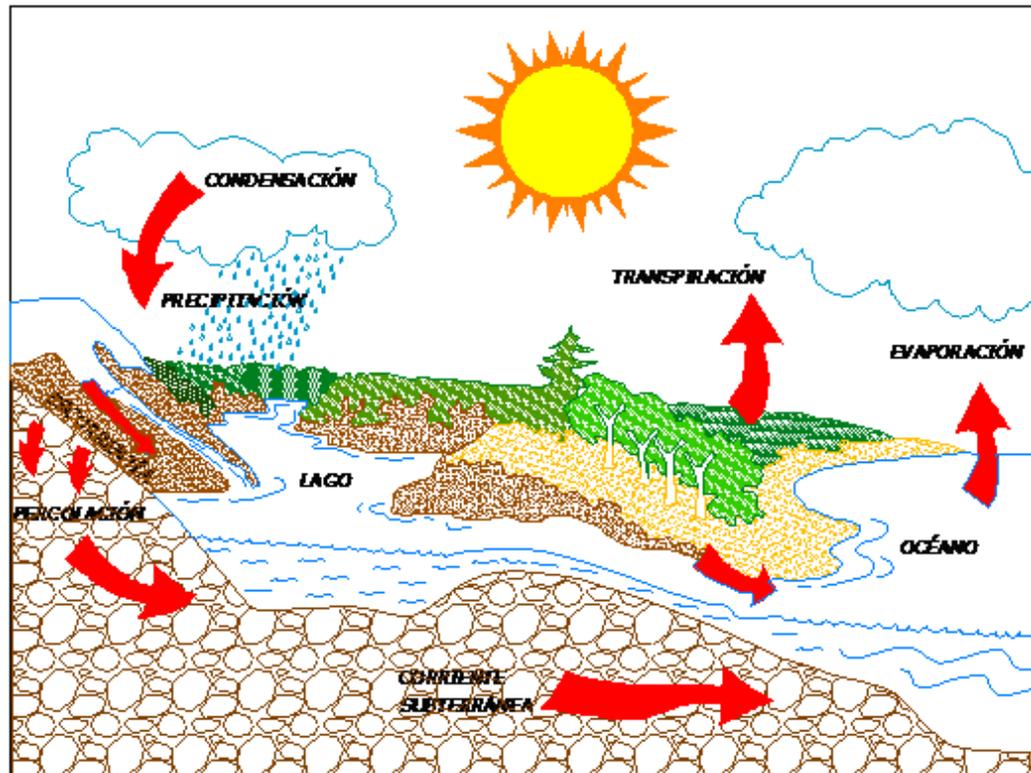


Figura 4.1. Ciclo hidrológico



Las grandes superficies líquidas (lagos, mares y océanos) donde la radiación solar favorece a que continuamente se forme vapor de agua. El vapor de agua, menos denso que el aire, asciende a capas más altas de la atmósfera, donde se enfría y se condensa formando nubes.

Cuando por condensación las partículas de agua que forman las nubes alcanzan un tamaño superior a 0.1 mm comienza a formarse gotas, las cuales caen por gravedad dando lugar a las precipitaciones.

Abstracciones hidrológicas, no toda el agua que precipita llega a alcanzar la superficie del terreno. Una parte del agua de la precipitación vuelve a evaporarse en su caída y otra parte es interceptada por la vegetación, edificios, carreteras, etc., y luego se evapora. A esta parte de la precipitación se le denomina abstracciones hidrológicas, porque no participan en el escurrimiento.

Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en charcos, lagos y embalses, almacenamiento superficial volviendo una gran parte de nuevo a la atmósfera en forma de vapor.

Pero también una parte de la precipitación llega a penetrar la superficie del terreno (infiltración) a través de los poros y fisuras del suelo o las rocas, rellenando de agua el medio poroso.

Otra parte circula sobre la superficie y se concentra en pequeños cursos de agua, que luego se concentra en arroyos y más tarde desembocan en los ríos (escorrentía superficial), donde una parte se evaporará y otra se infiltrará en el terreno.

En casi todas las formaciones geológicas existe una parte superficial cuyos poros no están saturados en agua, que se denomina zona no saturada, y una parte inferior saturada en agua, y denominada zona saturada. Una buena parte del agua infiltrada nunca llega a la zona saturada sino que es interceptada en la zona no saturada. En



la zona no saturada una parte de esta agua se evapora y vuelve a la atmósfera en forma de vapor, y otra parte, mucho más importante cuantitativamente, se consume en la transpiración de las plantas. Los fenómenos de evaporación y transpiración en la zona no saturada son difíciles de separar, y es por ello que se utiliza el término evapotranspiración para englobar ambos términos.

El agua que desciende, por gravedad (percolación) y alcanza la zona saturada constituyendo la recarga de agua subterránea.

El agua subterránea puede volver a la atmósfera por evapotranspiración cuando el nivel saturado queda próximo a la superficie del terreno. Otras veces, se produce la descarga de las aguas subterráneas, la cual pasará a engrosar el caudal de los ríos, directamente en el cauce o a través de manantiales, o descarga directamente en el mar, u otras grandes superficies de agua, cerrándose así el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es un proceso continuo pero irregular en el espacio y en el tiempo. Una gota de lluvia puede recorrer todo el ciclo o una parte de él. Cualquier acción del hombre, alterará el ciclo entero para una determinada región.

La ecuación 4.1 representa el fenómeno de balance en un área que puede ser una cuenca hidrológica:

$$P = S + ETR + I + Ab \quad (4.1)$$

Como la precipitación es un dato y lo que se calcula es el escurrimiento, generalmente es la "S" la variable que se despeja.

Donde:

P= Precipitación, volumen que cae en un área m^3 ,

S= Escurrimiento, volumen en m^3 ,

ETR= Evapotranspiración, volumen en m^3 ,



I= Infiltración, volumen en m^3 ,

Ab= Abstracciones, volumen en m^3 .

4.1.1. Precipitación

El estudio de la precipitación es de suma importancia, ya que es la fuente a partir de la cual los continentes se suministran de agua cíclicamente, por lo que tiene una relación directa con los de más fenómenos del ciclo hidrológico.

Actualmente se sabe que la principal fuente de humedad para la precipitación es la evaporación de los océanos y que probablemente sólo el 10% de la precipitación continental se puede atribuir a la evaporación de los continentes.

La cantidad de humedad atmosférica sobre una región es determinada por factores climáticos y geográficos. La localización de ésta con respecto al sistema general de circulación, la latitud y la distancia a la fuente de humedad, son variables que tienen influencia en el clima. Las barreras orográficas a menudo ejercen una influencia mucho mayor en el clima de una región que la cercanía a la fuente de humedad. Bajo el término de precipitación se engloba todas las aguas meteóricas que caen en la superficie de la tierra tanto forma líquida como sólida.

4.1.1.1. Medición de la precipitación. La precipitación como fuente primaria de agua en los continentes, sobre todo en lo que se refiere al agua superficial, es de suma importancia conocerla no solamente por su formación, también lo es cuantificarla, ya que esto permite hacer estudios, que permitan realizar toma de decisiones acerca de su control. Estos estudios como; balances hídricos, para determinar los componentes del ciclo hidrológico en una manera global; estudios de relación precipitación-escurrimiento, determinando escurrimientos en cuencas no aforadas; o estudios para la conservación de suelos y aguas, etc.



Para obtener información sobre el fenómeno de la precipitación se observan tres variables principalmente: cantidad, intensidad y duración.

Magnitud o cantidad de la precipitación: La cantidad de precipitación que cae en una tormenta o en un período de registro, como un día, un mes o un año, se mide en términos de altura que siempre es definida como el espesor contado según la vertical, de la lámina de agua que se acumula en una superficie horizontal si todas las precipitaciones recibidas por ésta se inmovilizan. La unidad típica de medición es el milímetro, mm. La más común es la precipitación en 24 horas, a partir de esta se obtienen o sintetizan las correspondientes a periodos de días, según se requiera, semanales, mensuales y anuales.

Intensidad de la precipitación: La intensidad media de la precipitación para una tormenta es la relación, de la lámina de precipitación entre el tiempo de duración de la tormenta, según la ecuación 4.2:

$$I = \frac{Pr}{t_p} \quad (4.2)$$

Donde:

I = Intensidad de precipitación, en mm/h,

Pr = Precipitación total observada, en mm,

tp = Tiempo de precipitación, en h.

Con esta información se calculan las intensidades de precipitación de cada evento, en mm/h. Se puede observar cual fue la máxima, mínima y cuál fue la lámina precipitada en las 24 horas de observación.

Duración de la precipitación: Algunas veces es importante analizar las tormentas en cuanto a su duración. La duración se refiere a la medida del periodo de tiempo en el cual ocurre una lluvia o una tormenta. La unidad de expresión más usual es la hora

4.1.2. Intercepción

La intercepción es el primer proceso hidrológico que actúa redistribuyendo y modificando la precipitación sobre un área, su determinación es especialmente útil para valuar la porción de la precipitación que finalmente llega al suelo, cantidad con la cual se desarrolla el resto del ciclo hidrológico de una cuenca o un área determinada.

La cantidad de precipitación que finalmente llega a la superficie del terreno depende enormemente de la naturaleza y densidad de la cubierta vegetal, si ésta área existe, o de las características de la cobertura artificial (edificios, caminos y pavimentos). La cobertura sea natural, o artificial intercepta parte de la precipitación, deteniéndola temporalmente en sus superficies, de ahí el agua es evaporada para regresar a la atmósfera durante o después de la tormenta, o bien, cae en el terreno, figura 4.2. Al proceso anterior, se le conoce como intercepción y comprende tres principales componentes: las pérdidas por intercepción, la precipitación no interceptada y el flujo por los tallos (Campos, 1992).

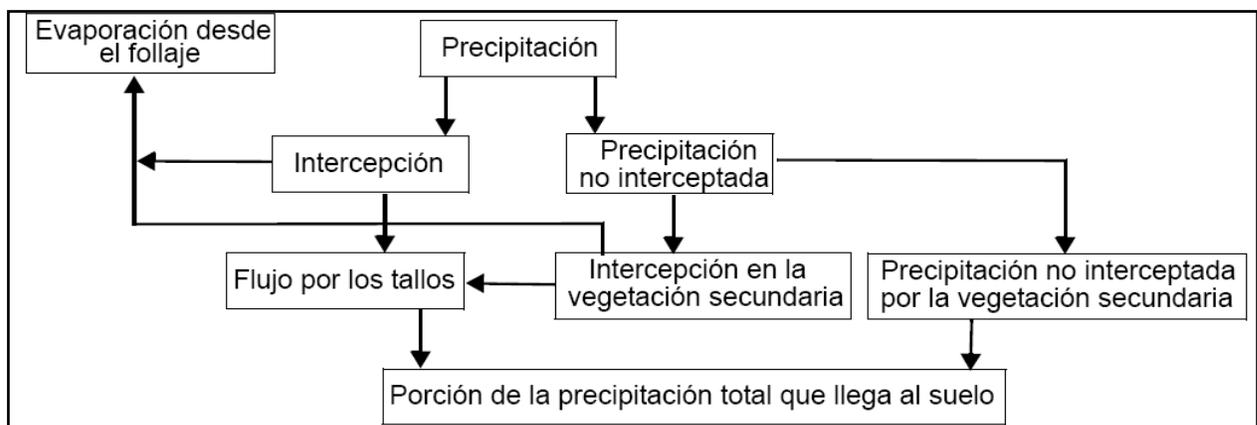


Figura 4.2. Representación del proceso de intercepción

Para el estudio de la estimación de la avenida máxima que puede presentarse con una cierta frecuencia en un punto determinado de un río, la intercepción y el



almacenamiento en depresiones pueden ignorarse debido a su reducida magnitud con respecto a las tormentas.

En cambio, para solucionar los problemas de la estimación de los volúmenes escurridos a nivel mensual, anual o medio anual de una cuenca, se debe dar importancia a la retención superficial, y en especial a la interceptación, en los estudios de balance hidrológico de las cuencas. La importancia de la interceptación ha sido destacada por varios autores, como son Viessman y Lewis (1995), Linsley, Kohler y Paulhus (1977).

En general, se puede decir, que del 10 al 20 % de la precipitación que cae durante la época de desarrollo de las plantas (árboles y pastos) es interceptada y regresada a la atmósfera por evaporación, Viessman et al. (1995) y Campos (1992).

4.1.2.1. Proceso físico de la interceptación. Cuando las primeras gotas de lluvia de una tormenta llegan a las hojas de las plantas, éstas son retenidas totalmente, como gotas, formando una fina película sobre la superficie de las hojas y ramas, hasta alcanzar la máxima capacidad de almacenamiento. Al llegar más agua a las hojas se forman gotas en el borde inferior de las mismas y en ausencia de viento, caen por gravedad al vencer la fuerza de tensión superficial. Después de que la vegetación ha sido saturada, la interceptación debería terminar, sin embargo, continúa, debido a la evaporación que se realiza de toda la superficie mojada; en este instante, la cantidad de agua que llega al suelo es igual a la lluvia menos la evaporación desde la cubierta vegetal. Al término de la tormenta, la vegetación queda saturada y toda esa humedad regresará a la atmósfera por evaporación.

El factor viento juega un papel interesante en el proceso de la interceptación, ya que esta reduce la capacidad de almacenamiento máximo e incrementa la velocidad con que el agua puede ser evaporada. Aparentemente, las altas velocidades del viento tienden a aumentar la interceptación total durante tormentas de larga duración y reducirla durante las de corto intervalo (Campos, 1992).



4.1.2.2. Factores que afectan la pérdida por interceptación. La pérdida por interceptación está determinada principalmente por los dos siguientes conceptos: la capacidad de almacenamiento de la vegetación y la denominada oportunidad de evaporación. La capacidad de almacenamiento por interceptación es la máxima cantidad de agua o nieve que puede ser retenida en las hojas y ramas de la vegetación; depende de la forma, densidad, edad, tamaño y textura de éstas, Viessman et al. (1995), Wilby (1997) y Campos (1992). Usualmente esta pérdida se expresa en milímetros de agua equivalente.

La oportunidad de evaporación determina qué cantidad del agua interceptada puede ser evaporada, es muy sensible a la historia de la tormenta, es decir, a la duración, cantidad y distribución en el tiempo y lógicamente, es función de la radiación solar, de la velocidad del viento y del contenido de humedad del aire.

4.1.2.3. Valores de interceptación en diferentes cubiertas. Como se ha mencionado con anterioridad, la magnitud de la interceptación está directamente relacionada con la cantidad de follaje, sus características (edad, tipo, forma, etc.) y orientación, entonces, habrá una diferencia apreciable en su valor de acuerdo a los diversos tipos de coberturas que son: casas, edificios, árboles y arbustos, pastos y cultivos.

A. Interceptación en áreas urbanas. En la mayoría de las zonas urbanas la interceptación por vegetación es prácticamente despreciable, en comparación con los porcentajes de lluvia que pueden ser retenidos y evaporados desde la superficie de los edificios, casas y pavimentos. En casos extremos, la pérdida por interceptación puede ser del 100% cuando el agua es atrapada en los techos y evaporada desde allí, o bien, cuando es conducida a los sistemas de drenaje pluvial directamente.

B. Interceptación en zonas forestales. Los resultados más comunes de dichas investigaciones se han representado por ecuaciones de regresión que relacionan la precipitación total con la cantidad que llega al suelo y con el flujo por los tallos.



Por ejemplo, Dunne y Leopold (1978) (citado por Campos, 1992) han resumido, varios de estos resultados, para bosques de coníferas (hojas perennes) y para bosques de árboles con hojas caducas. Por otra parte, Todd (citado por Campos, 1992) presenta los resultados de pérdida bruta por intercepción, para hoja caduca del 20 %, para pino blanco del 30% y para pino rojo hasta del 32%, y un flujo en tallos que va del 2-5%.

C. Intercepción en pastos. En el punto de máximo desarrollo, los pastos pueden interceptar igual cantidad de precipitación que los árboles (10 - 20% de la precipitación de una tormenta), pero debido a sus rápidos cambios estacionales de volumen su intercepción anual es menor.

D. Intercepción en cultivos. Para la alfalfa se reporta un valor de intercepción de 21-35 %, con un flujo en tallos de 7%, para maíz se considera una intercepción del 3-15 %, con un flujo entre tallos de 16.6% y para frijol una intercepción que va del 9-14.5%, con un flujo en tallos de 20.5 % (Linsley et al., 1977).

4.1.2.4. Calculo de la intercepción. La medición del proceso de intercepción involucra la evaluación de cada uno de los términos de la ecuación 4.3.

$$L = P - P_{in} - P_t \quad (4.3)$$

Donde:

L= Pérdida bruta por intercepción en mm

P= Precipitación sobre la cubierta vegetal, en mm

P_{ni}= Precipitación no interceptada, en mm

P_t= Cantidad de agua que alcanza el terreno, bajando por los tallos y el tronco, en mm.



4.1.3. Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj}).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (Allen et al., 2006).

A. La evaporación. Es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere de energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del



aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

Cuando la superficie evaporante del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de abastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo (Allen et al., 2006).

B. La transpiración. Consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior liberación hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por



las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (Allen et al., 2006).

4.1.3.1. Factores que afectan la evapotranspiración. El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración.

A. Variables climáticas. Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporante de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar (Allen et al., 2006).



B. Factores de cultivo. El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas (Allen et al., 2006).

C. Manejo y condiciones ambientales. Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración. Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. Una barrera rompe vientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en



el campo. La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo. Los anti-transpirantes, tales como estimulantes del cierre de los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ET_c ($ET_c aj$). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo (Allen et al., 2006).

4.1.3.2. Evapotranspiración de referencia (ET_o). La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición.

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia.



Los únicos factores que afectan ETo son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos.

Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ETo de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes (Allen et al., 2006).

4.1.3.3. Evapotranspiración bajo condiciones estándar (ETc). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETc, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes.

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. El requerimiento de agua de riego también incluye agua



adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua.

La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ET_o). La relación ET_c/ET_o que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo (K_c), y se utiliza para relacionar ET_c a ET_o de manera que $ET_c = K_c \times ET_o$.

4.1.3.4. Evapotranspiración bajo condiciones no estándar (ET_c aj). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_c aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET_c debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c .

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico K_s o ajustando K_c a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo (Allen et al., 2006).



4.1.4. Infiltración

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Del agua infiltrada se alimenta al agua subterránea y a la mayoría de las corrientes en el período de estiaje.

En el proceso de infiltración se pueden distinguir tres fases:

A. Intercambio. Se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.

B. Transmisión. Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.

C. Circulación. Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

4.1.4.1 Capacidad de infiltración. Es la cantidad máxima de agua que un suelo puede absorber por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/h.

La capacidad de infiltración disminuye hasta alcanzar un valor casi constante llamado infiltración básica, a medida que la precipitación se prolonga el suelo se satura y es entonces cuando empieza el escurrimiento.

A. Factores que intervienen en la capacidad de infiltración. De un punto de vista físico son (Chow, 1994).

a. Tipo de suelo. Entre mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el estado de fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración.



b. Grado de humedad del suelo. La infiltración varía en proporción inversa a la humedad del suelo, es decir, un suelo húmedo presenta menor capacidad de infiltración que un suelo seco.

c. Presencia de sustancias coloidales. Casi todos los suelos contienen coloides. La hidratación de los coloides aumenta su tamaño y reduce el espacio intergranular provocando menor infiltración.

d. Acción de la precipitación sobre el suelo. El agua de lluvia al chocar con el suelo facilita la compactación de su superficie disminuyendo la capacidad de infiltración; por otra parte, el agua transporta materiales finos que tienden a disminuir la porosidad de la superficie del suelo, humedece la superficie, saturando los horizontes más próximos a la misma, lo que aumenta la resistencia a la penetración del agua y actúa sobre las partículas de sustancias coloidales que, como se dijo, reducen la dimensión de los espacios intergranulares. La intensidad de esta acción varía con la granulometría de los suelos, y la presencia de vegetación la atenúa o elimina.

e. Cubierta vegetal. Con una cubierta vegetal natural aumenta la capacidad de infiltración y en caso de terreno cultivado, depende del tratamiento que se le dé al suelo. La cubierta vegetal densa favorece la infiltración y dificulta el escurrimiento superficial del agua. Una vez que la lluvia cesa, la humedad del suelo es retirada a través de las raíces, aumentando la capacidad de infiltración para próximas precipitaciones.

f. Acción del hombre y de los animales. El suelo virgen tiene una estructura favorable para la infiltración, alto contenido de materia orgánica y mayor tamaño de los poros. Si el uso de la tierra tiene buen manejo y se aproxima a las condiciones citadas, se favorecerá el proceso de la infiltración, en caso contrario, cuando la tierra está sometida a un uso intensivo por animales o sujeto al paso constante de vehículos, la superficie se compacta y se vuelve impermeable.

g. Temperatura. Las temperaturas bajas dificultan la infiltración.



B. Medida de la infiltración. La determinación de la infiltración se puede hacer empleando 3 métodos principalmente: infiltrómetros, análisis del hidrograma del escurrimiento y lisímetros (Chow et al, 1988).

4.1.4.2. Modelo de humedad de Van Genuchten. Dentro de los modelos para estimar la humedad en el perfil del suelo, Van Genuchten en 1980, presentó una ecuación para el cálculo del grado de saturación efectiva (S_e) para cada profundidad (h), la cual tiene ventajas para su implementación en los modelos de cálculo de flujo en medios porosos no saturados, ecuación 4.4:

$$S_e = \frac{1}{[1+(\alpha h)^n]^m} \quad (4.4)$$

Donde α , n y m son constantes empíricas. La ecuación de Van Genuchten con $m=1$ fue usada por Ahuja et al., (1972). La ecuación tiene como límite la expresión de Brooks y Corey con $\lambda = mn$.

Cuando n tiende a infinito (mientras el producto mn es constante e igual a 0.4), aparece la curva de Brooks y Corey, con un determinado valor de entrada de aire. Las restricciones usuales utilizadas para la ecuación de Van Genuchten son $m=1-1/n$ y $m = 1-2/n$. Los resultados más estables se obtienen generalmente cuando se utilizan las restricciones para una serie incompleta de datos.

4.1.4.3. Modelo de conductividad hidráulica Van Genuchten. Para el modelo de conductividad hidráulica ecuación 4.5 y 4.6, Van Genuchten tiene un adecuado ajuste a las curvas de datos experimentales y comúnmente es utilizado como curva de comparación para los nuevos modelos propuestos por los investigadores. Van Genuchten (1980) desarrolló una curva característica de humedad del suelo y además, desarrolló un modelo para el cálculo de conductividad hidráulica utilizando el modelo de Mualem.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1+(\alpha h)^n]^m} \quad (4.5)$$



$$K(h) = K_s \left[\frac{[1+(\alpha h)^n]^m - (\alpha h)^{n-1}}{[1+(\alpha h)^n]^{m(l+2)}} \right] \quad (4.6)$$

Donde:

$\theta(h)$ = Humedad del suelo, cm^3/cm^3 ,

$K(h)$ = Conductividad hidráulica, $\text{cm}/\text{día}$

θ_s = Contenido de agua a saturación, cm^3/cm^3 ,

θ_r = Contenido de agua residual, cm^3/cm^3 ,

K_s = Conductividad hidráulica a saturación, $\text{cm}/\text{día}$

h = Profundidad, en cm ,

α , m , n y l parámetros de ajuste, $m = 1-1/n$.

Las funciones hidráulicas de los suelos necesitan de la definición de parámetros del suelo. El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (1975) presentó los valores medios de las propiedades hidráulicas de los suelos de acuerdo a la clasificación de USDA, cuadros 4.1 y 4.2. Estos parámetros pueden servir como guía para estimar inicialmente los parámetros del suelo.

Cuadro 4.1. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Rawls et al., 1982), α y n son los parámetros de Van Genuchten.

Textura	θ_r	θ_s	α	n	K_s
Unidad	cm^3/cm^3	cm^3/cm^3	(1/cm)	Adim.	(cm/día)
Arena	0.020	0.417	0.138	1.592	504.00
Arena-Loam	0.035	0.401	0.115	1.474	146.60
Loam arenoso	0.041	0.412	0.068	1.322	62.16
Loam	0.027	0.434	0.090	1.220	16.32
Limo-loam	0.015	0.486	0.048	1.211	31.68
Loam arenoso arcilla.	0.068	0.330	0.036	1.250	10.32
Loam arcilloso	0.075	0.390	0.039	1.194	5.52
Loam limoso arcilla.	0.040	0.432	0.031	1.151	3.60
Arcilla arenosa	0.109	0.321	0.034	1.168	2.88
Arcilla limosa	0.056	0.423	0.029	1.127	2.16
Arcilla	0.090	0.385	0.027	1.131	1.44

Cuadro 4.2. Valores medios para los parámetros de los suelos, (Carsel et al., 1988), α y n son los parámetros de Van Genuchten.

Textura	θ_r	θ_s	α (1/cm)	n	K_s (cm/día)
Unidad	cm ³ /cm ³	cm ³ /cm ³	(1/cm)	Adim.	(cm/día)
Arena	0.045	0.430	0.145	2.680	712.80
Arena-Loam	0.057	0.410	0.124	2.280	350.20
Loam arenoso	0.065	0.410	0.075	1.890	106.10
Loam	0.078	0.430	0.036	1.560	24.96
Limo	0.034	0.460	0.016	1.370	6.00
Limo-loam	0.067	0.450	0.020	1.410	10.80
Loam arenoso arcilla.	0.100	0.390	0.059	1.480	31.44
Loam arcilloso	0.095	0.410	0.019	1.310	6.24
Loam limoso arcilla.	0.089	0.430	0.010	1.230	1.68
Arcilla arenosa	0.100	0.380	0.027	1.230	2.88
Arcilla limosa	0.070	0.360	0.005	1.090	0.48
Arcilla	0.068	0.380	0.008	1.090	4.80

4.1.5. Esgurrimiento superficial

El esgurrimiento se define como el agua que proviene de la precipitación sobre o bajo la superficie del terreno y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta una salida (Aparicio, 1999). Ésta agua que llega hasta la superficie terrestre sigue diversos caminos en tres clases: esgurrimiento superficial, esgurrimiento subsuperficial y esgurrimiento subterráneo.

En el ciclo del esgurrimiento, figura 4.3, puesto que es un fenómeno complicado se puede describir todos los factores que lo afectan, en general agrupar en (Tetumo, 1993):

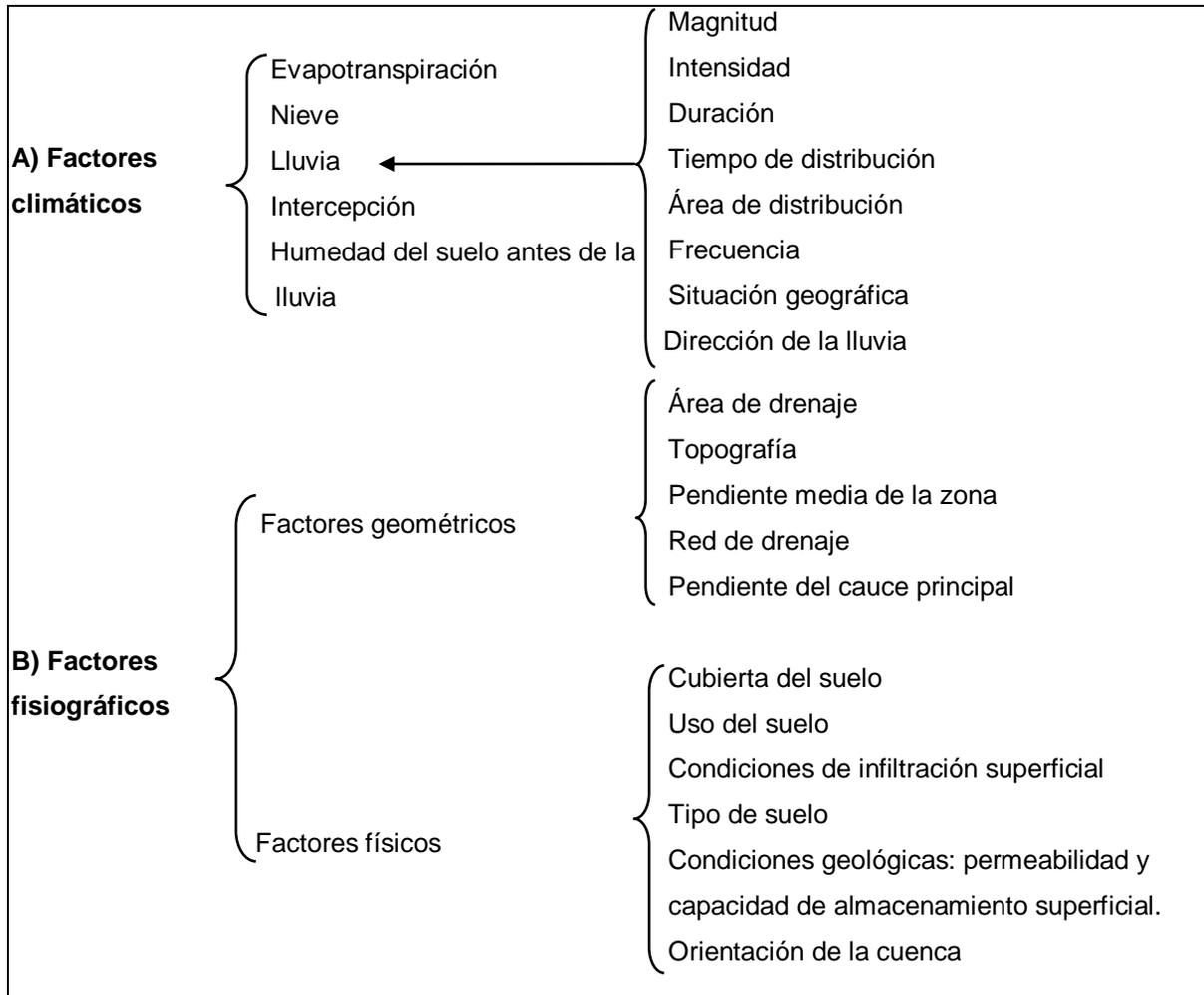


Figura 4.3. Factores de efectos del escurrimiento, (Tetumo, 1993)

En una lluvia, cuando el agua alcanza la superficie del suelo, ésta empieza a infiltrarse hasta el punto en que los poros de la capa superior del mismo se saturan, provocando que se comiencen a llenar las depresiones del terreno y el agua empiece a escurrir en la superficie. Durante su trayectoria, se sigue infiltrando e incluso se evapora en pequeñas cantidades hasta llegar a un cauce bien definido, figura 4.4.

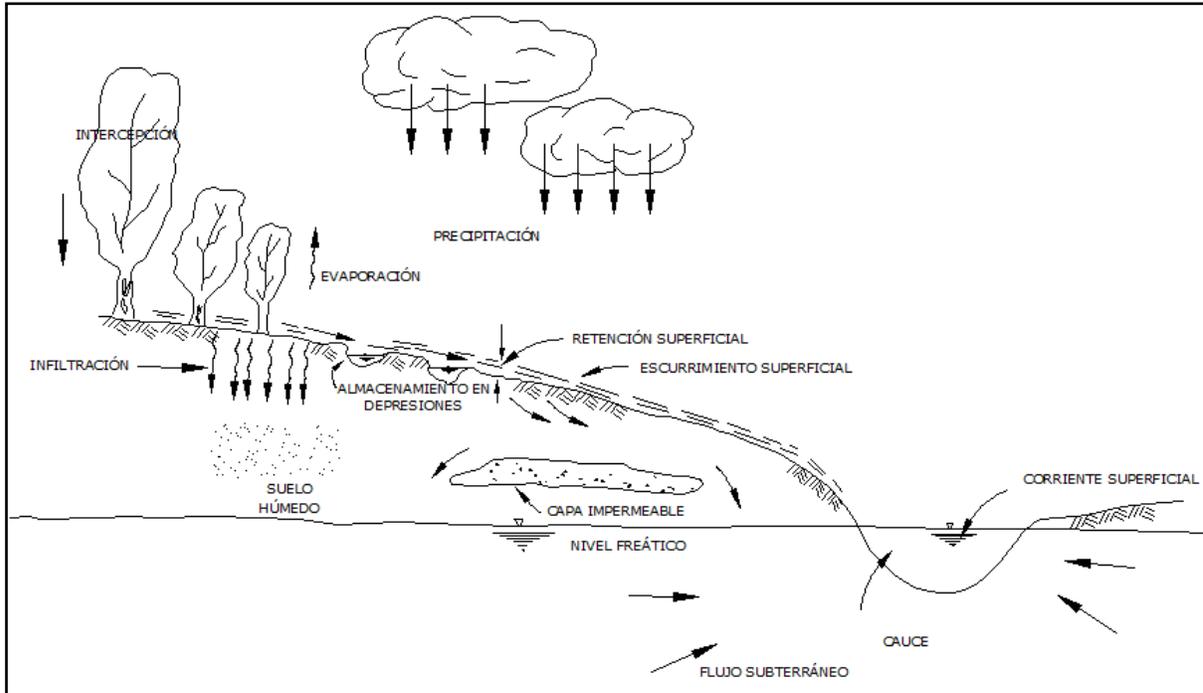


Figura 4.4. Ciclo del escurrimiento, (De Weist, 1967)

El flujo sobre el terreno y el flujo en el cauce definido forman el escurrimiento superficial. Parte del agua que se infiltra, escurre cerca de la superficie del suelo, y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento subsuperficial. Una parte del agua infiltrada, llega hasta partes inferiores del suelo para formar depósitos de agua subterránea, a éste se denomina escurrimiento subterráneo.

El escurrimiento directo es el que se agrega a la corriente después de ocurrida la lluvia o tormenta y se forma por la suma del escurrimiento superficial y el escurrimiento subsuperficial inmediato, además de la precipitación que cae en el cauce o canal, esta última se considera como parte del escurrimiento superficial, figura 4.5.

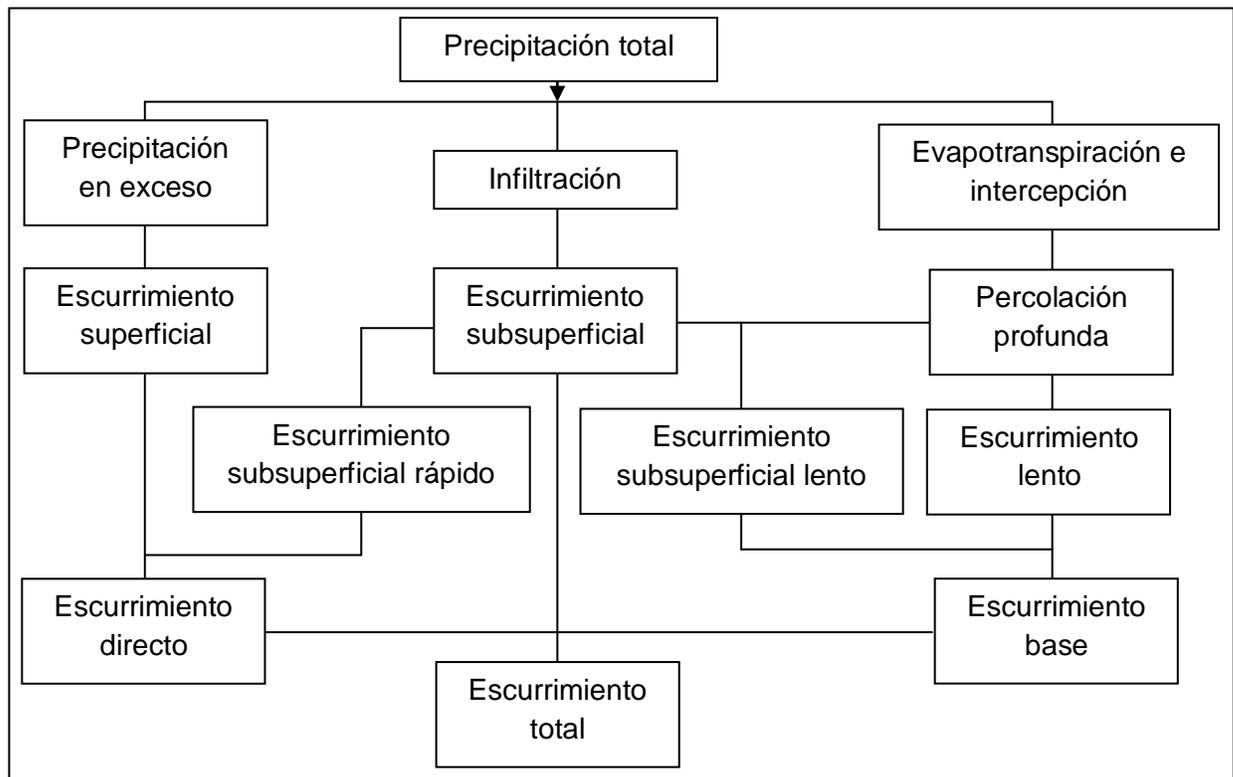


Figura 4.5. Diagrama del escurrimiento, (Tetumo, 1993)

El escurrimiento base es el que se compone del escurrimiento subterráneo y el escurrimiento subsuperficial retrasado, por lo que es un escurrimiento lento.

El escurrimiento subsuperficial puede entrar dentro de los dos tipos de escurrimiento dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo.

4.2. CUENCA HIDROLÓGICA

En los estudios hidrológicos, la unidad básica de estudio es la cuenca hidrológica, esta unidad es única y con límites bien definidos que permiten, hasta cierto punto aislar sus procesos y entenderlos aceptablemente.



4.2.1. Definiciones

La cuenca hidrológica o de drenaje es toda el área drenada por una corriente ó por un sistema de corrientes, cuyas aguas concurren a un punto de concentración o de salida, es el área total que contribuye al escurrimiento y que proporciona todo o parte del flujo de la corriente principal y sus corrientes tributarias (De Wiest, 1965).

Toda cuenca hidrológica está limitada por una línea imaginaria formada por los puntos de nivel topográfico donde los escurrimientos cambian de sentido que cruza las corrientes en los puntos de salida, esa línea recibe el nombre de parteaguas y constituye el límite con cuencas adyacentes, es decir una cuenca está limitada exteriormente por otras cuencas y a su vez interiormente está formada por las subcuencas correspondientes a las áreas de captación de cada uno de sus cauces.

Para facilitar el estudio de las cuencas, muchas veces es necesario dividirla en subcuencas o cuencas tributarias definidas por sus propios parteaguas.

La diferenciación entre cuencas grandes y pequeñas es difícil, si solo se considera su tamaño. En hidrología dos cuencas del mismo tamaño son diferentes. Sin embargo, se define como cuenca pequeña aquella cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración, en donde predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce. Con fines prácticos se consideran cuencas pequeñas aquellas con superficies de hasta 250 km² (Chow, 1994).

4.3. ESTUDIO DE CUENCAS HIDROLÓGICAS

El estudio de las cuencas hidrológicas es muy importante para definir la cantidad de agua que se precipita, los escurrimientos resultantes y sus efectos. El aprovechamiento de los recursos hidráulicos en una cuenca comprenden los usos del agua dentro de ella y su ordenamiento de tal forma que este recurso natural no



sea sobreexplotado, considerando los compromisos de las necesidades hídricas dentro de la cuenca.

El conjunto de actividades para estudiar las cuencas, genéricamente se llama caracterización de cuencas hidrológicas, la que incluye varias fases como: compilación de información existente, reconocimiento en campo, delimitación de la cuenca (definición de la hidrografía y parteaguas), elaboración del mapa de la cuenca y la caracterización morfométrica.

Para llevar a cabo el estudio de una cuenca hidrológica, además de reconocerla físicamente, es necesario tener su representación cartográfica, en un mapa de la cuenca, en la que se plasmen clara y dimensionalmente todas sus características cualitativas y cuantitativas. Para tener esta información planimétrica, altimétrica, edafología, de relieve, geológica, de cobertura vegetal y uso de suelo, clima, hidrométrica y socioeconómica. Hoy en día con el avance de los sistemas de información geográfica y el desarrollo de software especializado, garantiza una optimización en el tiempo y en los resultados de los parámetros característicos para las cuencas.

4.3.1. Delimitación digital

La delimitación se refiere a definir, a partir de su hidrografía y su configuración topográfica, en forma precisa el parteaguas de la cuenca y la red hidrológica, mediante el uso de los sistemas de información geográfica.

4.3.2. Compilación de la información

Al realizar el estudio de una cuenca hidrológica, es necesario, como punto de partida, compilar la información existente referente al área de estudio; geográfico, geodésico, cartográfico, climatológico, hidrológico y de estudios realizados anteriormente, si existen. El material cartográfico se refiere a material existente como mapas,



fotografía aérea, satelital, en nuestro país mucha de esta información la produce en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

4.3.3. Reconocimiento preliminar

La primera fase de la caracterización de la cuenca es el reconocimiento físico de la misma y esto se realiza de acuerdo a su tamaño. Si es pequeña, el reconocimiento se puede hacer a pie o en vehículo; si es de grandes proporciones, se tendrá que echar mano de todos los medios con que se cuente y la utilización de los materiales cartográficos compilados. Como resultado de este reconocimiento y con la información recopilada, se delimitará la cuenca mediante la definición sus elementos.

4.3.4. Elaboración de mapas de cuencas a partir de información cartográfica

Algunas veces se pueden obtener mapas que cubran el área en estudio. Los mapas de las cuencas se obtienen de diferentes maneras de acuerdo al tamaño, tipo de estudio y disponibilidad de información cartográfica. En general, los mapas de las cuencas se pueden elaborar con cartografía existente, como las cartas topográficas impresas en papel o en forma digital que elabora el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en diferentes escalas, 1:50,000, ó 1:250,000, etc.; utilizando fotografías aéreas para estudios fotogramétricos, fotografías satelitales y levantamientos topográficos planimétricos y altimétricos específicos.

4.3.5. Topografía

Es la información de la superficie del terreno, la que se obtiene mediante levantamientos altimétricos y su transformación a curvas de nivel, que permiten representar gráficamente dicha superficie y su configuración. Afortunadamente, en el caso de nuestro país, el INEGI, realiza esta importante tarea y hace disponible a todos, la información topográfica en cartas temáticas y a diferentes escalas (1:250,000, 1:50,000, etc.), que son el resultado de los múltiples estudios, fotografía



aérea, elaboración de la información geográfica y digital. Actualmente se cuenta con modelos digitales de elevación de todo el territorio a escalas 1:250,000 y 1:50,000, procesados con sistemas de información geográfica.

4.3.5.1. Modelos digitales de elevaciones. Desde el punto de vista de estimación del funcionamiento hidrológico de una cuenca, en primer lugar se requiere del mapa base, que se elaboró a partir de la delimitación o definición de los límites de la cuenca o parteaguas y la definición de su red de cauces o hidrografía.

Actualmente, esta actividad se lleva a cabo con el auxilio de Modelos Digitales de Elevaciones, MDE's (o DEM's, por su siglas en ingles, Digital Elevation Models), en este estudio se utilizan en forma sinónima ambas siglas DEM's o MDE's. Para llevar a cabo esta parte del trabajo de investigación se utilizaron estos modelos digitales de elevaciones.

Estos DEM's, son bases de datos que generalmente elaboran instituciones oficiales encargadas del estudio de los territorios de los países y otras interesadas en obtener la información y su comercialización. Una de estas instituciones es la USGS (United States Geological Survey) quien es la responsable de publicar los Modelos Digitales de Elevación producto de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) realizada en el 2000 entre la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y las Agencias Espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI).

Para México, la institución encargada de los DEM's escala 1:50 000 es INEGI y disponibles en su página de internet (www.inegi.gob.mx). Los cuales pueden ser descargados con teclear en algún buscador como Continuo de Elevación Mexicano 2.0 ó por sus siglas CEM 2.0.

Para obtener y descargar los DEM's, en la página de internet de INEGI con dirección <http://mapserver.inegi.gob.mx/DescargaMDEWeb/>.



Seleccionando el área que se desea descargar, para esto requiere de los extremos de la carta. En este apartado se despliega la opción para introducir las coordenadas que se necesitan, también pueden descargarse por el nombre de la carta que abarque la zona. Una vez aceptada el área a descargar, aparece en la parte inferior el link del DEM en formato *.zip.

El nombre de Modelo Digital de Elevación implica una representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos, generalmente esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación. El continuo de elevaciones mexicano 2.0, tiene una resolución de 30 m X 30 m.

4.3.6. Parteaguas

La definición del parteaguas se realiza localizando los puntos donde el sentido de los escurrimientos en los cauces en los extremos de la hidrografía cambia de dirección.

La hidrografía y el parteaguas se pueden marcar con colores en un mapa o digitalizándolo en un mapa digital de la región, con las herramientas de autocad o en arc gis.

4.3.7. Hidrografía

En forma simultánea, observando la configuración del terreno representada por las curvas de nivel, se sigue el desarrollo de los cauces del sistema hidrográfico desde su punto de salida o de cierre hasta alcanzar los cauces más pequeños sin ramificación marcándolos de alguna manera, con colores, grosor de línea o por numeración.



4.4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

Consiste en el análisis morfométrico, fisiográfico y de relieve, de acuerdo a la estimación de parámetros de caracterización específica (lineales, de área y de relieve), muchas veces estas divisiones se hacen de acuerdo a las estaciones hidrométricas existentes en la zona, (Chávez, 2007).

La descripción sistemática de la geometría de una cuenca hidrológica y su sistema de cauces requiere de la definición de aspectos de área de la cuenca, de medidas lineales del sistema de drenaje, y del relieve del sistema de cauces y pendientes de las subcuencas contribuyentes. Mientras las dos primeras categorías de medida son planimétricas, la tercera categoría trata de los parámetros verticales de las formas de la cuenca hidrológica.

4.4.1. Parámetros lineales asociados a la hidrografía

La hidrografía de la cuenca está representada por el desarrollo de todos los cauces de concentración de ella. Los cauces se siguen a partir de su salida y se llegan hasta los límites de la cuenca. Los cauces principales o corrientes que concentran al escurrimiento total y los tributarios que son los cauces que conducen las corrientes al cauce principal (Llamas, 1993).

Las corrientes se pueden dividir en tres clases generales dependiendo del tipo de escurrimiento, el cual está relacionado con las características físicas y condiciones climáticas de la cuenca. Así una corriente puede ser efímera, intermitente o perenne. Una corriente efímera es aquella que sólo lleva agua cuando llueve o inmediatamente después. Una corriente intermitente lleva agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en la época de lluvia; su aportación cesa cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce. Una corriente perenne contiene agua todo el tiempo, ya que aún en épocas de sequía o estiaje es abastecida



continuamente con aguas subálveas del nivel freático que permanece arriba del fondo del cauce.

Dentro de dichos parámetros se encuentra la densidad de drenaje, densidad de corrientes, pendiente media del cauce principal, tiempo de concentración y orden de corriente.

4.4.1.1. Orden de corrientes. El primer paso en el análisis de cuencas hidrológicas es la definición del orden de corrientes, introducido por Horton, y ligeramente modificado por, Chow et al. 1988. Asumiendo que se tiene disponible un mapa del sistema de cauces, incluyendo todas las líneas de flujo permanentes e intermitentes, los primeros cauces o sea los que están muy próximos al parteaguas se designan como de orden 1. Donde se unen dos cauces de orden 1 se forma un segmento de cauce de orden 2; donde se unen dos de orden 2 se forma un segmento de orden 3; y así sucesivamente. Un cauce de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones; un cauce de segundo orden es el que posee únicamente ramificaciones de primer orden; un cauce de tercer orden es el que posee solo tributarios de primero y segundo orden, etc. El número de orden de la cuenca está dado por el número de orden del cauce principal.

La utilidad del sistema de orden de corrientes es que en promedio, si una muestra de sistemas de cauces se analiza, el número de orden es directamente proporcional al tamaño de la cuenca de drenaje, a las dimensiones de los cauces y al caudal en ese lugar del sistema. Como el número de orden es adimensional dos sistemas de drenaje, que difieren gradualmente en cada línea se pueden comparar con respecto a puntos correspondientes en su geometría, a través del uso de orden de corrientes.

Una vez que a los cauces del sistema o red de drenaje se les ha asignado su número de orden, los segmentos de cada orden se cuentan y se miden para tener el número de segmentos N_u de orden u , y la longitud de flujo de cada segmento de orden L_u .



4.4.1.2. Relación de bifurcación. El número de segmentos de un orden dado u ecuación 4.7, será menor que el siguiente orden inferior, $u-1$ y mas que el del orden superior, $u+1$. Las relaciones del número de segmentos de un orden dado con el que le sigue N_{u+1} se denomina relación de bifurcación R_{bu} y se expresan como:

$$R_{b_u} = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (4.7)$$

En la que:

R_{bu} = Relación de bifurcación de orden u , adimensional,

N_u = Número de cauces de orden u , adimensional.

4.4.1.3. Ley de los números de orden de las cuencas. La relación de bifurcación no será precisamente la misma de orden al siguiente, debido a las variaciones aleatorias de la geometría de la cuenca, pero tendrá a ser constante a través de sus series de relaciones de bifurcación, expresada en la ecuación 4.8 (Chow, 1964).

$$N_u = R_{b_u}^{k-u} \quad (4.8)$$

Donde:

K = Es el orden del cauce o segmento troncal.

R_{bu} = Relación de bifurcación de orden u , adimensional,

N_u = Número de cauces de orden u , adimensional.

Las relaciones de bifurcación varían entre 3.0 y 5.0 para cuencas en los cuales las estructuras geológicas no distorsionan el patrón de drenaje. El valor teórico mínimo posible es de 2 el cual rara vez se presente bajo condiciones naturales.

Debido a que la relación de bifurcación es una propiedad adimensional y debido a que el sistema de drenaje en materiales homogéneos tiende a presentar similitud geométrica, no es sorprendente que la relación muestre solo una variación pequeña de región a región.



4.4.1.4. Longitud media de cauces. La longitud media (\bar{L}_u) , de los segmentos de cauces de orden u es una propiedad dimensional que revela el tamaño característico de los componentes del sistema de drenaje y las superficies de la cuenca que contribuyen a un escurrimiento.

Se mide la longitud de los cauces (L_{ui}) , para obtener la longitud media de los cauces de orden u , se divide la longitud total entre el número de segmentos N_u de ese orden.

$$\bar{L}_u = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} L_{ui}}{N_u} \quad (4.9)$$

4.4.1.5. Densidad de drenaje. La longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida entre su área total de drenaje o longitud de cauces por unidad de área. Se calcula con la expresión 4.10:

$$Dd = \frac{Lc}{Ac} \quad (4.10)$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje, km / km^2 ,

Lc = Longitud total de corrientes, km ,

Ac = Área de drenaje, km^2 .

Una densidad de drenaje alta refleja una cuenca bien drenada que debe responder relativamente rápido al efecto de la precipitación; una cuenca de baja densidad de drenaje refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta. Los valores observados de la densidad de drenaje varían desde 4 a 400 en algunas cuencas. En cuencas donde los materiales del suelo son resistentes a la erosión son



muy permeables o el relieve es bajo, ocurren densidades de drenaje bajas. Los valores altos de densidad de drenaje reflejan áreas con suelos fácilmente erosionables o relativamente impermeables con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

4.4.1.6. Densidad de corrientes. Es un indicador de la eficiencia de drenaje de una cuenca, pero debe manejarse con criterio, debido a que puede ocurrir que se tengan dos cuencas diferentes con la misma densidad de corrientes y estar drenadas en diferente forma, dependiendo de la longitud y disposición de corrientes.

Se representa como la relación existente entre el número de corrientes y el área drenada total, mediante la ecuación 4.11:

$$Dc = \frac{Nc}{Ac} \quad (4.11)$$

Donde:

Dc = Densidad de corrientes, cauces/ km²,

Nc = Número de corrientes o cauces, adimensional,

Ac = Área de la cuenca, en km².

4.4.1.7. Longitud media de flujo superficial. El escurrimiento de superficie sigue un sistema de trayectorias en el terreno pendiente abajo desde el parteaguas, al cauce más cercano. Horton definió la longitud del flujo de superficie Lg, como la longitud de la proyección horizontal de la trayectoria de flujo fuera de los cauces desde un punto en el parteaguas a un punto en el cauce adyacente (Chow, 1964).

Durante la evolución del sistema de drenaje, Lg se ajusta a una magnitud apropiada a la escala de las cuencas de primer orden y es aproximadamente igual a un medio del recíproco de la densidad de drenaje.

Según Linsley, 1977 la longitud promedio del flujo de superficie se puede estimar con la ecuación 4.12:



$$\bar{L}_g = \frac{1}{2D_d} \quad (4.12)$$

En la que:

\bar{L}_g = Longitud de flujo de superficie, km,
Dd = Densidad de drenaje, cauces/km².

Esta ecuación ignora los efectos de las pendientes del terreno y de los cauces, que tienden a alargar la trayectoria real del flujo de superficie.

4.4.1.8. Relación de longitud-área. Las observaciones de un buen número de cuencas alrededor del mundo, han permitido establecer la existencia de relaciones entre el área de la cuenca y la longitud del cauce principal (Linsley, 1977):

$$L = \alpha A_c^\beta \quad (4.13)$$

En la que:

L = Longitud del cauce principal, km,
Ac = Área de la cuenca, km²
 α, β = parámetros de regresión.

Las observaciones de un buen número de cuencas en el mundo parecen comprobar la existencia de una relación de la forma:

$$L = 1.27 A_c^{0.6} \quad (4.14)$$

El exponente (β) varía generalmente de 0.5 a 0.7 y el valor de α más aceptable desde el punto de vista práctico, es 1.27; ha medida que las cuencas se hacen más extensas, tienden a ser más alargadas.

4.4.2. Parámetros lineales y de área de la cuenca

Los parámetros más importantes son el área de la cuenca, que se define como la proyección horizontal del parteaguas (Chávez, 2007). Y la superficie ocupada por esta, influyen directamente sobre el volumen total del escurrimiento, ya que considerando una lluvia uniforme sobre una cuenca grande y otra más pequeña, en igualdad de condiciones podría generar escurrimiento de manera proporcional al área de las mismas, figura 4.6.

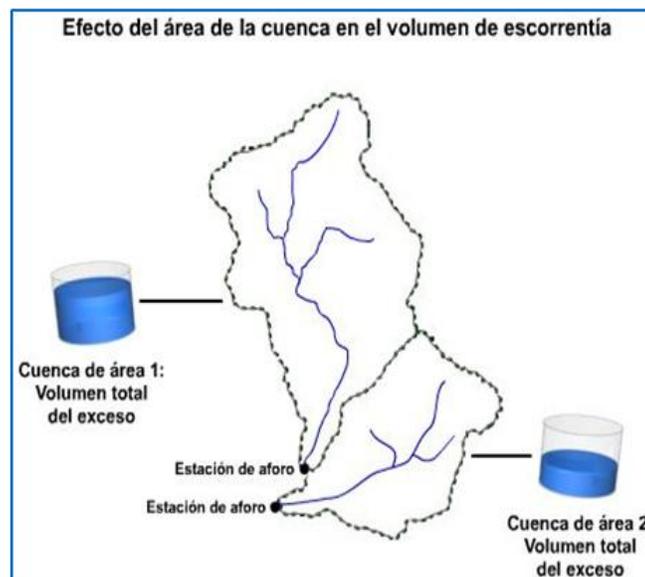


Figura 4.6. Parámetro área de una cuenca que influye en el escurrimiento superficial

Por otro lado, la longitud de la cuenca es la distancia de la salida hasta el punto más alejado del parteaguas midiéndose paralelamente al cauce principal. Y este parámetro afecta el tiempo de recorrido del escurrimiento en dos cuencas de forma similar, pero diferente longitud. Obviamente a mayor distancia, mayor será el tiempo que tardara en alcanzar la estación de aforo y viceversa, figura 4.7.

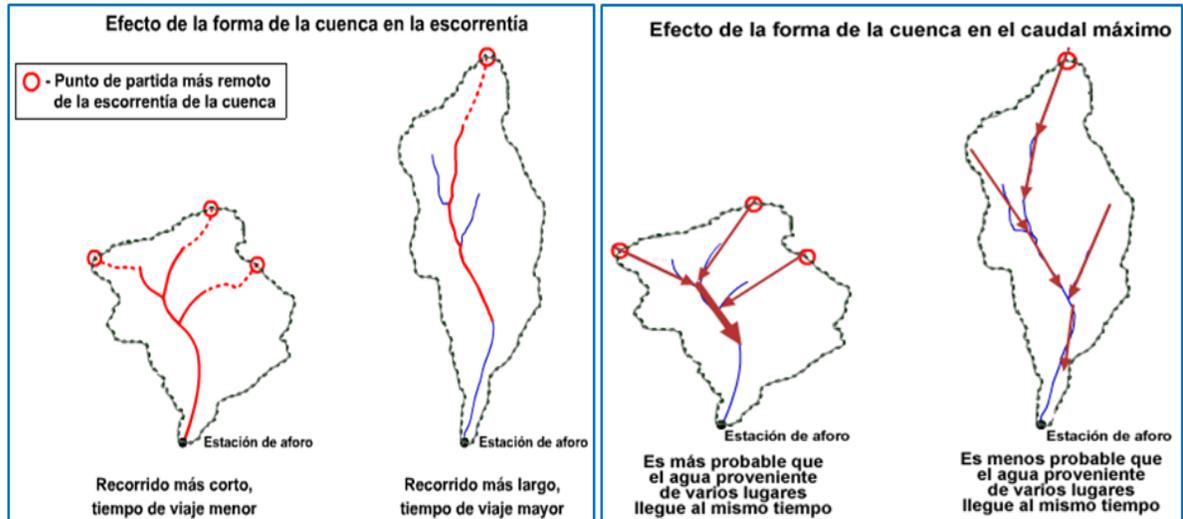


Figura 4.7. Parámetro de la forma de una cuenca que influye en el escurrimiento superficial

La longitud del cauce, el cual depende de las características geomorfológicas de la cuenca. En las zonas planas y con sedimentos aluviales es más probable encontrar cauces sinuosos, caso contrario ocurre en áreas de montaña con rocas o materiales resistentes.

En los cauces sinuosos o meandricos, el agua recorre una distancia mayor, aumentando el tiempo para llegar a la salida de la cuenca. Los meandros aumentan el tiempo de viaje del escurrimiento a través de la cuenca y pueden reducir el volumen de escurrimiento en general, figura 4.8.

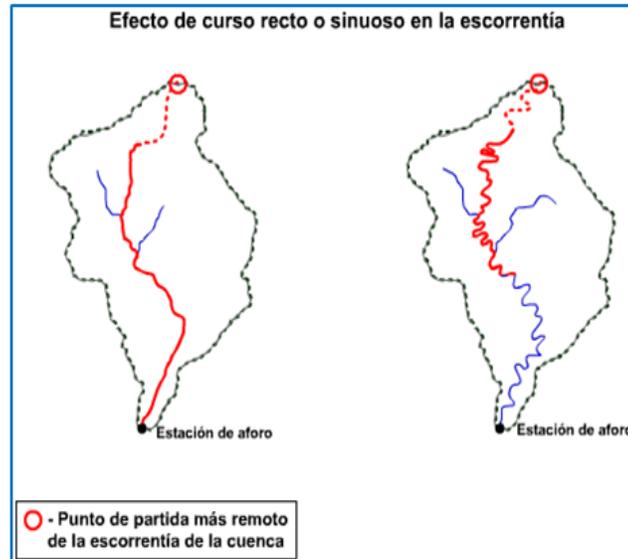


Figura 4.8. Parámetro de sinuosidad del cauce que influye en el escurrimiento superficial

La forma de la cuenca afecta los hidrogramas y las tasas de flujo máximo. Se puede describir cualitativa o cuantitativamente.

4.4.2.1. Forma. Se describe utilizando la forma cualitativa y cuantitativa:

A. Descripción cualitativa. La mayoría de las cuencas tienden a tener forma periforme; sin embargo las características geológicas conducen a numerosas desviaciones, a partir de esa forma. Por lo tanto una primera aproximación es indicar la forma aproximada de la cuenca de acuerdo a su aspecto: geométrico (triangular, rectangular, circular, etc.), otro puede ser su aspecto con una figura conocida (pera, hoja, o alguna silueta de animal u objeto conocido) todo esto es subjetivo y es de acuerdo a la imaginación del que hace el estudio.

B. Descripción cuantitativa. Los parámetros asociados a la forma son el coeficiente de compacidad, razón de elongación y factor de forma. Estos afectan en magnitud y el desarrollo del tiempo que tarda en ocurrir el caudal máximo en la salida indican que tan alargada, estrecha, ovalada o redonda es la cuenca; modificando así la forma del hidrograma esperado, figura4.9.

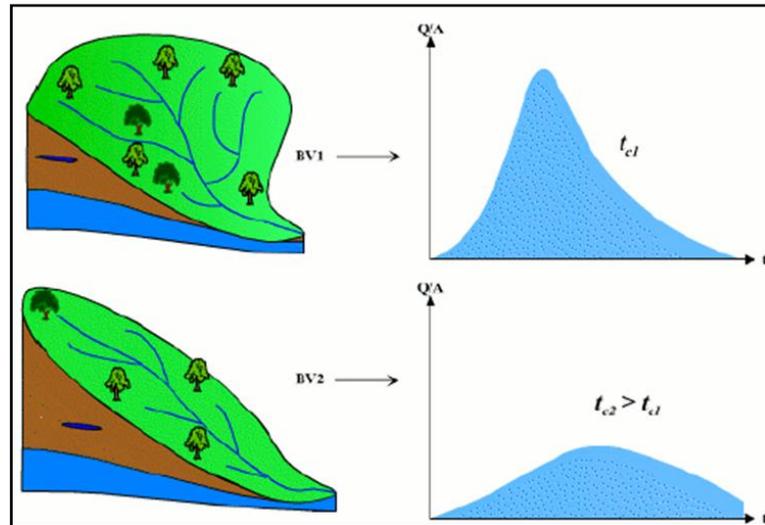


Figura 4.9. Efecto de la forma de la cuenca en los hidrogramas de salida

4.4.2.2. Coeficiente de compacidad. Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia ecuación 4.15. Cuánto más cercano esté el índice a la unidad, la cuenca será más circular y por tanto más compacta, y en la medida que aumenta, la cuenca adquiere una forma más oval (Viramontes et al., 2008).

La expresión es la siguiente:

$$C_c = \frac{0.282 P_c}{\sqrt{A}} \quad (4.15)$$

Donde:

C_c = Coeficiente de compacidad,

P_c = Perímetro de la cuenca, km,

A = Área de la cuenca, km^2 .

4.4.2.3. Razón de elongación. Es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma ecuación 4.16, (Viramontes et al., 2008).



La expresión es la siguiente:

$$Re = \frac{1.128 \sqrt{A}}{Lc} \quad (4.16)$$

Donde:

Re = Razón de elongación,

Lc = Longitud del cauce principal de la cuenca, km,

A = Área de la cuenca, km².

4.4.2.4. Factor de forma. Con la finalidad de tener algún índice que indique la forma, Horton en 1945, sugirió una expresión cuantitativa a través de un factor adimensional de forma Rf, como índice de forma de una cuenca, el cual es la relación del área de la cuenca Ac, entre la longitud de la cuenca al cuadrado Lb ecuación 4.17 (Chow, 1994).

$$Rf = \frac{Ac}{Lb^2} \quad (4.17)$$

Donde:

Rf = Factor de forma, adimensional,

Ac = Área de la cuenca, en km² y

Lb = Longitud de la cuenca, en km.

Por ejemplo para un círculo $Rf = \pi / 4 = 0.79$; para un cuadrado, con la salida en el punto medio de uno de sus lados $Rf = 1.0$; y para un cuadrado con la salida en la esquina $Rf = 0.5$

4.4.3. Parámetros asociados al relieve

El relieve ó topografía de una cuenca puede tener más influencia sobre su respuesta hidrológica que la forma de la misma.



4.4.3.1. Pendiente media de la cuenca. Existen varios métodos o criterios para evaluar la pendiente de una cuenca, dependiendo del uso que se le den a los resultados o bien al criterio que lo requiere; así se tienen varios métodos propuestos como el de Alvord, de Horton y de Nash (De Weist 1965).

4.4.3.2. Elevación media de la cuenca. Cuando uno o más factores de interés en la cuenca dependen de la elevación, es útil saber cómo está distribuida la cuenca en función de la elevación. La elevación media de una cuenca se puede estimar de varias maneras, se presentan dos: el método de intersecciones y el método de la curva hipsométrica (Chávez, 2007).

4.4.3.3. Pendiente del cauce. La pendiente del cauce influye sobre la velocidad del flujo y debe jugar un papel muy importante en la forma de los hidrogramas. Los perfiles típicos de los cauces naturales son cóncavos. Por ésta razón, la definición de la pendiente promedio de un cauce en una cuenca es muy difícil. Por lo general sólo se considera la pendiente del cauce principal, los métodos que se describen es el de longitud elevación y compensación del área (Chávez, 2007).

A. Método de la relación longitud-elevación. El perfil del cauce se puede representar en una gráfica, colocando los valores de las distancias horizontales medidas sobre el cauce en relación a sus elevaciones respectivas, como las intersecciones con las curvas a nivel. En general, la pendiente de un tramo de cauce se considera como el desnivel entre los extremos, dividido entre la longitud horizontal ecuación 4.18.

$$S = \frac{H}{L} \quad (4.18)$$

Donde:

S = Pendiente del cauce, adimensional,

H = Desnivel, en km,

L = Longitud del cauce, en km.



La definición anterior se aproxima más a la pendiente natural conforme disminuye la longitud del tramo por analizar.

B. Método de compensación de áreas. Otra forma de definir la pendiente de un cauce es aceptando como la pendiente del cauce, la de una línea recta que se apoya en el extremo inicial del dibujo del tramo por estudiar y al pivotarla en dicho punto lograr que las área que se definen entre la línea del perfil del cauce y la pivotante, sea la misma área abajo y arriba de la del perfil. La pendiente de la línea de compensación se adopta como la pendiente del cauce.

4.4.5. Tiempo de concentración

Chow (1994), define al tiempo de concentración como el tiempo para el cual toda la cuenca empieza a contribuir al flujo, desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca. Para el cálculo se han desarrollado diferentes ecuaciones como son: Kirpich (1940), California Culverts Practice (1942), Izzard (1946), Federal Aviation Administration (1940), Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley (1965), Aron y Erborge (1973), Ecuación de retardo SCS (1973), Cartas de velocidad promedio del SCS (1986).

4.5. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

El análisis de series de tiempo de datos hidrometeorológicos, es una herramienta para analizar la evolución del clima pasado y presente. Una forma de realizarse es mediante el análisis de la precipitación, la temperatura y el escurrimiento, de las estaciones convencionales, ubicadas dentro de la zona de estudio.

4.5.1. Acervo de la información meteorológica

En México, podemos encontrar la información de las estaciones meteorológica en el Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC (IMTA, 2006).



4.5.2. Integración de datos meteorológicos

Al conjunto de estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca, distribuidas de tal forma que sus observaciones puedan facilitar los datos básicos necesarios para el conocimiento del régimen atmosférico e hidrológico de la cuenca. Es necesario procesar las variables meteorológicas e hidrométricas, identificándolas por su clave, las coordenadas, el nombre y la descripción de las variables que reporta. Ordenar la información de las variables que reporta, a nivel diario, mensual y anual. Las estaciones que se utilizan, son las que presentan mínimo diez años de información en sus registros.

4.5.3. Cálculo de datos faltantes

El análisis para los datos faltantes de manera mensual, se realiza considerando un promedio a partir de los doce registros contiguos. Para la precipitación se eliminan los años que presentan espacios en los meses, principalmente en los de lluvia, y se analizan los años con registro.

4.5.4. Análisis meteorológico

A partir de los datos descritos se elaboran gráficas de series de tiempo, de precipitación y temperatura media mensual y mediante la clasificación de García (1964) darle el tipo de clima a cada estación.

4.5.5. Análisis de la información de precipitación

La importancia de los datos recabados de la precipitación, radica en la interpretación adecuada que se le pueda dar para evitar conclusiones erróneas al trabajar con datos equívocos o con valores aparentes: Estos errores pueden ocasionarse por causas debidas a los instrumentos de medición, al sitio en que se encuentra la



estación, a los métodos empleados para registrarlos y al factor humano que puede ser apreciable, etc.;

Para el análisis de la precipitación se utilizan los registros históricos de la precipitación diaria observada en las estaciones meteorológicas instaladas en todo el país. A partir de esta información se sintetizan las diferentes expresiones de ella, como son las precipitaciones mensuales, anuales, medias mensuales, y medias anuales, ecuaciones 4.19 a 4.23 (Chávez, 2007).

Precipitación diaria, día i mes j año k , mm:

$$Pr_{ijk} \quad (4.19)$$

Precipitación mensual del año k :

$$Pr_{jk} = \sum_{i=1}^{NDM_j} Pr_{ijk} \quad (4.20)$$

Precipitación anual del año k :

$$Pr_k = \sum_{j=1}^{12} Pr_{jk} \quad (4.21)$$

Precipitación media mensual, mes j :

$$\overline{Pr}_j = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Pr_{jk}}{NAR} \quad (4.22)$$

Precipitación media anual:

$$\overline{Pr}_{anual} = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Pr_k}{NAR} \quad (4.23)$$



Donde:

P_{ijk} = Precipitación del día i del mes j del año k , mm,

i = Número de día del mes j , ($i= 1,2,3,\dots,NDM_j$),

j = Número de mes ($j= 1,2,3,\dots,12$),

k = Número de año ($k= 1,2,3,\dots,NAR$),

NDM_j = Número de días del mes j , (28, 29,30 ó 31).

NAR = Número de años de registro.

4.6. ANÁLISIS HIDROMÉTRICO

El análisis de series de tiempo de datos hidrométricos, es una herramienta para analizar la evolución del escurrimiento, de las estaciones convencionales, ubicadas dentro de la zona de estudio.

4.6.1. Hidrometría

La medición del agua y en especial la de los caudales, con fines hidrológicos, se denomina hidrometría que no es más que la aplicación de los principios de la hidráulica en la medida de los escurrimientos.

El régimen de los caudales de una corriente de agua durante un período determinado, es el único término del balance hidrológico de una cuenca que se puede medir con una precisión aceptable; los otros términos del balance hidrológico como la precipitación, evaporación, transpiración, infiltración, no pueden ser sino estimados mediante fórmulas hidrológicas aproximadas. El dato del caudal es básico e indispensable para los estudios de factibilidad técnica del tipo y forma de los aprovechamientos hidráulicos para plantear los sistemas de recursos hidráulicos. Estos datos se obtienen en las llamadas "estaciones hidrométricas o de aforo" que permiten observar y medir, en series de tiempo, tan largas y frecuentes como sea posible, los caudales escurridos en puntos característicos del río principal, aforar una



corriente en una sección consiste en determinar el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo.

Los métodos de medición de corrientes de agua se clasifican en: volumétricos, sección-control, sección-pendiente y sección-velocidad,

El método de sección y velocidad, que es el utilizado para medir el caudal o gasto en las estaciones hidrométricas, se basa en la ecuación de continuidad. El método se aplica en cauces que lleven agua y es el que se utiliza en las todas las estaciones hidrométricas del país, para lo cual se sigue un procedimiento estándar. Se determinan por separado el área de la sección transversal del cauce y la velocidad del agua que pasa por la sección hidráulica. El área se determina mediante sondeos o por algún otro procedimiento topográfico y la velocidad del agua por flotadores, molinetes y sondeos.

4.6.2. Estaciones hidrométricas

El escurrimiento se mide en sitios seleccionados y acondicionados para la observación y medida del gasto o caudal de la corriente, están localizadas generalmente en tramos de los cauces de los ríos o arroyos, rectos sin meandros aguas arriba y abajo y que no se erosionen fácilmente, para que la sección se mantenga lo más estable en el tiempo.

Los escurrimientos se miden en diferentes formas, como son: niveles de agua en el cauce, caudales instantáneos que pasan en un sitio determinado del cauce y volúmenes de agua que pasan por un sitio determinado y en un período de tiempo dado; los niveles, en metros; el caudal o gasto, en m^3/s o lps [L^3/T] y los volúmenes, en m^3 .

Para realizar el cruce de la corriente es por: vadeo, puente, cable canastilla y lancha, los métodos para obtener la velocidad media en cada fracción del área, empleando



el molinete, se diferencian esencialmente por la profundidad a la cual se realizan las mediciones de la velocidad en la vertical. La velocidad media del flujo en la sección de aforo se considera que se presenta a $6/10$ de la profundidad de observación; en forma más precisa se pueden hacer dos observaciones a $2/10$ y $8/10$ de profundidad respectivamente. De aquí la denominación de los métodos de obtención de la velocidad parcial media, el de los 6 décimos y el de 2 y 8 décimos.

4.6.3. Acervos de información hidrométrica

La frecuencia con que se registra el caudal en una estación hidrométrica depende de cómo se presenten los escurrimientos: si el escurrimiento es regular y no presenta grandes variaciones en general se realizan una o dos observaciones al día; cuando se presentan fuertes variaciones del caudal en el tiempo, como es el caso de la ocurrencia de avenidas, la frecuencia de la observación del gasto es mayor, que puede ser de horas entre observaciones, con el objeto de registrar el ascenso, pico y descenso del valor del caudal de la avenida.

En principio, la importancia del uso de los registros está en conocer los caudales o gastos diarios obtenidos en los aforos y sus expresiones sintéticas como: la media diaria, la mensual, la media mensual, etc., en México la red de estaciones hidrométricas está a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) mediante el Sistema Información de Aguas Superficiales (SIAS), IMTA; 2006, que contiene bases de datos hidrométricos a nivel diario, de la red de estaciones hidrométricas del país.

4.6.4. Análisis de la información hidrométrica

Por lo tanto, la información histórica básica es el caudal medio diario registrado en una estación hidrométrica; a partir de esta se sintetizan otras formas de expresión de la información hidrométrica, ecuaciones 4.24 a 4.28 (Chávez, 2007).



Caudal o gasto medios diarios, día i mes j año k :

$$Q_{ijk} \quad (4.24)$$

Gasto mensual del año k :

$$Q_{jk} = \sum_{i=1}^{NDMj} Q_{ijk} \quad (4.25)$$

Gasto anual del año k :

$$Q_k = \sum_{j=1}^{12} Q_{jk} \quad (4.26)$$

Gasto medio mensual, mes j :

$$\bar{Q}_j = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Q_{jk}}{NAR} \quad (4.27)$$

Gasto medio anual, año k :

$$\bar{Q}_{anual} = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Q_k}{NAR} \quad (4.28)$$

Donde:

Q_{ijk} = Gasto o caudal del día i del mes j del año k , m^3/s ,

i = Número de día del mes j , ($i= 1, 2, 3, \dots, NDMj$),

j = Número de mes ($j= 1, 2, 3, \dots, 12$),

k = Número de año ($k= 1, 2, 3, \dots, NAR$),

$NDMj$ = Número de días del mes j , (28, 29, 30 o 31),

NAR = Número de años de registro.



4.7. MODELOS

Un modelo es una descripción física o matemática de un sistema, incluyendo la interacción con sus elementos que lo conforman, puede utilizarse para simular el efecto de los cambios en el sistema mismo, o el efecto de los cambios en las condiciones impuestas sobre él (Verwey, 1995).

4.7.1. Importancia de los modelos

La importancia de los modelos radica en la predicción de fenómenos a largo plazo en un tiempo relativamente corto, permite obtener relaciones de causa y efecto sin haber realizado cambios en el sistema real (Benavides, 1998).

Dentro de los usos y ventajas sobre los modelos matemáticos son:

- Se tienen respuestas cuantitativas de los fenómenos.
- Dan idea de los puntos en los cuales no se tienen información.
- Ayudan a definir metodologías.
- Ayudan a la investigación debido a que categorizan variables.
- Ayudan a interpolar y predecir el fenómeno.
- Ayudan a sugerir prioridades en la investigación y desarrollo.
- Ayudan a imaginar el funcionamiento del fenómeno físico.
- Son una herramienta para experimentar sin destruir ni alterar el fenómeno real.

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos. Por lo anterior es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales, como herramienta en la obtención de soluciones prácticas, aplicadas a problemas de ingeniería, estuarios, fluvial y obras hidráulicas en general.

Los métodos matemáticos plantean soluciones con modelos matemáticos idealizados, lo que permite simplificaciones importantes que a su vez causan efectos

que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida o de tipo analógico.

4.7.2. Clasificación de los modelos

Para el uso de los modelos, se debe de entender los fenómenos naturales bajo ciertas condiciones que pueden ser hechas por predicciones dentro de una visión determinística o probabilística. El comprender un evento, implica que se pueda dar una explicación efectiva de este.

De acuerdo a las características de los modelos, se pueden encontrar diferentes clasificaciones, una de ellas se presentan en la figura 4.10:

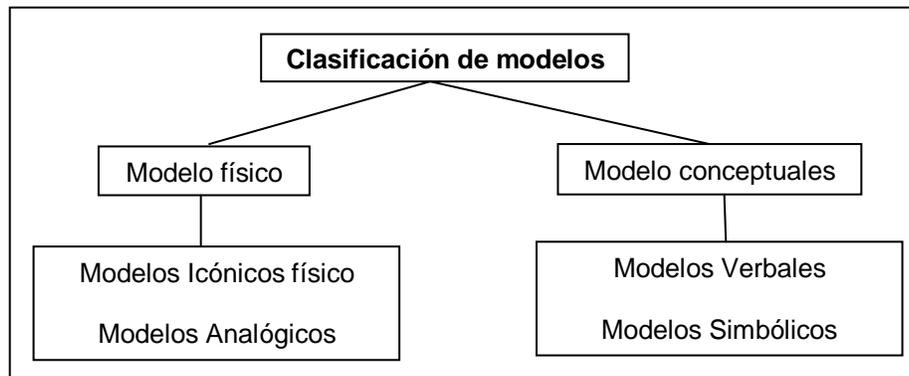


Figura 4.10. Clasificación de modelos

Los modelos físicos representan las características reales de una zona de estudio y se subdivide en icónicos y analógicos. Los modelos icónicos representan físicamente un sistema real con solo una transformación de escala, ya que conservan la dimensión de los objetivos originales, por ejemplo los simuladores de lluvia, parcelas y cuencas experimentales.

Los modelos analógicos representan el sistema real, pero no tiene semejanza física con el original, es decir que para obtener comparaciones entre los dos sistemas, se utilizan procesos físicos diferentes.



Los modelos conceptuales se fundamentan en ecuaciones con un profundo conocimiento de las leyes físicas que determinan el movimiento de los materiales y la energía. Los modelos verbales describen el fenómeno real en términos lógicos utilizando elementos del lenguaje y los modelos simbólicos se representan y expresan el fenómeno real con símbolos. Cuando estos símbolos son cuantitativos nos encontramos ante los modelos matemáticos, se definen como: un grupo de ecuaciones cuya solución explica o predice cambios en el estado del sistema. Los modelos matemáticos en ocasiones se definen como una expresión cuantitativa de un proceso o fenómeno que se está observando, analizando o prediciendo, y definen al modelo matemático como la representación simplificada de un sistema complejo en el que su mismo comportamiento es representado por un conjunto de ecuaciones lógicas, necesarias para expresar las relaciones entre variables y parámetros que representan el estado del sistema y su evolución bajo la influencia de ciertas variables.

4.8. MODELACIÓN EN CUENCAS HIDROLÓGICAS

Los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir de los cuales se estudia la relación causa-efecto en una cuenca, a través de datos de entrada y salida. Además permite la simulación del comportamiento hidrológico de los procesos físicos dentro de la cuenca. Determinando con eficiencia y precisión los fenómenos de frecuencia en el ciclo hidrológico estimando la magnitud y el comportamiento del agua en el área de estudio.

4.8.1. Modelos hidrológicos

Se han desarrollado muchos modelos computacionales de cuencas entre los más utilizados se mencionan: el HEC-1 y su actualización conocida como HEC-HMS del Hydrological Engineering Center, el TR-20 del Servicio de Conservación de Suelos



USDA y el SWMM (Modelo de Gestión de Agua de Tormenta) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

El HEC-HMS y el TR-20 se utilizan para generar hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de esquemas de control de flujo, mientras que el SWMM se adapta a los análisis y las aplicaciones de diseño que involucran determinaciones simultáneas de cantidad y calidad de agua. Estos tres modelos son llamados modelos de evento.

El TOPMODEL (Topographical Model) y SHE son los modelos estándar para análisis hidrológicos en muchos países de Europa. El TOPMODEL está bastante ligado al análisis y procesamiento de la información digital del terreno. Está definido como un modelo conceptual de área de contribución variable, el cual subdivide la cuenca en pequeños elementos y para cada uno de ellos estima el área aguas arriba que drena a través del elemento, la longitud del lado por donde sale el agua hacia otros elementos aguas abajo y la pendiente del elemento.

Dentro de los modelos de proceso continuo se encuentran: el SSARR del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, División del Pacífico Norte, el SWM (Modelo de Cuenca Stanford) desarrollado en la universidad de Stanford, el Modelo Sacramento desarrollado conjuntamente por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de California de Recursos Hídricos. Estos modelos se utilizan para diseño hidrológico, predicción de volumen de escurrimiento a largo plazo y predicción de flujo en tiempo real.

El programa Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE), desarrollado en lenguaje de programación Visual Basic, tiene la finalidad de obtener el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el del número de curva o SCS (Soil Conservation Service), con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia que se denominó factor de



olvido, el cual hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo. Con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración. La transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado.

El modelo SWAT (Soil and Water Assemms Tool) basado en la ecuación general de balance hídrico, de simulación continua, el cual analiza los impactos a largo plazo, generado principalmente para cuantificar la producción de sedimentos en las cuencas, rotación de cultivos, fechas de siembra, riego, fertilización, aplicación de plaguicidas.

El modelo MOPEAU (Modúle de Production d'eau) determina la relación erosión, escurrimiento, perdida de nutrientes en el suelo en cuencas agrícolas, generado por la lluvia y por el manejo de los recursos naturales.

El modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) desarrollado para predecir el efecto del manejo del suelo en ciertas características del agua como son la producción de sedimentos nutrientes y plaguicidas. Los principales componentes del modelo son: clima, hidrología, producción de sedimentos y manejo de suelos.

Existen una serie de modelos hidrológico en la actualidad, desarrollados de acuerdo a las condiciones necesarias para cada lugar y para cada fenómeno en específico (CDM, 2001).

4.8.2. Modelos hidráulicos

Los modelos de hidráulica de ríos usados para la modelación de inundaciones se clasifican en hidrodinámicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales:



Los modelos hidrodinámicos unidimensionales: Están basados en las ecuaciones de San Venant (leyes de conservación de la masa y momento) para calcular la superficie libre del agua en flujo estacionario y no estacionario en canales abiertos. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica, usando frecuentemente el método de diferencias finitas, y en algunos casos mediante elementos finitos o volúmenes finitos, en un esquema implícito.

Los modelos unidimensionales más utilizados son:

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System), este “Sistema de Análisis de Ríos” es un modelo numérico para flujo unidimensional, con capacidad para trabajar con flujos mixtos subcrítico y supercrítico. Es un programa desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers: USACE) para reemplazar a los clásicos HEC-2, UNET y eventualmente HEC-6 también. Puede modelar estructuras fluviales como diques, puentes, alcantarillas y barajes. La erosión local en pilares de puentes puede ser calculado mediante los procedimientos recomendados por la Administración Federal de Carreteras (Federal High Way Administration: FHWA) de Estados Unidos. Se ha empleado para cálculos de largos tramos de río, en diseños de estructuras menores como alcantarillas. Sin embargo, sus principales limitaciones son asumir lecho rígido y flujo unidireccional, por lo que debe ser aplicado con cautela en ríos aluviales muy erosionables o muy meandriformes; en estos casos puede ser recomendable recurrir a otro tipo de modelo más sofisticado. Este programa está disponible en forma gratuita en la página web del USACE.

MIKE 11 es un sistema de modelación matemática para la simulación de flujos, calidad del agua, transporte de sedimentos y procesos morfológicos de erosión y sedimentación en ríos, estuarios, redes de canales de riego y drenaje y otros cuerpos de agua. Es un sistema de programación integrado, que conecta un número de módulos independientes a través de un sistema de menú estructurado. Esta característica modular provee un ambiente amigable y racional y realza la flexibilidad



del programa, lo cual presenta las siguientes ventajas: cada módulo puede manejarse separadamente, transferencia automática de datos entre los distintos módulos y facilidad para el acople de procesos físicos (morfología de ríos, suspensión de sedimentos y calidad del agua). Es un modelo matemático unidimensional para el análisis detallado, diseño, manejo y operación de sistemas simples y complejos de ríos y canales. Debido a su gran flexibilidad, velocidad y ambiente amigable, suministra un completo y efectivo ambiente de diseño para aplicaciones en ingeniería, control y aprovechamiento de recursos hídricos, control de calidad del agua y planeación. El modelo matemático MIKE 11 posee una serie de módulos básicos: Hidrodinámico, advección-dispersión, Calidad del Agua y Transporte de Sedimentos no Cohesivos. Dispone de módulos adicionales que pueden acoplarse a la mayoría de estos módulos básicos para simular otros procesos asociados.

Los modelos hidrodinámicos bidimensionales: Utilizan las ecuaciones de conservación de la masa y momento expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución. Los modelos bidimensionales pueden resolverse usando el método de los elementos finitos. Tienen la desventaja de requerir un mayor tiempo de implementación, y una alta demanda de datos y tiempo computacional. Dentro de los modelos bidimensionales más comerciales se presentan:

FLO-2D es un modelo bidimensional de diferencias finitas simula el flujo de fluidos no-newtonianos, aguas claras, fangosas y con escombros de vegetación, sobre una topografía compleja, urbanizada o no; estima el flujo hidráulico, y predice el área de inundación y las profundidades y velocidades máximas del flujo. No contempla el arrastre de sedimentos en cuanto a zonas de deposición y erosión. La utilidad del modelo radica en la aplicación a diversos problemas no convencionales de inundación tal como flujo no confinado, flujos divididos, flujos de barros y complejos flujos urbanos. Simula el flujo de barros sobre las planicies de inundación. El modelo requiere de archivos de datos donde se incluyen los procesos físicos tales como el



flujo en el canal, flujo bajo puentes, flujo en alcantarillas, precipitación, propiedades reológicas de la mezcla de agua con sedimentos, infiltración, etc., es decir, aquellos archivos que controlen la simulación de la inundación y añaden detalle a la rutina de inundación. Las ecuaciones básicas por las cuales se rige el modelo son la ecuación de la continuidad las cuales son resueltas usando el algoritmo de diferencias finitas, resuelve la ecuación de momento para la velocidad del flujo en cada celda. Las limitaciones del programa con respecto al canal son: No modela el flujo alrededor de las pilas de un puente, la sobre-elevación del canal en las curvas, los saltos hidráulicos, la sedimentación y erosión del canal y de la superficie de escurrimiento.

TUFLOW es un modelo que tiene una amplia gama de aplicaciones con capacidades similares a otros modelos de inundaciones. En comparación con los principales modelos de simulación de inundaciones, cuenta con un mejor manejo de datos y cálculos más rápidos, ofrece modelado hidrodinámico estable, robusto y eficiente, a una fracción del costo de otros modelos de gama alta. Se utiliza para el modelo de aguas costeras, estuarios, ríos, llanuras de inundación y entornos urbanos de drenaje. Se adapta a las inundaciones en ríos a través de un complejo como son tuberías urbanas, junto con los estuarios costeros y el sistema hidráulico, ofrece una flexibilidad sin precedentes y robustez.

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña), los campos de aplicación son: simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales, evaluación de zonas inundables, cálculo hidráulico de encauzamientos, cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre, cálculo de corrientes de marea en estuarios, estabilidad de los sedimentos del lecho, procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular. El modelo consta de módulos: hidrodinámico, turbulencia, y transporte de sedimentos por carga de fondo y por carga en suspensión.



BRI-STARS, (BRIdge-Stream Tube Aluvial River System) El “Sistema de Ríos Aluviales Mediante Tubos de Corrientes para Puentes” es un modelo de tubos de corriente con capacidad para simular las variaciones del lecho en los ríos para los cuales el sedimento y los datos hidráulicos son limitados. Usar los tubos de corriente permite calcular la variación lateral y longitudinal de condiciones hidráulicas, así como la actividad del sedimento en las varias secciones transversales a lo largo del alcance del estudio. El objetivo del modelo es simular problemas complicados del transporte de sedimento, para los cuales hay interacción entre la mezcla del agua-sedimento que fluye y los límites aluviales del cauce del río. Para lograr este propósito, los cálculos del perfil de la superficie del agua y otras variables hidráulicas en régimen supercrítico, subcrítico y combinaciones de ambas condiciones, se debe realizar en forma continua. El acorazamiento del lecho y su ruptura está también incorporado. El programa es semi-bidimensional con la tercera dimensión, la profundidad, incorporado en forma intrínseca en los cálculos. Como tal, tiene las limitaciones básicas de todo programa de dos dimensiones: los flujos secundarios no pueden ser simulados. El cauce se divide en un número preseleccionado de tubos. La elevación del lecho en cada tubo de corriente puede variar verticalmente, hacia arriba (sedimentación) o hacia abajo (erosión), dependiendo de las condiciones del flujo. Consecuentemente, mientras que una sección de canal puede estar erosionándose, otra sección puede estar sedimentando. Como modelo de lecho móvil, el programa se puede aplicar al transporte de agua sedimento a través de los cauces naturales del río. El uso de los tubos de corriente permite la variación de la condiciones y de la actividad hidráulicas del sedimento no solamente en la dirección longitudinal, sino también en la dirección lateral. Debido a que los cambios de la elevación del lecho no se promedian en toda la sección como en modelos unidimensionales, se logra simular una erosión o sedimentación más realista del cauce. BRI-STARS es un programa sorprendentemente potente, ha sido el único capaz de reproducir con razonable precisión la erosión medida. Sin embargo, el cálculo en lecho móvil exige que el usuario ingrese ciertos valores (fórmula a emplear, espesor de capa activa) que sólo pueden determinarse con precisión mediante calibración del modelo contra datos observados, lo cual no siempre está



disponible. Este programa está disponible en forma gratuita en la página web del FHWA.

FESWMS-2DH (Finite Element Surface-Water Modeling System), es un modelo en elementos finitos de flujo bidimensional en el plano horizontal desarrollado por el FHWA, para la modelación de condiciones hidráulicas complejas en estructuras hidráulicas de cruce de carreteras, como puentes y alcantarillas, donde el análisis convencional basado en cálculos unidimensionales no proporciona suficiente nivel de detalle para los objetivos del estudio. El modelo puede simular el flujo bajo puentes y alcantarillas, pero también por encima del terraplén de la carretera en caso de avenidas extraordinarias. Este programa está disponible en forma gratuita en la página web del FHWA.

RMA-2, es un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en profundidad mediante elementos finitos. Calcula los niveles de agua y las componentes de la velocidad en el plano horizontal, para flujo subcríticos con superficie libre. Ha sido desarrollado por el USACE y por tanto tienen capacidad de interface con otros programas desarrollados por ellos como el RMA-4 que es un programa de calidad de agua y el SED-2D un modelo de lecho móvil.

RIVER-2D, un modelo hidrodinámico bidimensional promediado en profundidad mediante elementos finitos desarrollado por la Universidad de Alberta en Canadá. Posee características únicas como su capacidad de trabajar tanto con flujo subcrítico y supercrítico. Algoritmos especiales de agua subterránea permiten una transición gradual entre agua superficial y subterránea en los bordes del río, que evitan quiebres bruscos en las fronteras. Emplea el método de elementos finitos de Petrov-Galerkin que es numéricamente mucho más estable que el empleado por otros modelos. Es en varios aspectos superior a FESWMS o RMA2, los cuales suelen presentar problemas de estabilidad numérica. Actualmente se incorpora capacidades para transporte de sedimentos y eventualmente modelación morfológica de ríos, como la migración de meandros. El programa se encuentra en www.river2d.ca.



Los modelos hidrodinámicos tridimensionales: Representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto aplicables a cualquier caso práctico. Requieren resolver las ecuaciones diferenciales y por tanto una discretización más fina mediante el uso de mallas. Los métodos principales son el método de elementos finitos, el método de diferencias finitas y el método de volúmenes finitos. Estos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finitos de puntos discretos en dicho dominio. Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación. Estos modelos numéricos proporcionan mucho detalle y precisión, siendo capaces de manejar condiciones de borde e iniciales complejas, para los cuales no existen en la mayoría de casos soluciones analíticas. Sin embargo, la mayoría de estos métodos requieren la solución simultánea de todos los nodos del dominio, lo que incrementa la carga computacional haciéndolos más lentos. Entre los modelos más comerciales se encuentra el SSIMM.

SSIMM (Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option), programa desarrollado por la Universidad de Trondheim en Noruega para usarse en Ingeniería Hidráulica, de Ríos, de Sedimentación y Ambiental. Este software calcula el flujo de sedimentos y la calidad de agua en tres dimensiones, resolviendo la ecuación de Navier-Stokes junto con el modelo de turbulencia k-epsilon. Las ecuaciones de convección-difusión se resuelven para calcular el transporte de sedimentos así como el transporte de constituyentes en estudios de calidad de agua. Los cálculos son dependientes del tiempo y una cuadrícula vertical móvil toma en cuenta los cambios en el nivel del agua y del lecho. El programa se basa en el método de volúmenes finitos por lo que se debe generar un mallado tridimensional. Este modelo ha sido usado para la modelación de desarenadores.



4.9. MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON EL SISTEMA MIKE

El Instituto Hidráulico Danés (DHI), ofrece una serie de modelos que integran los procesos principales del ciclo hidrológico en el que se incluye al sistema MIKE.

El sistema MIKE, integra el modelado en tres partes principales: El medio marino, el urbano y el de los recursos hídrico.

- Modelos para la parte marina: MIKE 21, MIKE 3, LITPACK, MIKE Animator, MIKE C-MAP 14 y ECO Lab.
- Modelos de simulación en la zona urbana: MIKE URBAN.
- Modelos de simulación para los recursos hídricos: MIKE 11, MIKE FLOOD, FEFLOW, MIKE SHE, MIKE BASIN y MIKE 21C.

Sin embargo para la investigación se utilizaron los modelos MIKE SHE y MIKE 11.

En 1969, Freeze y Garland propusieron un modelo para simular el ciclo hidrológico, en el cual se describen diferentes procesos del flujo a partir de sus ecuaciones parciales gobernantes. Las ecuaciones usadas en el modelo fueron reconocidas para presentar los procesos físicos a una escala apropiada en las diferentes etapas. A partir de 1977, un consorcio de tres organizaciones europeas desarrollaron y aplicaron ampliamente, el Système Hydrologique Européen (SHE) basado en el modelo original de Freeze y Garland.

Desde mediados de los 80's este procedimiento ha sido fuertemente desarrollado y promocionado por DHI Water & Environment, constituyendo a la fecha, un avanzado y flexible sistema para la modelación hidrológica, debido a que incluye una base de herramientas amplias para el pre y post procesamiento de la información, cubriendo los principales procesos del ciclo hidrológico como son: evapotranspiración, flujo superficial, flujo no saturado, flujo subterráneo, flujo en canales y sus interacciones. Cada uno de estos procesos puede ser representado a diferentes niveles de distribución y complejidad, de acuerdo a los objetivos de la modelación, la disponibilidad de los datos de campo y de las opciones del modelador.



Éste es un modelo hidrológico determinístico, totalmente distribuido y de base física (Refsgaard et al., 1992), se deriva del modelo *Système Hydrologique Européen* o SHE (Abbott et al., 1986a y 1986b), cuyo desarrollo se inició en el año 1976 como una colaboración entre el Instituto Británico de Hidrología, el Instituto Danés de Hidráulica (DHI) y la consultora francesa SOGREAH, con financiamiento de la Comisión Europea de Comunidades.

El desarrollo del MIKE SHE se hizo con el objeto de contar con una herramienta potente para abordar diversos problemas hidrológicos prácticos de importancia creciente en aquel momento, relacionados con el transporte de contaminantes, la cuantificación de la disponibilidad de recursos hídricos y la evaluación del impacto ambiental de diversas intervenciones a nivel de cuenca.

Los modelos de precipitación-escorrentía más difundidos en el momento del desarrollo de MIKE SHE eran concentrados y mayormente empíricos, requiriendo largas series históricas de precipitaciones y caudales para una correcta calibración, información pocas veces disponible. Por otro lado, la parametrización no física de los mismos hacía difícil evaluar el impacto producido por eventuales modificaciones del sistema, impidiendo resolver con certeza algunos de los problemas mencionados (Abbot et al., 1986a).

El *Système Hydrologique Européen*, en cambio, se desarrolló al modo de ser distribuido y de base física. Esto último significa que los procesos de movimiento del agua se modelan ya sea mediante la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de conservación de la masa, el momento y de la energía o bien mediante ecuaciones empíricas. Los parámetros utilizados en la formulación pueden medirse, haciendo teóricamente innecesario un proceso de calibración (Abbot et al., 1986b). El modelo fue construido con una arquitectura modular, de modo que resuelve dependiendo de los componentes necesarios para la simulación donde se eligen que componentes del ciclo hidrológico. El intercambio de datos entre módulos,

así como la coordinación de la ejecución simultánea de los mismos, que pueden tener incluso pasos de tiempo independientes, es coordinado por un proceso central denominado FRAME (Abbot et al., 1986a).

En MIKE SHE, la evaporación directa desde el suelo y desde la interceptación en el follaje y la transpiración de las plantas se modela por el método propuesto por Kristensen y Jensen. El flujo superficial se resuelve mediante la resolución de las ecuaciones bidimensionales de onda difusiva (aproximación de las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant), acoplada a un modelo unidimensional de flujo en cauces (“MIKE 11”). El flujo en la zona no saturada se considera exclusivamente vertical (Abbott et al., 1986b), y se resuelve mediante la discretización en diferencias finitas de la ecuación de Richards. El flujo en la zona saturada se describe mediante la ecuación tridimensional de Boussinesq. Los procesos simulados se ilustran en la figura 4.11.

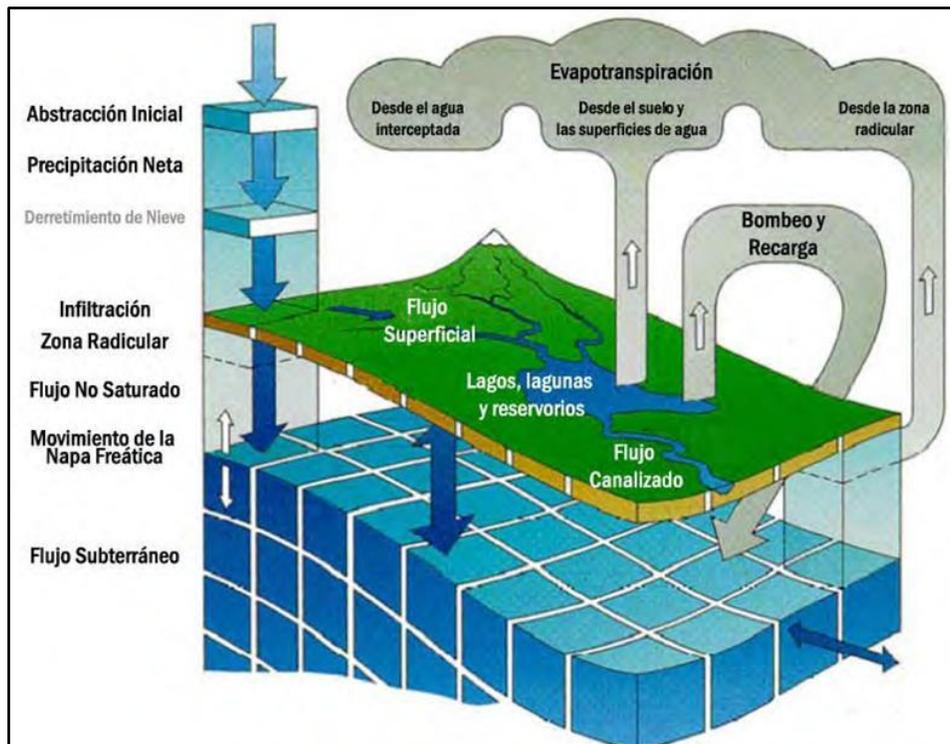


Figura 4.11. Representación esquemática del modelo MIKE SHE (Refsgaard et al., 1995)

El sistema de modelación MIKE SHE, es capaz de simular el movimiento del agua superficial y subterránea, las interacciones entre los sistemas, los problemas puntuales y no puntuales asociados con la calidad del agua en la fuente de abastecimiento. El sistema no tiene limitaciones en cuanto al tamaño de la cuenca. En el cuadro 4.3, se muestran los componentes y características del modelo.

El sistema de modelación MIKE SHE, simula los componentes hidrológicos, incluyendo el movimiento de agua superficial, el agua subsuperficial no saturada, el agua subterránea saturada, y los intercambios entre el agua superficial y subterránea. En lo que se refiere a la calidad del agua, el sistema simula el transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas en el área modelada. El modelo también simula las operaciones de uso y manejo del agua, incluyendo sistemas de riego, pozos de bombeo, y varias estructuras de control. Una variedad de prácticas agrícolas y alternativas de protección al ambiente deben evaluarse usando muchos de los módulos desarrollados en el Instituto Hidráulico Danés. El sistema tiene un pre-procesador gráfico y digital incluido para la calibración y evaluación de condiciones actuales y alternativas de manejo, figura 4.12. La animación de los escenarios del modelo es otra herramienta útil para analizar y presentar los resultados.

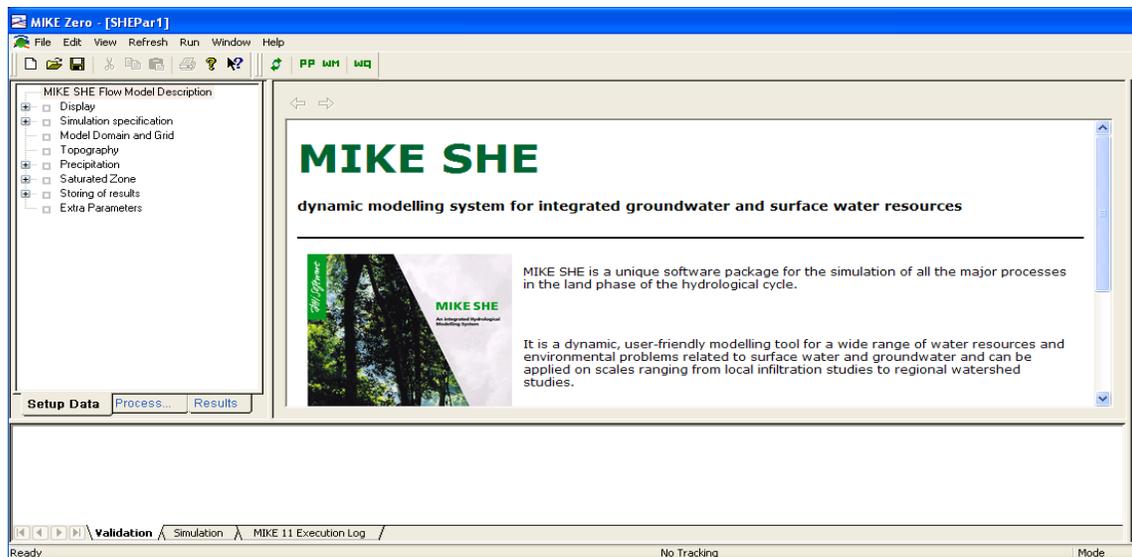


Figura 4.12. Interface del modelo MIKE SHE



Las partes de la interfase son:

- En la parte superior: La barra de herramientas y los menús desplegados, contienen iconos de acceso rápido para muchas operaciones que se aplican a través de los menús, cambian dependiendo de las herramientas que están en uso.
- A la izquierda: El árbol de datos dinámicos y las pestañas de control, permite desplegar los elementos de datos requeridos para correr el modelo como se define, según lo necesario para la modelación, si se agregan o se eliminan procesos hidrológicos, o si se cambian parámetros numéricos, la forma del árbol de datos cambiará.
- Al centro: El área de dialogo del contexto sensitivo, es diferente para cada elemento en el árbol de datos. Es la plataforma que permite introducir los datos necesario para cada proceso.
- En la parte inferior: El área de validación y el área para el uso del ratón. Se despliega información de datos faltantes o elementos de datos inválidos, permitiendo enviar un aviso donde ocurrió el error, también en esta sección despliega las coordenadas dinámicas y valores de información relacionada con la posición del ratón en el área del mapa.
- A la derecha: Corresponde al explorador de proyectos, en el que estructuran los elementos de simulación.

Cuadro 4.3. Componentes y características especiales del modelo MIKE SHE

Características	Incorporado al modelo	Observaciones
Modelo en general		
Escala espacial	Captación	Escalable, pero limitada por la memoria de la computadora.
Capacidad de acercamiento	Sí	Puede crear fácilmente un modelo fino de cuadrícula en un modelo de cuadrícula grande.
Discretización	Celdas de cuadrícula	Sólo celdas de cuadrícula.
Escala temporal	Días o minutos	Flexible, dependiendo de los proyectos



Estructura del modelo		
Modular	Sí	Las funciones del modelo se pueden seleccionar en base a las necesidades
Simulación del agua		
Intercepción/Evapotranspiración	Sí	Cobertura vegetal y diferentes opciones para calcular la evapotranspiración real.
Flujo superficial	Sí	Ecuaciones simplificadas de Saint-Venant.
Flujo no saturado	Sí	Métodos de ruta simple o ecuación de Richard.
Flujo de agua subterránea	Sí	Flujo saturado en 3-D con sistemas de acuíferos múltiples.
Flujo en canales	Sí	Ecuación de Saint-Venant u opciones para métodos simplificados
Intercambio acuífero-río	Sí	Contribución del flujo-base y pérdidas.
Deshielo	Sí	Días-grados o método de balance de energía.
Riego	Sí	De fuentes de agua superficial ó bombeos de agua subterránea.
Simulación de tormenta simple	Sí	Curva SCS y método opcional.
Estructura de agua superficial	Sí	Variedad de estructuras.
Sedimentación		
Erosión del suelo	Sí	Permite el desarrollo de depresiones y surcos en una cuenca.
Transporte no cohesivo	Sí	Cuatro métodos para rangos de transporte y cambios en el nivel freático. Limitado a canales, no escurrimiento superficial
Transporte cohesivo	Sí	Erosión y depósito de flujo superficial
Clases de tamaño de partículas	Sí	Un promedio de tamaño de partículas y desviación del tamaño de distribución de los granos
Calidad del agua		
Advección/Dispersión	Sí	Transporte de solutos de fuentes puntuales o no puntuales en flujo superficial, flujo no saturado o flujo saturado de agua subterránea.
Suelo y agua subterránea		Concepto de avance aleatorio (módulo incluido). Consumo de degradación de suelo de primer orden (modulo incluido).
Componentes: Rastreo de partículas de partículas	Sí	
Adsorción/Degradación	Sí	
Transporte de oxígeno	Sí	



Componentes de ruta de canal: Relación BOD-DO	Sí	Módulos incluidos para aplicaciones específicas
Nitrificación/Desnitrificación	Sí	
Sedimentación y suspensión	Sí	
Retención/asimilación de fósforo	No	
Consumo de oxígeno	Sí	
Metales pesados	Sí	
Asimilación de nitrógeno por los cultivos	Sí	Evaluación de los impactos regionales de gestión de la producción agrícola en la actualidad del agua.
Asimilación de fósforo	No	
Economía	No	
Interface gráfica de usuario		
Pre y post-procesamiento	Sí	Interface gráfica de usuarios amigable para pre post-procesamiento
Interface con SIG	Sí	Importar y exportar datos.
Animación	Sí	Herramienta muy útil para análisis y presentaciones

La representación de las características y parámetros de la cuenca a modelar se genera discretizando la cuenca en el plano en una cuadrícula regular de celdas de cálculo cuadradas. Cada una de esas celdas corresponde a una columna de suelo, que también se discretiza en la vertical en cierto número de capas para resolver el flujo subsuperficial. El intercambio de agua entre dos celdas contiguas puede suceder a través de flujo horizontal, ya sea superficial o subterráneo en la zona saturada, figura 4.13.

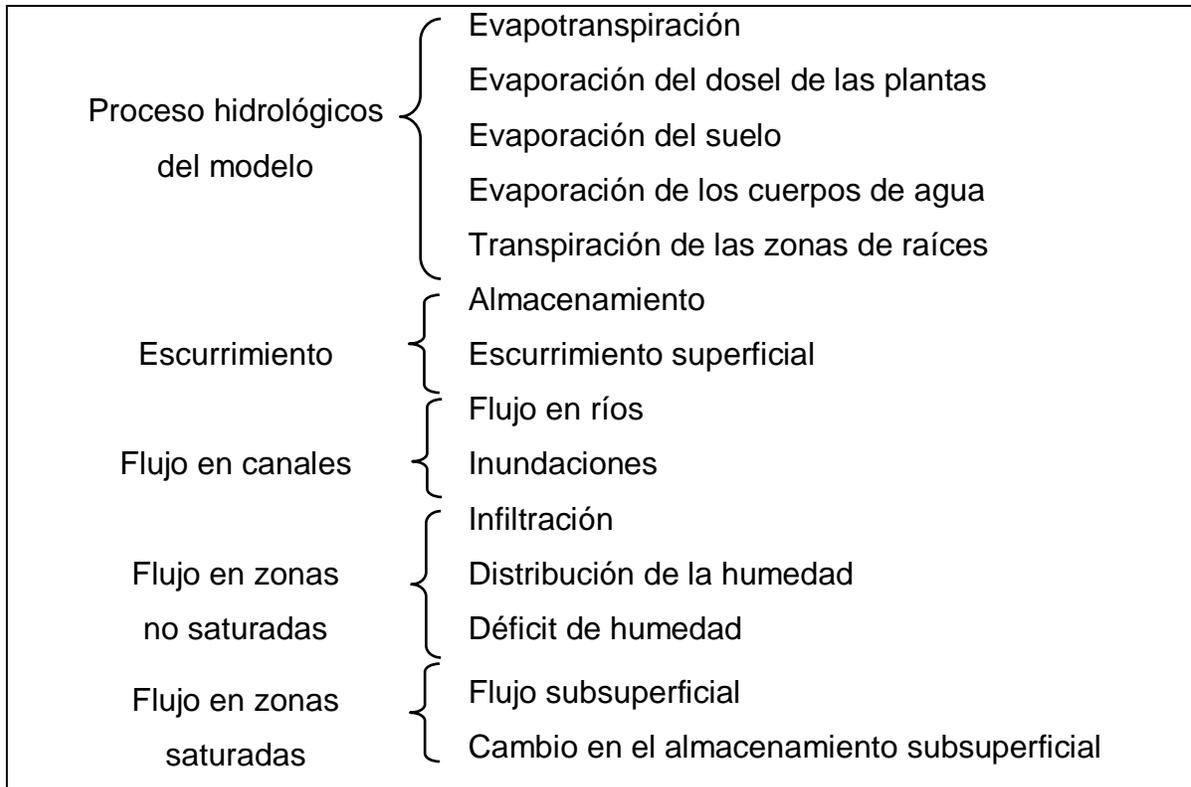


Figura 4.13. Parámetros de modelación y variables

Cabe destacarse que MIKE SHE fue concebido como un modelo distribuido de base física, lo que significa que, como tal, pretende resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales que expresan la física de los procesos. No obstante, muchos autores argumentan que, debido a las grandes escalas usadas para la discretización de las ecuaciones y a la heterogeneidad de los parámetros a escala de la subcuadrícula no considerada, este tipo de modelos resultan en realidad un conjunto de modelos conceptuales concentrados a escala de celda. Esto implicaría que los parámetros físicos que se utilizan en cada celda no necesariamente corresponden a valores puntuales medibles en el terreno, sino que más bien representan un valor “efectivo” para el proceso a dicha escala de celda. Al resolver las ecuaciones físicas utilizando estos parámetros efectivos se obtendrían entonces resultados representativos del comportamiento real del sistema.

Si bien se admite que esta afirmación es cierta hasta determinado punto, muchos autores consideran que, aún con estas limitaciones, la parametrización realizada en



los modelos físicos se aproxima más a la realidad que aquella de los modelos puramente conceptuales, lo que trae diversas ventajas, incluyendo la capacidad de extrapolar el comportamiento del sistema más allá del rango de datos utilizados para su calibración y validación (Refsgaard et al, 1997). Además, si bien los parámetros pueden no corresponder estrictamente con los valores puntuales, ciertamente ambos no son independientes, sino que en general deberían ser relativamente cercanos, especialmente cuando la escala de resolución se vuelve gradualmente más fina. La medición de los parámetros hidrológicos debe, en lo posible, hacerse de modo tal que los mismos resulten representativos a escala de celda (Abbott et al., 1986a).

4.9.1. Modelación de la evapotranspiración en MIKE SHE

En MIKE SHE, el módulo de evapotranspiración se basa en las ecuaciones obtenidas por Kristensen et al., 1975. Son de carácter empírico y explícito, desarrolladas a partir de mediciones en campo.

Según este modelo, la evapotranspiración real, y la extracción de la misma desde los distintos estratos del suelo, dependen de la evapotranspiración potencial (E_p), la densidad de cobertura vegetal (parametrizada a través del índice de área foliar), y una profundidad máxima de las raíces de la vegetación (R_D). El índice de área foliar (LAI por las siglas de Leaf Area Index) se define como la relación entre la superficie total de hojas en una determinada parcela y el área de la misma.

Además de estas tres variables, el modelo requiere de la estimación de cuatro parámetros específicos: C_{int} , C_1 , C_2 , C_3 y $AROOT$, además de la humedad residual (θ_R), los puntos de marchitez (θ_W) y capacidad de campo del suelo (θ_{FC}).

MIKE SHE utiliza el índice de área foliar (LAI) en primer lugar para estimar la capacidad de la vegetación de interceptar una fracción de las precipitaciones, reteniéndola en el follaje e impidiendo que alcance el suelo. La capacidad de interceptación (I_{max}) en mm, se estima según la ecuación 4.29:



$$I_{\max} = C_{\text{int}} LAI \quad (4.29)$$

El coeficiente de intercepción (C_{int}) ronda en un valor de 0.05 mm (DHI, 2005). El agua almacenada en el follaje solo disminuye por evaporación, que se produce a tasa potencial. La cantidad evaporada durante un determinado paso de tiempo queda definida según la ecuación 4.30:

$$E_{\text{can}} = \min(I_{\max}, E_p \cdot \Delta t) \quad (4.30)$$

Donde:

E_{can} = Evaporación en un determinado tiempo, en mm,

I_{\max} = Capacidad de intercepción, en mm,

E_p = Evapotranspiración potencial, en mm,

Δt = Paso de tiempo, en segundos, minutos, horas, día.

Además de la intercepción en el follaje, la vegetación capta agua a través de sus raíces que transpira luego a la atmósfera. La cantidad total de agua transpirada depende de la evapotranspiración potencial y la disponibilidad de humedad. Dicha disponibilidad puede ser distinta a lo largo del perfil de suelo, por lo que el modelo lo evalúa dividiendo el intervalo de raíces en capas.

El valor de la transpiración total resulta de la suma del volumen de agua extraído de cada capa de suelo (numeradas de 1 a n), según la ecuación 4.31:

$$E_{\text{at}} = E_p \cdot f_1(LAI) \cdot \sum_{i=1}^n f_2(\theta_i) \cdot RDF_i \quad (4.31)$$

Donde:

E_{at} = Transpiración actual, en mm

E_p = Evapotranspiración potencial, en mm,

RDF_i = Es una función de distribución de las raíces,



$f_2(\theta_i)$ = Función basada en el contenido de humedad del suelo en la zona de la raíces.

En el modelo de Kristensen y Jensen, la expresión anterior $f_1(LAI)$ limita la transpiración vegetal para bajos índices de área foliar, siendo:

$$f_1(LAI) = \begin{cases} C_2 + C_1 LAI & \text{si } C_2 + C_1 \cdot LAI < 1 \\ 1 & \text{si } C_2 + C_1 \cdot LAI \geq 1 \end{cases} \quad (4.32)$$

Donde:

C_i = Parámetro empírico para cada capa de suelo,

LAI = Índice de área foliar, m^2/m^2

La humedad en cada capa de suelo es menor a la capacidad de campo, la extracción vegetal se ve limitada según la ecuación 4.33, en la que C_3 es un parámetro empírico. La cantidad de agua transpirada, a igual humedad de suelo, crece al aumentar dicho coeficiente.

$$f_2(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta_{FC} \leq \theta \\ 1 - \left[\frac{\theta_{FC} - \theta}{\theta_{FC} - \theta_W} \right]^{C_3/Ep} & \text{si } \theta_w \leq \theta \leq \theta_{FC} \\ 0 & \text{si } \theta \leq \theta_w \end{cases} \quad (4.33)$$

Donde:

C_3 = Parámetro empírico,

θ_{FC} = Es el contenido de humedad volumétrica a capacidad de campo, m^3/m^3 ,

θ = Contenido real de humedad volumétrico, m^3/m^3 ,

θ_w = Contenido de humedad volumétrico en el punto de marchitamiento, m^3/m^3 .

En cuanto a la densidad radicular en un determinado estrato del terreno, el modelo asume una distribución típica de raíces, cuya extracción de agua con la profundidad decrece exponencialmente:

$$R(z) = R_o \cdot e^{-AROOT \cdot z} \quad (4.34)$$



Donde R_0 es una hipotética tasa de extracción en las cercanías de la superficie del terreno y z es la profundidad. $AROOT$, en tanto, es un parámetro que tiene en cuenta qué tan uniforme es la densidad de raíces entre la superficie y la profundidad máxima que alcanzan. Dada esta función de densidad, la función de distribución radicular se define para cada capa de cálculo según la ecuación 4.35, siendo z_1 y z_2 los límites de la capa en cuestión.

$$RDF_i = \int_{z_1}^{z_2} R(z) dz / \int_0^{RD} R(z) dz \quad (4.35)$$

De esta manera, queda definida la cantidad de agua que se absorbe y transpira desde cada capa del perfil del suelo. Cabe destacarse que, de existir humedad abundante en el suelo (al menos igual a la capacidad de campo), la cantidad total de agua transpirada es independiente de la profundidad radicular máxima RD .

Por último, el modelo permite determinar la evaporación directa de agua desde el terreno (E_S). Esta se produce desde la capa superior de la zona no saturada del suelo, si existe humedad disponible y la transpiración no ha agotado la evapotranspiración potencial. Consiste en una cantidad básica $E_p \cdot f_3(\theta)$ más una cantidad adicional que se incrementa a contenidos crecientes de humedad en el suelo, a partir del punto en que dicha humedad supera el promedio entre el punto de marchitez y el de capacidad de campo. La expresión adoptada por Kristensen y Jensen se expresa en la ecuación 4.36.

$$E_S = E_p \cdot f_3(\theta) + [E_p - E_{at} - E_p \cdot f_3(\theta)] \cdot f_4(\theta) \cdot (1 - f_1(LAI)) \quad (4.36)$$

En la cual:

$$f_3(\theta) = \begin{cases} C_2 & \text{si } \theta_W \leq \theta \\ C_2 \frac{\theta}{\theta_W} & \text{si } \theta_R \leq \theta \leq \theta_W \\ 0 & \text{si } \theta \leq \theta_R \end{cases} \quad (4.37)$$



$$f_4(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta - \frac{\theta_W + \theta_{FC}}{2}}{\theta_{FC} - \frac{\theta_W + \theta_{FC}}{2}} & \text{si } \theta \geq \frac{\theta_W + \theta_F}{2} \\ 0 & \text{si } \theta < \frac{\theta_W + \theta_F}{2} \end{cases} \quad (4.38)$$

4.9.2. Modelación de la infiltración con MIKE SHE

El presente modelo matemático determina la infiltración explícitamente, al calcular el flujo en la zona no saturada, resolviendo la ecuación de Richards propuesta en 1931. A continuación se presenta el origen de su formulación.

4.9.2.1. Ecuación de Richards. El escurrimiento en la zona no saturada ocurre a partir de la existencia de una diferencia de carga hidráulica entre dos puntos de la matriz de suelo. En un suelo no saturado, la carga hidráulica h tiene solo un componente gravitacional z y un componente de presión ψ , ya que la altura cinética resulta del todo despreciable dada las bajas velocidades imperantes.

Por lo tanto:

$$h = z + \psi \quad (4.39)$$

En un punto dado del suelo, la carga gravitacional es la elevación sobre un plano de referencia. En cuanto al término de presión, suele tratarse como una presión relativa a la atmosférica, de modo que esta última corresponde a un valor nulo. En un suelo no saturado, la presión de agua es en general menor a la atmosférica, por lo que el término de presión resulta negativo. Esto se debe tanto a las fuerzas de capilaridad como a las fuerzas adsorptivas de corto alcance, que unen las moléculas de agua a las partículas de suelo, produciendo la retención de la misma en el suelo. Estas dos fuerzas son difíciles de diferenciar en la práctica, por lo que se tratan agregadas dentro de un mismo término.

Para un flujo unidimensional vertical, el gradiente de carga que motoriza el escurrimiento resulta:



$$i = \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.40)$$

El flujo puede estimarse a partir de la generalización de la ecuación de Darcy para flujos no saturados. Para esto se define una conductividad hidráulica no saturada $K(\theta)$ dependiente de la humedad del suelo θ , que es la relación entre el volumen de agua en el suelo y el volumen total del mismo. Por lo tanto, la velocidad de escurrimiento, que coincide con el caudal específico, resulta:

$$q = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} = -k(\theta) \left(1 + \frac{\partial \psi}{\partial z}\right) \quad (4.41)$$

Bajo la hipótesis de que tanto la matriz de suelo como el agua se comportan como incompresibles para el rango de presiones prácticas, resulta sencillo escribir la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S(z) \quad (4.42)$$

En la ecuación anterior, $S(z)$ representa un término sumidero, que puede utilizarse para tener en cuenta la extracción de agua por las raíces de las plantas. Sustituyendo la ecuación 4.41 en 4.42 resulta la ecuación 4.43:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - S(z) \quad (4.43)$$

Además de la expresión de la conductividad hidráulica en función de la humedad, es necesario encontrar una relación adicional entre la humedad del suelo θ y la altura de presión ψ a fin de poder resolver la ecuación. Esta relación se denomina curva de retención de humedad del suelo y generalmente se formula como humedad en función de la altura presión: $\theta(\psi)$. La ecuación 4.44 es a menudo reescrita de modo



de tener la altura de presión como variable independiente. Si se calcula la derivada parcial respecto del tiempo de la humedad resulta:

$$\frac{\partial \theta(\Psi)}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (4.44)$$

Si se define como capacidad del suelo C la pendiente de la curva de retención, $C = \frac{\partial \theta}{\partial \Psi}$, resulta finalmente la ecuación de Richards en término de alturas de presión:

$$C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) - S(z) \quad (4.45)$$

El software resuelve la ecuación 4.45 numéricamente, con un esquema totalmente implícito. Las diferencias finitas de presiones se escriben para el tiempo $n+1$. Los valores $C(\psi)$ y $K(\theta)$ corresponden al promedio entre el valor correspondiente al paso n y una media móvil de los valores resultantes de cada iteración para el cálculo del instante $n+1$. Ha sido demostrado que esta técnica contribuye a eliminar los problemas de estabilidad y convergencia que surgen de la no-linealidad de las ecuaciones en cuestión (DHI, 2005).

Para la condición de borde superior, existen dos casos posibles, entre los cuales el modelo selecciona automáticamente; cuando no existe agua almacenada en superficie, la condición de borde corresponde a un flujo constante igual a la tasa de precipitación. En cuanto se acumula agua en superficie, el modelo considera el primer nodo como saturado y la condición de borde pasa a ser de carga, igual al tirante de agua almacenado.

La condición de borde inferior corresponde a una presión constante, igual a la altura de la napa freática.

La interacción entre la zona saturada y no saturada presenta ciertas dificultades, ya que ambos sistemas están acoplados, pero se resuelven por separado. Esta técnica,



no obstante, permite la utilización de distintos pasos de tiempo para ambos componentes, cuyas escalas de tiempo difieren notablemente, permitiendo mejorar la velocidad de cálculo. Para mantener la compatibilidad entre los cálculos de ambos procesos, el modelo realiza iterativamente un balance de masa de la zona no saturada. El procedimiento para cada columna de cálculo puede sintetizarse de la siguiente manera:

- A partir de los niveles freáticos resultantes del último paso de cálculo de la zona saturada, se fija la condición de borde inferior de la zona no saturada.
- Para cada paso de tiempo de la zona no saturada, se actualiza el perfil de humedad, resolviendo la ecuación de Richards.
- Se realiza un balance de masa del perfil de humedad en la zona no saturada. Si existe un error mayor a cierta tolerancia respecto del balance de agua inicial, se modifica la condición de borde inferior, simulando el ascenso o descenso freático, y se calcula el perfil hasta obtener la convergencia.
- Tanto el flujo saliente o entrante resultante en cada paso de tiempo en la zona no saturada como las correcciones realizadas al nivel freático se acumulan, y se transforman luego en un término fuente/sumidero para el cálculo del siguiente paso de la zona saturada.

4.9.2.2. Modelos de Curvas de Retención. Existen diversos modelos de curvas de retención. Uno de los más difundidos es el formulado por Van Genuchten (1980). Según este modelo, la saturación efectiva $S_e(\theta)$ puede relacionarse con la altura de presión. La saturación efectiva se define como:

$$S_e(\theta) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.46)$$

Donde:

θ = Humedad del suelo, m^3/m^3

θ_r = Humedad residual del suelo, m^3/m^3

θ_s = Humedad de saturación del suelo, m^3/m^3



Y según el modelo de Van Genuchten, está relacionada con la altura de presión según la ecuación 4.47.

$$S_e(\theta) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (-\alpha \cdot \psi)^n]^{1-1/n}} \quad (4.47)$$

α y n son los parámetros de la curva. El parámetro α es siempre mayor a cero y está relacionado con la inversa de la presión de aire en el suelo. El parámetro n , que es siempre mayor a 1, es una medida de la distribución del tamaño de poros.

Cabe destacarse que en mediciones de campo se observa cierto grado de histéresis en la curva de retención, de acuerdo a si se trata de un ciclo de mojado o de secado del suelo. El modelo de Van Genuchten, así como la mayoría de los modelos más difundidos, ignora este fenómeno considerando una relación unívoca, entre la saturación efectiva del suelo y la altura de presión.

Existen algunas correlaciones publicadas entre los valores de los parámetros de Van Genuchten y la textura del suelo. En cuadro 4.4 se presentan los valores publicados para distintas texturas. Estos fueron obtenidos a partir del ajuste de la ecuación de Van Genuchten a distintos suelos cuyas curvas de retención se encontraban medidas en la base UNSODA (Leij et al., 1996). Existen otras correlaciones publicadas anteriormente, recopiladas por van Genuchten et al. (1991). Estas se deben a Rawls et al. (1982) y a Carsel y Parrish (1988) en el cuadro 4.1 y 4.2. No presentan desvío estándar del ajuste, sino que consisten simplemente de valores típicos.

Cuadro 4.4. Valores promedio de los parámetros de los modelo de Van Genuchten y Van Genuchten-Mualem para suelos de distintas texturas

Suelo	n	θ_r cm ³ /cm		θ_s cm ³ /cm		Log ₁₀ (α) cm ⁻¹		Log ₁₀ (n)		Log ₁₀ (Ks) cm/día		Log ₁₀ (K ₀) cm/día		I	
		Media	Desvío	Media	Desvío	Media	Desvío	Media	Desvío	Media	Desvío	Media	Desvío	Media	Desvío
Todos	235	0.055	0.073	0.442	0.101	-1.66	0.52	0.214	0.209	1.92	0.81	1.03	1.04	-3.09	8.75
Arenas	100	0.052	0.043	0.396	0.056	-1.58	0.37	0.349	0.228	2.24	0.79	1.29	1.06	-1.28	3.17
Francos	41	0.056	0.091	0.512	0.132	-1.39	0.50	0.076	0.047	2.03	0.64	1.42	0.98	-6.97	9.57
Limos	58	0.031	0.058	0.428	0.078	-1.92	0.52	0.139	0.141	1.70	0.61	0.82	0.80	-1.22	10.17
Arcillas	36	0.098	0.109	0.512	0.108	-1.75	0.64	0.114	0.112	1.31	0.80	0.26	0.94	-5.96	12.40

4.9.2.3. Modelos de curvas de permeabilidad no saturada. Existen diversos modelos desarrollados para representar la permeabilidad o conductividad no saturada de una matriz de suelo. De entre ellos, uno de los más sencillos es debido a Averjanov (1950). Según este autor, la conductividad para condiciones insaturadas pueden representarse mediante la ecuación 4.48.

$$K_{ns}(\theta) = K_s \cdot S_e^n \quad (4.48)$$

Donde Ks es la conductividad saturada, Se la saturación efectiva y n un parámetro que define la forma de la curva. Cuanto más grande el valor de este parámetro más rápidamente disminuye la conductividad al alejarse de las condiciones de humedad, resultando el suelo menos permeable. El propio Averjanov en 1950 recomendó el uso de un valor constante de 3.5. También se ha sugerido que el valor puede depender de la textura del suelo, pudiendo rondar entre 2 y 5 para suelos arenosos y entre 10 y 20 para suelos arcillosos, siendo habitualmente necesario determinarlo por calibración (DHI, 2005). De cualquier manera no se ha encontrado en la bibliografía buenas correlaciones entre el valor del parámetro n y las propiedades físicas habitualmente estudiadas del suelo.

Otro modelo aplicable a la representación de la permeabilidad no saturada es el de Mualem-Van Genuchten (MGV) propuesto en 1976. Este permite relacionar la



permeabilidad no saturada con las características de la curva de retención. Su expresión se presenta en la ecuación 4.49.

$$K(S_e) = K_0 \cdot S_e^L \left(1 - \left[1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right]^{1-\frac{1}{n}} \right)^2 \quad (4.49)$$

Además del parámetro n de la curva de retención de Van Genuchten, la ecuación requiere un valor de conductividad para condición cercana a la saturación K_0 y un parámetro L , relacionado con la tortuosidad y la conectividad de los poros del suelo. En cuanto el valor de K_0 , suele utilizarse la conductividad saturada. No obstante, diversos autores han propuesto utilizar valores alrededor de un orden de magnitud menores a la misma, ya que K_s está influenciada por el flujo en macroporos, que no ocurre en condiciones de no saturación. En cuanto al valor de L , Mualem (1976) propuso un valor de 0.5, que se utiliza frecuentemente en la bibliografía. No obstante, se ha encontrado que se obtienen mejores resultados si es posible determinar el parámetro por ajuste de las curvas teóricas a datos medidos de conductividad. En el cuadro 4.4 se presentan valores promedio obtenidos para distintas texturas de suelo mediante esta técnica (Schaap y Leij, 2000).

Desafortunadamente, la determinación experimental tanto de la curva de retención de un suelo como de su permeabilidad no saturada presenta relativa dificultad. Como consecuencia, existen escasas mediciones de las mismas, especialmente en el ámbito local.

A la luz de esta situación, se consideran de gran importancia las estimaciones del tipo de las presentadas en el cuadro 4.4. Si bien estas presentan desvíos estándar elevados, se considera que pueden servir como base para estimar curvas de retención y permeabilidad no saturada a partir de datos de texturas de suelos, permitiendo una primera estimación del comportamiento de la zona no saturada a partir de datos usualmente disponibles.



4.9.3. Modelación del flujo superficial en cuencas hidrológicas

El escurrimiento de los excedentes hídricos sobre el terreno se resuelve en el modelo a través de la resolución de las ecuaciones de Saint Venant bajo la hipótesis de onda difusiva. El sistema de ecuaciones de Saint Venant para flujo hidrodinámico bidimensional integrado en la profundidad consta de una ecuación de continuidad y un par de ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, planteadas a lo largo de los ejes cartesianos. En la ecuación de continuidad presentada en la ecuación 4.50, uh representa el caudal específico (por unidad de longitud) paralelo al eje x , siendo h el tirante de agua y u la velocidad media. El término fuente i surge del balance entre la precipitación y la infiltración en el paso de tiempo, esta última calculada por el módulo de flujo en la zona vadosa.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(uh) = i \quad (4.50)$$

Las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento se presentan en las ecuaciones 4.51 y 4.52. En este caso S_f representa la pendiente de fricción para cada eje y S_0 la pendiente del terreno.

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{gh} \frac{\partial}{\partial y} huv \quad (4.51)$$

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{1}{gh} \frac{\partial}{\partial x} huv \quad (4.52)$$

La resolución numérica de las ecuaciones de Saint Venant completas resulta compleja. A fin de facilitar su resolución, en condiciones de pendientes hidráulicas bajas suelen desprejarse las variaciones de cantidad de movimiento debido a la aceleración local y convectiva y a la entrada de flujo perpendicular a la dirección considerada. Esta aproximación es conocida como onda difusiva. De esta manera se eliminan los tres términos últimos de las ecuaciones de cantidad de movimiento. La



ecuación de conservación de cantidad de movimiento resultante para la dirección x es la siguiente:

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{\partial z_g}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4.53)$$

Si definimos como z el nivel de agua este resulta igual a la cota del terreno z_g más el tirante de agua h .

$$z = z_g + h \quad (4.54)$$

Entonces:

$$S_{fx} = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad (4.55)$$

La velocidad media a lo largo de un eje está relacionada con la pendiente de fricción a través de la ecuación de Chezy-Manning, ver ecuación 4.56.

$$u = \frac{1}{n} h^{1/2} S_{fx}^{1/2} \quad (4.56)$$

Despejando la pendiente de fricción resulta la ecuación 4.57.

$$S_{fx} = \frac{u^2 n^2}{h} \quad (4.57)$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación 4.55 en 4.56, y determinando las ecuaciones de cantidad de movimiento se reducen a las siguientes:

$$uh = K_{xi} I_{xi}^{1/2} h^{5/3} \quad (4.58)$$

$$vh = K_{xj} I_{xj}^{1/2} h^{5/3} \quad (4.59)$$



Donde:

h = Lamina de agua excedente y detención en la superficie m ,

x_i, x_j = Coordenadas espaciales m ,

u, v = Velocidad de flujo m/s ,

K = coeficiente de rugosidad $m^{1/3}/s$

I = Gradiente del nivel del agua en la superficie.

Bajo estas hipótesis el flujo superficial puede resolverse calculando el caudal entre cada par de celdas de una cuadrícula regular para cada paso de tiempo a través de las ecuaciones 4.58 o 4.59, evaluadas en diferencias finitas y multiplicadas por Δx , el tamaño del lado de la celda. El caudal saliente de una celda se considera nulo en el caso en que el tirante en la celda supera un valor umbral designado como Almacenamiento Específico en Depresiones (DS por las siglas en inglés de Depresion Storage). Por el contrario, el escurrimiento saliente es activado cuando se supera dicho valor umbral. A partir de los caudales en las fronteras calculados, la evolución del tirante en cada celda se obtiene a partir de la versión discretizada de la ecuación de continuidad. A fin de evitar que el tirante de agua se reduzca por debajo del almacenamiento específico en depresiones, volumen que no puede evacuarse por flujo superficial, se limita el flujo saliente en esos casos. La sumatoria de caudales salientes se limita según la ecuación 4.60.

$$\sum |Q_{\text{Salientes}}| \leq \frac{\sum |Q_{\text{Entrantes}}| + i \cdot \Delta x^2 + (h - DS) \cdot \Delta x^2}{\Delta t} \quad (4.60)$$

Para asegurar que todos los caudales entrantes a cada celda en un paso de tiempo sean conocidos antes de calcular los caudales salientes, las celdas se calculan en orden de mayor a menor cota topográfica. Esta técnica, no obstante, no resulta del todo eficiente cuando las pendientes del terreno son suficientemente bajas como para que puedan producirse flujos de agua en contra de las pendientes del terreno. En ese caso el flujo saliente de agua de una celda para un paso determinado puede ser reducido en exceso, retrasando el traslado de excedentes en contra de la pendiente topográfica. Este efecto, no obstante, no se considera que pueda impactar



significativamente en los resultados globales del modelo, ya que no modifica el volumen total del flujo, sino solamente la cantidad de pasos de tiempo que tarda en producirse.

El coeficiente de rugosidad de Manning depende principalmente del uso del suelo. En el cuadro 4.5 se presentan valores típicos del coeficiente de Manning para traslado de excedentes sobre distintas superficies según su uso, compilados por Donigian et al. (1983).

Cuadro 4.5. Valores típicos del coeficiente de Manning para distintos usos de suelo
(Donigian et al., 1983)

Uso de suelo	Coeficiente de Manning (Adim.)
Superficie suave compactada	0.05
Rutas pavimentadas y estacionamientos	0.1
Superficies de suelo removido	0.15-0.25
Césped medio/Pastura	0.20-0.30
Césped alto, suelo cubierto por bosque	0.30-0.45
Suelo agrícola: Labranza convencional	0.15-0.25
Suelo agrícola: Barbecho escaso	0.15-0.20
Suelo agrícola: Barbecho abundante, suelo cultivado	0.20-0.30
Suelo agrícola: rastrojo	0.25-0.35
Suelo agrícola: pradera, césped muy alto	0.30-0.40

4.10. MODELACIÓN HIDRÁULICA CON EL MODELO MIKE 11

La importancia del modelado de los sistemas de recursos hidráulicos en el medio ambiente se acentúa por la necesidad de utilizar sistemas precisos en condiciones normales y extremas. Problemas como la sequía, las inundaciones, la contaminación del agua, el riego ineficiente, la erosión del suelo, la sedimentación, la deforestación y el mal manejo de cuencas, se han convertido en asuntos importantes regionales e internacionales.

MIKE 11 es un sistema integral, un modelo tridimensional para la simulación de flujos, transporte de sedimentos y calidad del agua en los estuarios, ríos, sistemas de riego y otros cuerpos de agua

Actualmente presenta un gran desarrollo en la interface gráfica, que permite una manipulación dinámica con el usuario (Vijay, 1995).

4.10.1. Estructura integrada por módulos

MIKE 11 ha sido diseñado para tener una estructura integrada en forma modular, con módulos básicos computacionales para la hidrología, hidrodinámica, advección-dispersión, calidad del agua y el transporte de sedimentos (cohesivos y no cohesivos).

El modelo del sistema está integrado de dos formas: el proceso de la base de datos en forma gráfica y la presentación de datos, figura 4.14.

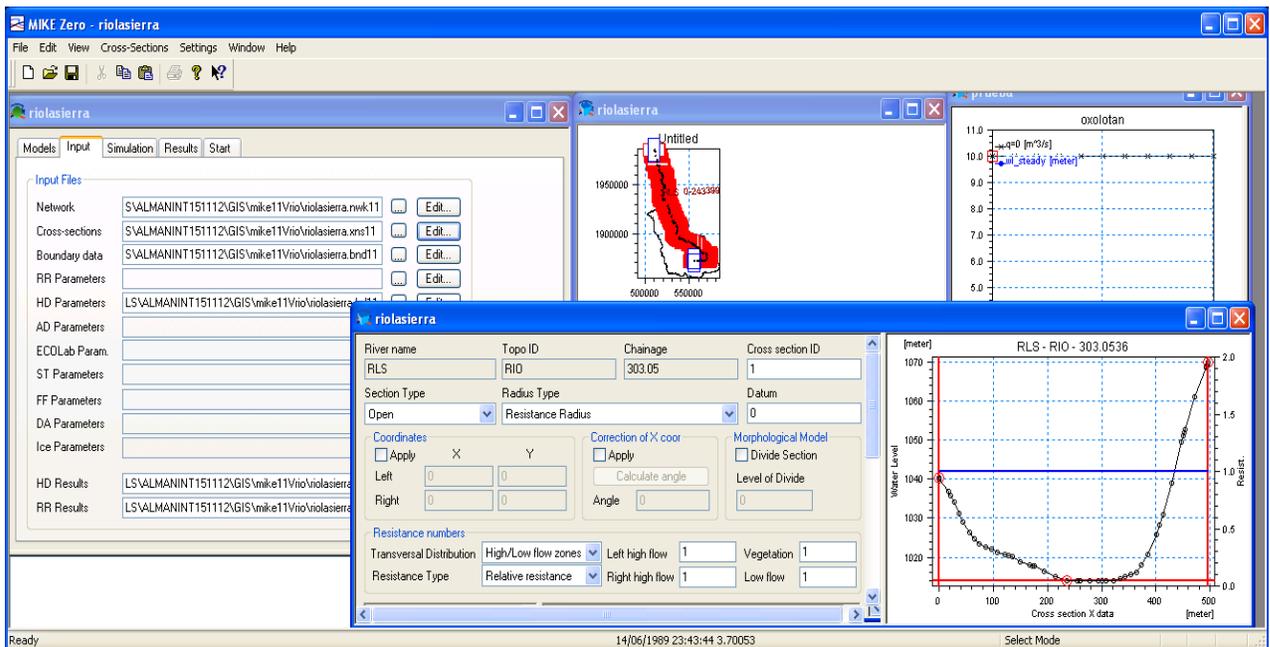


Figura 4.14. Representación gráfica y datos de entrada de MIKE 11



La base de datos de hidrología del sistema es usada independiente a la topográfica, para conectarlos usamos el sistema de información hidrológico (HIS) donde correlaciona los datos con un análisis estadístico con el sistema de información geográfica (GIS). La liga entre MIKE 11 y Arc/Info proviene de la mejora de la representación gráfica (Vijay, 1995).

4.10.2. Componentes del modelo

La base teórica para los diferentes componentes del programa son: modelo hidrológico, modelo hidrodinámico, predicción de avenidas, transporte de sedimentos no cohesivos, advección-dispersión, transporte de sedimentos cohesivos y calidad del agua. Sin embargo para la investigación, se describirá el modelo hidrodinámico, ya que permite el acoplamiento del programa MIKE 11 a MIKE SHE.

4.10.2.1. Modelo hidrodinámico. Las principales aplicaciones de simulación son: drenaje, análisis de flujo subsuperficial, irrigación, análisis de mareas, control de inundaciones (inundación fluvial y por mareas) y evaluación del impacto en ríos (bordos, modificación en la llanura de inundación, corrección de cauces, canales de desviación, dragado y estructuras hidráulicas sobre el cauce).

Ecuaciones básicas y técnica de solución: El modelo hidrodinámico está basado en la ecuación unidimensional de Saint-Venant, la ecuación 4.61 y 4.62, son la de conservación de la masa y la de momentum.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (4.61)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left[\alpha \frac{Q^2}{A} \right]}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ\bar{Q}}{C^2AR} = 0 \quad (4.62)$$

Donde:

t= Tiempo s,

x= Distancia medida a lo largo del canal, m



Q = Caudal en m^3/s ,

A = Área hidráulica m^2 ,

q = Flujo lateral (descarga de tributarios y captaciones) m^3/s ,

h = Altura del nivel de agua con respecto al datum o nivel de referencia m ,

C = Coeficiente de rugosidad de Chezy, $m^{1/2}/s$,

R = Radio hidráulico m ,

α = Factor de corrección debido a la distribución no uniforme de la velocidad en el término de transporte.

g = Aceleración de la gravedad m/s^2

La fricción del viento sobre la superficie libre se tiene en cuenta mediante la adición de un término de fricción del viento para el lado derecho de la ecuación anterior de momento.

La retícula construida puede alternar los puntos de gasto y nivel, estos se genera automáticamente.

La ecuación diferencial que se resuelve en los 6 puntos por diferencias finitas alternando los puntos de Q y H , se conoce como el método de Abbott-Ionescu.

En el proceso de simulación las ecuaciones hidrodinámicas de continuidad y cantidad de movimiento son resueltas empleando el método de diferencias finitas. Las ecuaciones son discretizadas en espacio y tiempo sobre una malla computacional de puntos alternados de Q (caudal) y h (nivel del agua), basándose en el esquema implícito de diferencias finitas, desarrollado por Abbott-Ionescu (1967) y denominado esquema de Abbott de los 6 puntos. La malla computacional es generada automáticamente de acuerdo a los requerimientos del simulador. Los puntos Q son ubicados en el punto medio entre los puntos h vecinos (aguas arriba y aguas abajo de cada punto Q) y también donde tienen estructuras, mientras que los puntos h se ubican en los sitios donde se tienen secciones transversales, o a

intervalos equidistantes si la distancia entre las secciones transversales es mayor que un espaciamiento máximo definido por el usuario (dx_{max}), figura 4.15.

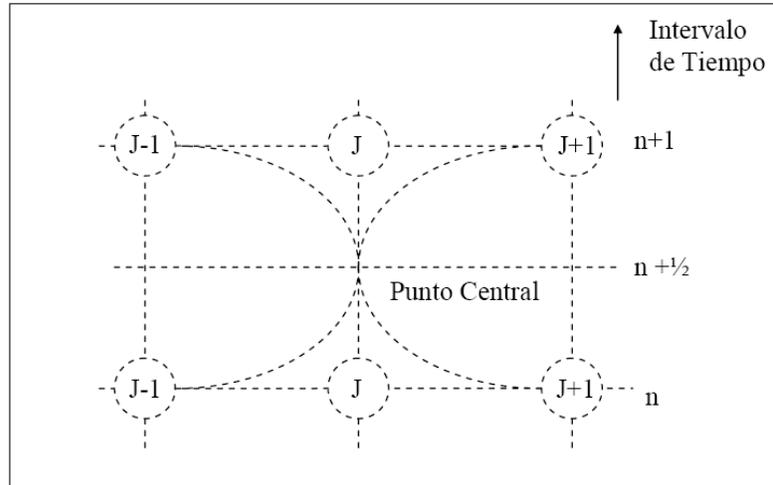


Figura 4.15. Esquema centrado de Abbott de los 6 puntos

El esquema es aplicable en flujos verticalmente homogéneos, en ríos y canales de pendiente variada, desde ríos de pendiente pronunciada hasta ríos y estuarios de pendiente baja (influenciado por la acción de mareas). Tanto los flujos subcríticos como los supercríticos pueden ser descritos por medio de un esquema numérico que se adapta de acuerdo con las condiciones de flujo locales. Así mismo hace uso de ecuaciones analíticas y empíricas para el caso de: Evapotranspiración, drenaje y riego, Abbott et al 1986a.

4.11. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Frecuentemente los datos disponibles X_i, Y_i $i = 1, 2, \dots, n$, siendo X_i el tiempo y Y_i los caudales, deben servir tanto para calibrar como para validar al modelo seleccionado o desarrollado. Estos dos procesos son complementarios pero excluyentes, en cuanto a la información que utilizan, estos procesos se confunden, cuando se le da el mismo uso a la información disponible.



La calibración consiste en ajustar los parámetros del modelo hasta lograr que los caudales simulados coincidan apreciablemente con los caudales medidos para un cierto periodo de calibración.

4.11.1. Modelo Nash

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de los datos medidos ("información") (Nash y Sutcliffe, 1970). NSE indica qué tan bien la trama de observación frente a los datos simulados se ajusta a la línea 1:1. NSE se calcula como se expresa en la ecuación 4.63:

$$NSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (4.63)$$

Donde:

NSE= Eficiencia de Nash-Sutcliffe,

Y_i^{obs} = es la i-ésima observación del componente evaluado,

Y_i^{sim} = es el valor i-ésimo simulado para el constituyente evaluado,

Y^{mean} = es la media de los datos observados para el constituyente que se evalúa,

n= es el número total de observaciones,

i= número de observación 1, 2, 3, ..., n.

NSE oscila entre $-\infty$ y 1, con NSE = Siendo 1 el valor óptimo. Los valores comprendidos entre 0 y 1 son generalmente visto como niveles aceptables de rendimiento, mientras que los valores <0 indica que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable.

NSE fue utilizada por la American Society of Civil Engineers (ASCE,1993), Legates y McCabe (1999), y se utiliza con mucha frecuencia, lo que proporciona una amplia información sobre los valores declarados. Sevat y Dezetter (1991) también



encontraron NSE a ser la mejor función objetivo para reflejar el ajuste global de un hidrograma.

4.12. PROPUESTAS DE OBRA CONTRA INUNDACIONES

Las acciones para evitar o reducir las inundaciones, según Maza et al. (1990) consisten en construir obras que interfieren directamente con el agua de lluvia o con la que escurre por los ríos, para impedir su paso, confinarla, encauzarla, almacenarla o modificar su velocidad de desplazamiento y caudales.

4.12.1. Acciones estructurales para evitar o reducir inundaciones

Las obras que pueden ser construidas para reducir inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos son (Maza et al., 1990):

- Bordos perimetrales a poblaciones o construcciones de importancia, a lo largo de una o ambas márgenes del río.
- Muros longitudinales a lo largo de una o ambas márgenes del río.
- Desvío permanente por medio de cauces de alivio.
- Desvío temporal a lagunas o zonas bajas de la planicie.
- Corte de meandros y rectificaciones.
- Presas de almacenamiento.
- Presas rompe-picos.
- Presas para retener azolves.
- Remoción de la vegetación.
- Dragado del cauce principal y demolición de obstáculos.
- Reforestación de la cuenca.
- Canalización o entubamiento de un cauce. Se utiliza en los tramos en que los arroyos o ríos cruzan poblaciones o ciudades.



4.12.2. Acciones estructurales para evitar o reducir inundaciones por lluvia local

El agua de lluvia que cae localmente en una región se puede acumular produciendo inundaciones. Estas inundaciones se deben a diferentes causas, entre las que se pueden señalar (Maza et al., 1990):

- Suelo pocos permeables.
- Terrenos con poca o nula pendiente, confinados artificialmente con terraplenes de caminos, confinados en forma natural, ferrocarriles, canales y bordos longitudinales.
- Drenaje natural azolvado o destruido.
- Lluvia en exceso, mayor a la capacidad de drenaje local.
- Incremento en la elevación del nivel freático.

Las inundaciones por lluvia local se reducen o evitan completamente con un drenaje adecuado, que pueden estar formados por uno o varios elementos (Maza et al., 1990):

- Red de drenes
- Estaciones de bombeo
- Compuertas
- Puentes y alcantarillas
- Dragado de cauces y drenes actuales
- Remoción de la vegetación en cauces

4.12.3. Acciones no estructurales para evitar o reducir inundaciones

Las acciones no estructurales o indirectas están relacionadas con estudios hidrológicos e hidráulicos y no constituyen construcción de obras. Su objetivo principal consiste en evitar o reducir los daños causados por inundaciones, sobre todo las pérdidas de vidas humanas, avisando oportunamente a las personas que pueden ser afectadas, proponiendo zonas con grados de alertamiento, y considerando estrategias de resguardo durante el periodo de lluvias.



CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta parte se presenta el proceso que se siguió en este trabajo para la simulación del proceso precipitación escurrimiento. La finalidad es la de analizar la aplicación del sistema MIKE, para su utilización en el estudio de prevención de riesgo de inundaciones y detección de sus posibles sitios de riesgo, así como su alternativa de solución, con la información disponibles en el país. Se presenta una aplicación en la cuenca del río La Sierra en los estados de Tabasco y Chiapas, México.

En la figura 5.8, se presenta un diagrama de flujo de los métodos que se siguieron para la realización del estudio de la cuenca del río La Sierra considerando las fases más importantes que fueron desarrollados como: elaborar un mapa base de la zona de estudio; posteriormente, con la información meteorológica e hidrométrica disponible se realizó el análisis hidrometeorológico; la modelación hidrológica e hidráulica, se determinaron los sitios de riesgo de inundación para proponer las alternativas de solución.

5.1. MATERIALES

A. Documentación antecedente: Libros, artículos, boletines hidrológicos, manuales y base de datos.

B. Información meteorológica: El inventario de estaciones meteorológicas se elaboró, con base en la información de diferentes fuentes, como son las bases de datos climatológicos del ERIC III, elaborada por el IMTA, del Servicio Meteorológico Nacional y del Organismo de Cuenca Frontera Sur, (OCFS), de la CONAGUA. Se definieron 26 estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca del río La Sierra, utilizando las variables: precipitación (mm), temperatura (°C), evaporación (mm), cobertura nubosa (día), tormenta (día) y granizo (día), reportan los datos en 24 horas.



C. Información hidrométrica: Para el análisis hidrométrico se ubicaron las estaciones hidrométricas, que miden los escurrimientos y en los cauces principales, para realizar el estudio hidrométrico de las subcuencas alta y media de la cuenca del río La Sierra y en la cuenca del río Teapa, se utilizaron los acervos hidrométricos existentes, como los boletines hidrológicos y las bases de datos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) que posteriormente se llamó Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS) y de información proporcionada por el Organismo de Cuencas Frontera Sur, de la CONAGUA. Se localizaron 8 estaciones hidrométricas convencionales, que registran el datos de gasto en m^3/s en un día.

D. Cartografía impresa y digital: Con la finalidad de elaborar el mapa base para el estudio, se revisó la información cartográfica impresa y digital. Esta actividad consistió en investigar, recopilar, y analizar la disponibilidad de información geográfica y cartográfica en sus diferentes tipos, como pueden ser mapas, digitales o impresos del área de estudio.

El área que abarca la cuenca del río La Sierra de acuerdo a la información cartográfica elaborada y publicada por Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012) se utilizó la cartografía topográfica, clima, geología, edafología, uso de suelo y vegetación, en particular, escalas 1:50,000, abarcando las cartas, E15C29, E15C39, E15C49, E15D11, E15D21, E15D31, E15D41, E15D51, E15D32, E15D42, E15D52, E15D33, E15D43, y E15D53, figura 5.1.

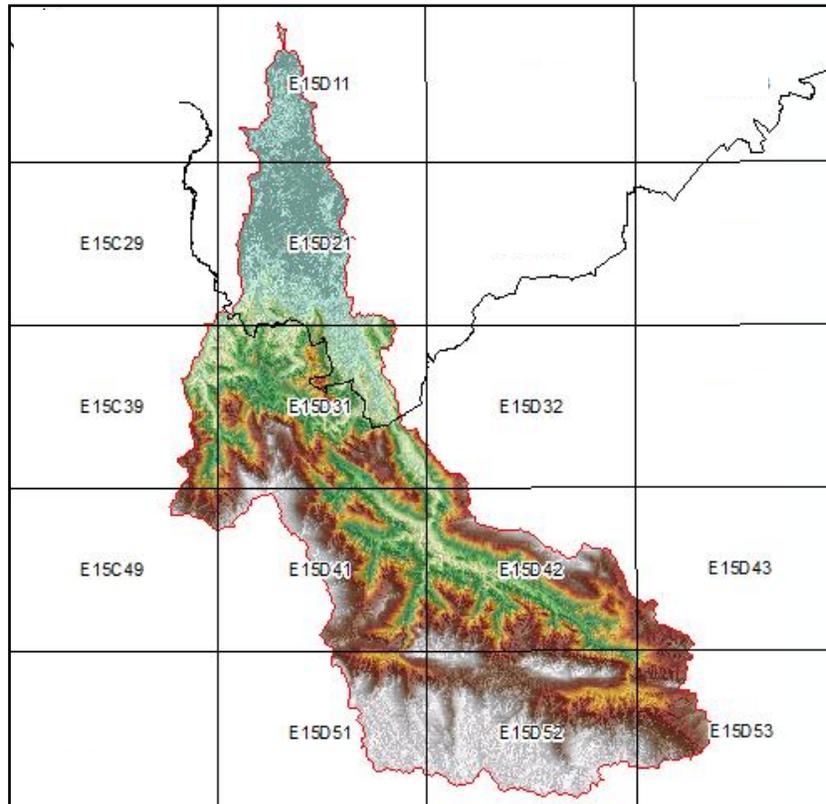


Figura 5.1. Cartas topográficas escala 1:50,000, que cubren el área de estudio

E. Fotografías satelitales: De la página de USGS se descargaron las imágenes de satélite, con el objeto de comparar los diferentes usos de suelo y vegetación. De la página http://landsat.usgs.gov/Landsat_Search_and_Download.php, como una página principal del USGS Landsat.

Se seleccionaron imágenes que no presentaran nubosidad, corresponden a Landsat 5 TM, con fechas enero y marzo de 1986, así como unas de abril de 2011, figura 5.2.

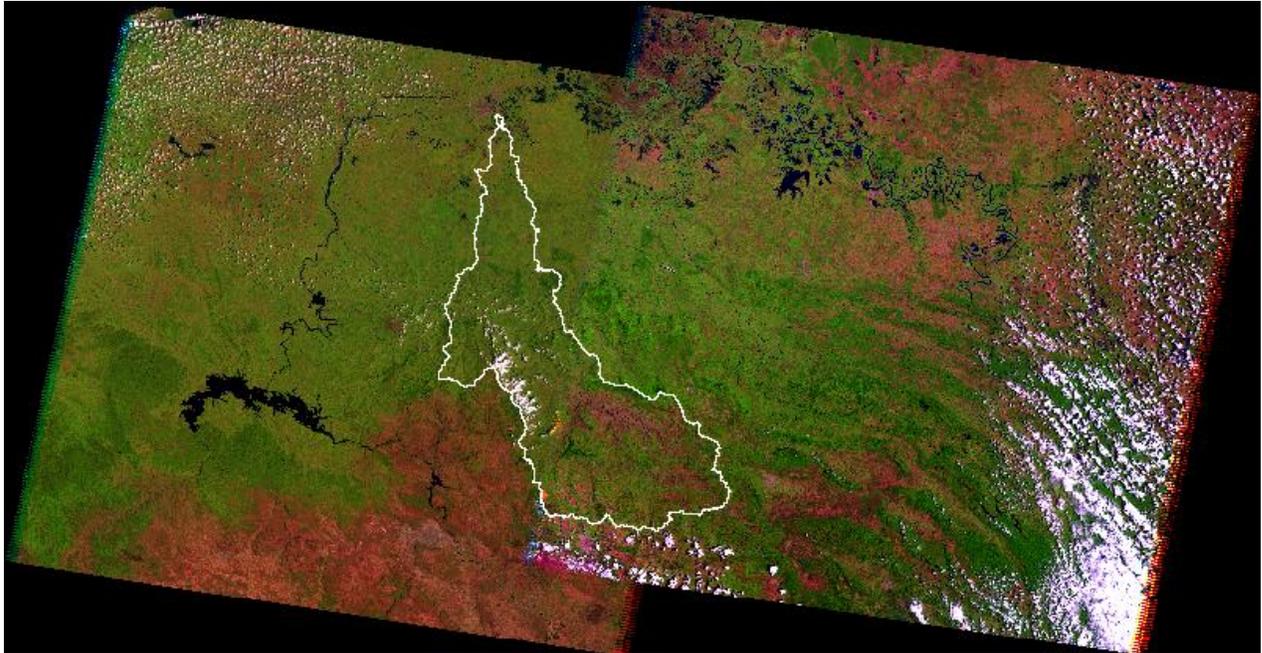


Figura 5.2. Imagen satelital del rio La Sierra

F. Equipo de computo: Para el desarrollo de este trabajo se utilizó una computadora personal Toshiba Satellite L845-SP4270km, con las siguientes características técnicas: Sistema Windows 7 Ultimate, Intel(R) Celeron(R) CPU B820 @ 1.70 GHz 1.7 GHz, 4.0 GB de RAM, Sistema operativo de 32 bits.

G. Software: Plataforma de Sistema de información Geográfica (ArcView 3.2 y ArcGis 9.2), Water Modeling System (WMS 8.3) para la delimitación de la cuenca, Climgen para la generación de datos sintéticos y relleno de datos faltantes, MIKE SHE para la modelación hidrológica, MIKE 11 para la modelación hidráulica, el programa de office (Word y Excel) para la elaboración del documento.

5.1.1. Ubicación de la zona de estudio

A. Descripción de la región hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta. La Región Hidrológica número 30, Grijalva-Usumacinta, SRH, 1980 constituye una de las más importantes del país. Está ubicada hacia la zona que genéricamente se conoce como sureste y corresponde a la vertiente del Golfo de México, esta región

se ubica internacionalmente en el límite entre México y Guatemala, figura 5.3 limita al este con el río Suchiate, al sureste el límite político entre Chiapas y Guatemala, al sur, límite político entre Chiapas y Guatemala, al noreste lindero natural entre Chiapas y Guatemala constituido por el río Usumacinta, al sur límite político entre Tabasco y Guatemala y al este límite político entre Tabasco y Guatemala.

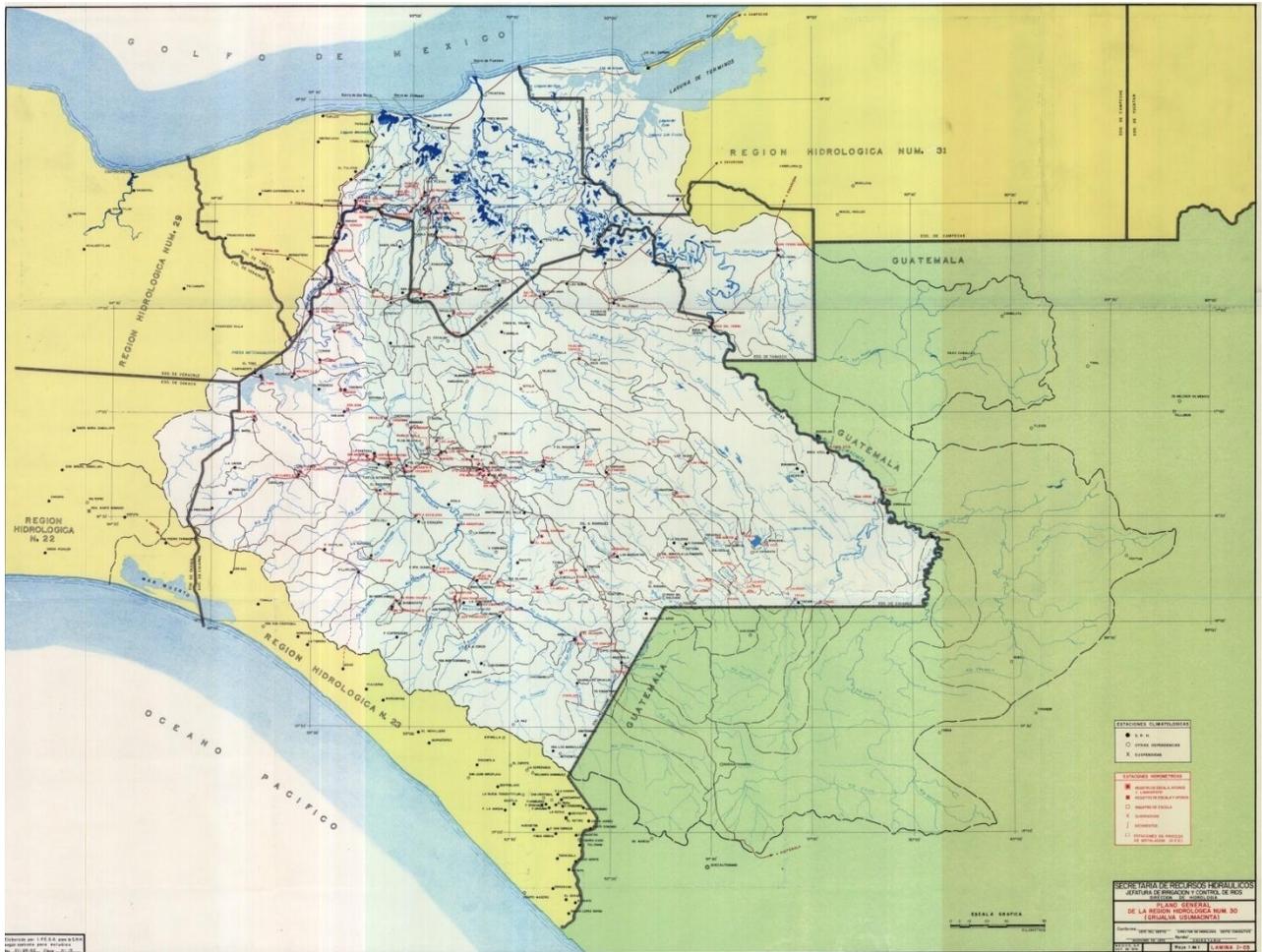


Figura 5.3. Región hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta, (SRH, 1980)

B. Descripción de la cuenca del río La Sierra. Para identificar el área de estudio se realizó la compilación y colección de información descriptiva, geográfica, topológica, física, social y de problemática que se considera impactante para realizar el tipo de estudio que se presenta. Este reconocimiento preliminar implica la colección de estudios, literatura elaborada y escrita por otras entidades oficiales, académicas,

para estatales y locales para obtener un conocimiento más detallado del área de estudio.

El río La Sierra, es afluente derecho del río Grijalva, con un área en la cuenca de 4,424.66 km²; por su tamaño es la cuarta en importancia como tributario del Grijalva, su desarrollo a lo largo del cauce principal es de 245 km, figura 5.4.

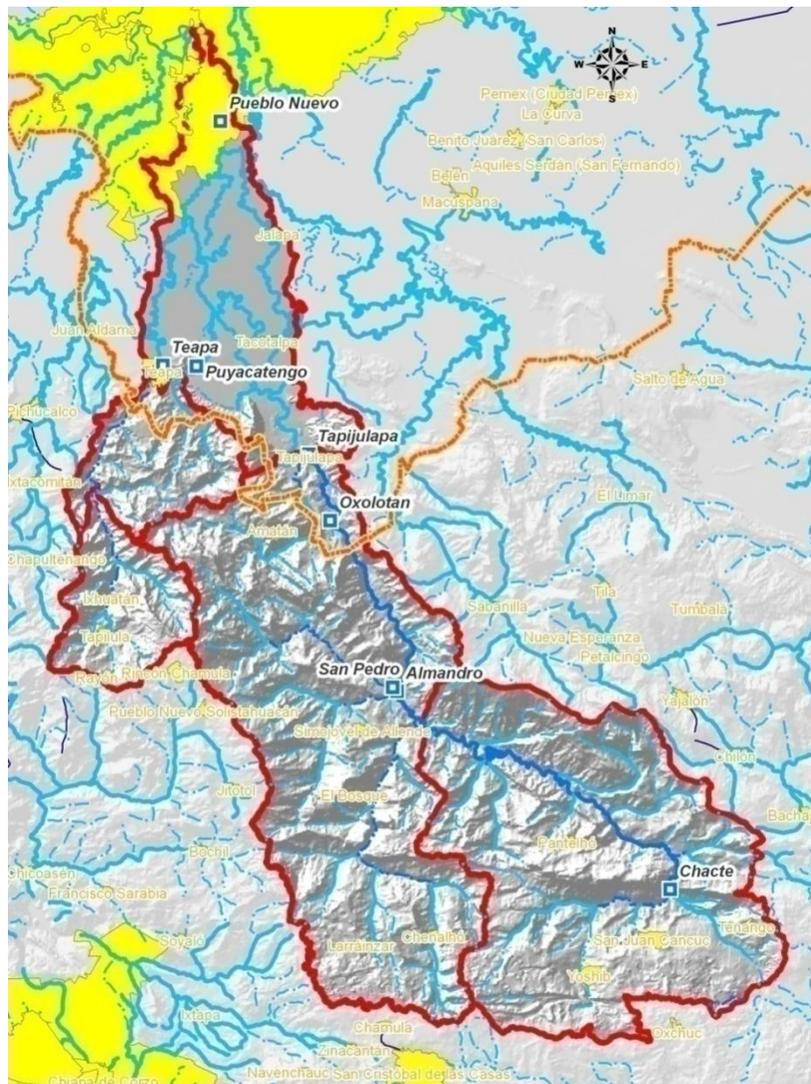


Figura 5.4. Ubicación de la cuenca del río La Sierra

El río La Sierra (SRH, 1980), nace a unos 2800 m de altitud en un punto situado a 12 km al noroeste de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas y describe una amplia curva



en sentido retrogrado mediante la cual llega a las cercanías de Simojovel; en este primer tramo se le conoce con el nombre de río Chacté. En un punto situado a 5 km al noroeste de Simojovel recibe un afluente izquierdo de importancia, llamado río Plátanos, de dirección general sur-norte y desde la confluencia el rumbo varía y sigue un cauce muy sinuoso de dirección general N 5° W hasta la desembocadura en el Grijalva a la altura de Villahermosa, Tabasco. Aguas abajo de la confluencia del río Plátanos en el Chacté la corriente principal se conoce como río Oxolotán, el cual pasa por Oxolotán y Tapijulapa, Tabasco y aguas abajo de esta ciudad recibe otro nuevo nombre, que es el río de Tacotalpa. A unos 23 km aguas arriba de la desembocadura en el Grijalva recibe la aportación izquierda del río Teapa, que viene con dirección general sur-norte desde Ixhuatán, pasa por Teapa Tabasco y entra al Tacotalpa a unos 32 km aguas abajo del cruce de la corriente principal donde se encuentra el ferrocarril del sureste.

El río Teapa afluente del río La Sierra, tiene la longitud de 82 km a lo largo de su cauce principal y su cuenca un área de 608 km² hasta la confluencia con el Tacotalpa. De la confluencia hacia abajo el río se conoce como río de La Sierra en el tramo final del recorrido hasta conectarse con el viejo Mezcalapa.

La corriente del río de La Sierra se afora en varios sitios de interés. Sobre el Oxolotán, la extinta Secretaria de Recurso Hidráulicos (SRH) instaló la estación hidrométrica de Oxolotán, que se opera desde junio de 1965 y está situada a unos 30 km aguas abajo de la confluencia del Plátanos con el Chacté. La cuenca total hasta dicha estación hidrométrica es de 2901 km², figura 5.5.

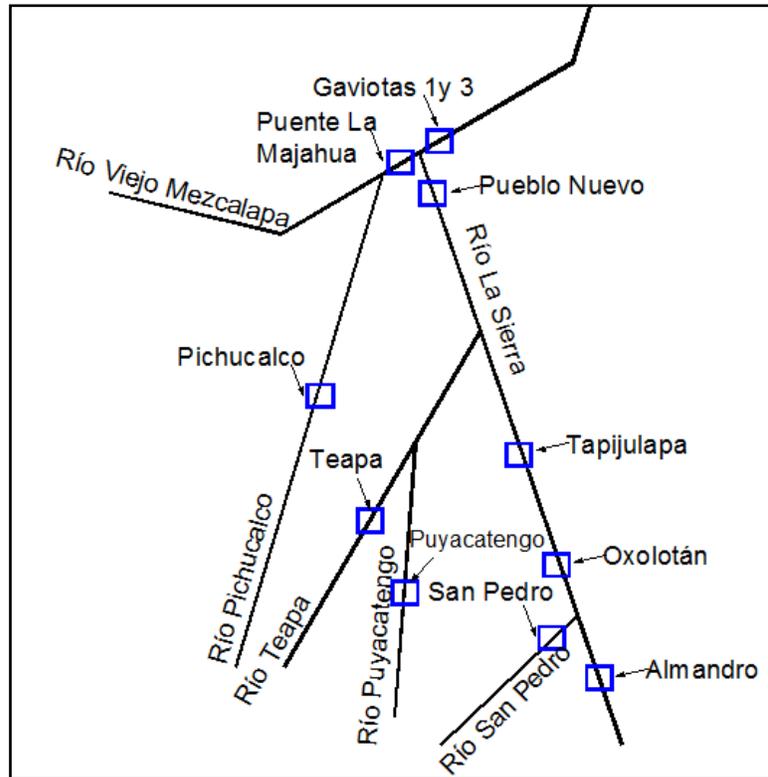


Figura 5.5. Configuración de estaciones hidrométricas en los ríos La Sierra y Teapa (SRH, 1980)

Se hacen mediciones de acarreo de sólidos en suspensión a partir de julio de 1965.

A 11 km aguas abajo del Oxolotán existe otra estación hidrométrica llamada Tapijulapa que también fue instalada por la SRH y que cuenta con datos desde marzo de 1964. La cuenca total hasta la estación Tapijulapa es de 3219 km².

Sobre el río Teapa hay una estación hidrométrica que se llama Teapa, situada en las inmediaciones de la ciudad de igual nombre, que dependía de la SRH y que cuenta con observaciones desde mayo de 1950.

Sobre un afluente derecho del río Teapa, llamado Puyacatengo, hay otra estación hidrométrica, llamada Puyacatengo que también dependía de la SRH y que está



situada a 24 km aguas arriba de la confluencia del Puyacatengo con el río Teapa con datos a partir de mayo de 1950.

El área de la cuenca hasta la estación Teapa es de 476 km² y hasta Puyacatengo de 169 km².

Finalmente a 101 km aguas abajo de la confluencia del río Teapa y del río Tacotalpa se cuenta con la estación hidrométrica de Pueblo Nuevo, operada por la extinta SRH desde diciembre de 1947 a la cual corresponde una cuenca total de 4723 km². Después de Pueblo Nuevo el río aun recorre 17 km de longitud para llegar al Viejo Mezcalapa y al Grijalva, a la altura de la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

Por su parte la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con dos estaciones hidrométricas instaladas hacia la cuenca alta del río Tacotalpa, una llamada Almandro sobre el propio río Tacotalpa y otra llamada San Pedro, sobre un afluente izquierdo del Tacotalpa llamado río San Pedro.

5.1.2. Reconocimiento preliminar de campo

Con la información obtenida en gabinete, se recorrió físicamente el área de estudio, para identificar las características sobresalientes, y conocer la problemática que trae como motivo de este estudio. El reconocimiento de la cuenca se realizó en vehículo hasta la parte alta entrando por San Cristóbal de las casas y recorriendo la cuenca alta y media, así como la cuenca del río Teapa, identificando los puntos estratégicos para conocer las confluencias principales, figuras 5.6 y 5.7.



Figura 5.6. Rio La Sierra a la altura de la cuenca alta Puente Portugal



Figura 5.7. Rio Teapa a la altura de El Refugio

Se recorrió toda la cuenca desde la parte alta a la zona baja, recopilando y comparando la información que se tenía para generar la información básica del estudio, correspondiente a la hidrología, vegetación, geología, vías de acceso, centros poblacionales, nivel económico, clima y usos de suelo.



5.2. MÉTODOS

El desarrollo del trabajo, consta de las fases: Compilación descriptiva de la región hidrológica, compilación cartográfica, reconocimiento de campo, elaboración de mapa base, delimitación y caracterización de la cuenca, análisis hidrometeorológico, modelación hidrológica con el modelo MIKE SHE, modelación hidráulica con el modelo MIKE 11 y calibración del modelo, figura 5.8.

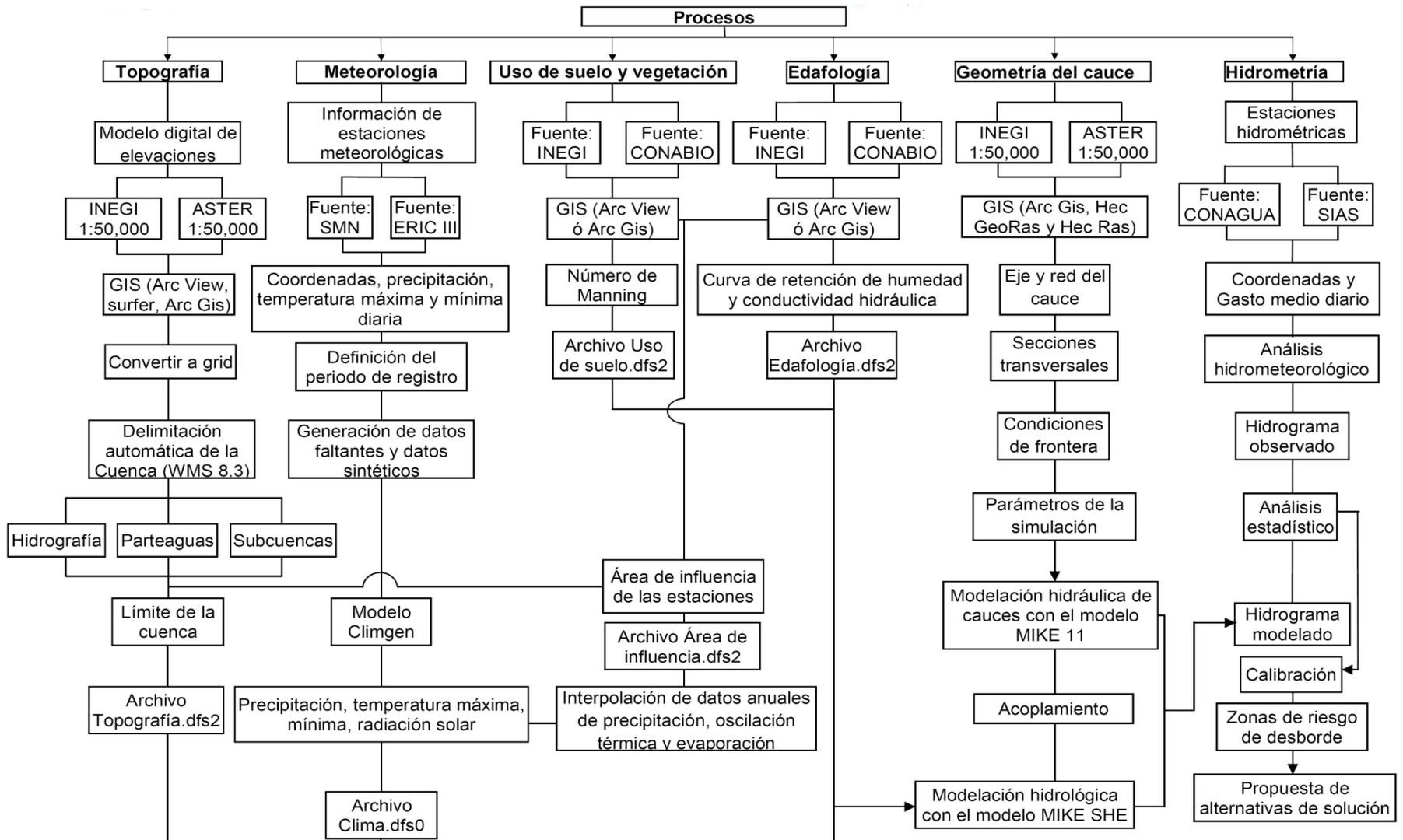


Figura 5.8. Metodología general de la modelación con el MIKE



5.2.1. Elaboración del mapa base de la cuenca hidrológica

Esta parte consistió en la realización de amplios trabajos de campo y gabinete, ya que se debe cubrir toda el área de captación de agua de lluvia que alimentará las corrientes, las que eventualmente pueden producir fenómenos de inundaciones en las zonas ribereñas, altas y en las zonas bajas de la Cuenca del Río La Sierra.

Para la elaboración del mapa base de la cuenca, se usaron las cartas de INEGI 1:50 000, se manejaron en un mapa base: carreteras, localidades y ciudades, parteaguas, hidrología y el modelo de elevación.

Se definió y elaboró un mapa base en un modelo de Sistema de Información Geográfica del área de estudio, en el cual se apoyará todo el estudio para el río La Sierra, con toda la información topológica básica.

El mapa base de la cuenca hidrológica, se elaboró con la información topográfica de la superficie terrestre, que se adquiere mediante el procesamiento de información obtenida con técnicas de sensores remotos.

5.2.1.1. Plataforma del sistema de información geográfica. Actualmente, con el desarrollo de los modernos Sistemas de Información Geográfica (SIG) este trabajo se torna más preciso y expedito, ya que permite que se tenga información de diferente tipo, como lo son: características fisiográficas, lineales y de área, relieve y topología del terreno, redes de cauces de los ríos en estudio, así como de cobertura superficial del uso actual del terreno, de tipos y características de los suelos y de condiciones de los cauces hidrológicos, en este caso se utilizó el ArcGis 9.3.

5.2.1.2. Delimitación de la cuenca del río La Sierra. La delimitación de la cuenca y la hidrografía, se realizó con el WMS 8.3, una vez cargado el icono hidrológico modeling wizard, lo primero que se debe de hacer es guardar el proyecto, en definir la proyección debe de aparecer que está en UTM, y en el comando de acumulación y dirección del flujo con el comando TOPAZ, donde se indica el área de drenado que manejará el programa, a la ventana donde indicamos la salida de flujo o lo que corresponde al final de la cuenca que se está trabajando, figura 5.9.

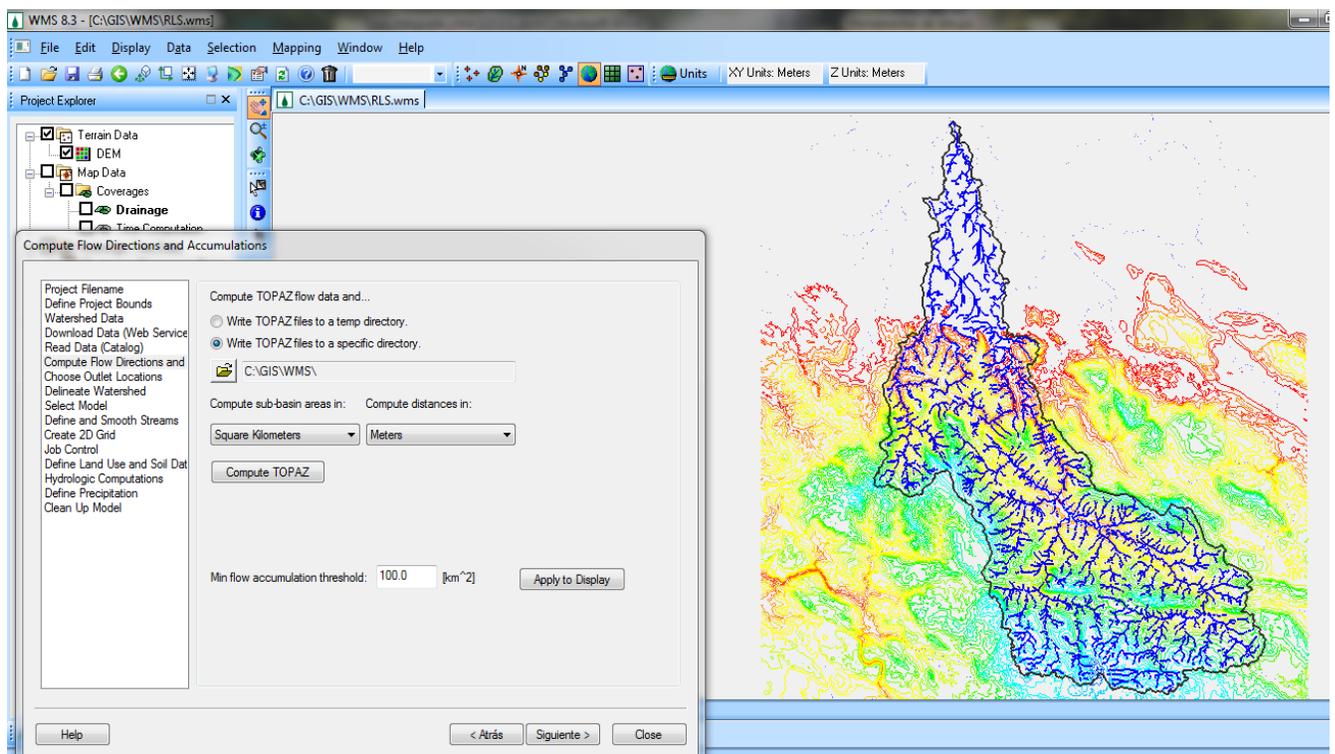


Figura 5.9. Delimitación de la cuenca río La Sierra con WMS 8.3

5.2.1.3. Parteaguas. Con el programa WMS 8.3, se genera la delimitación automática del parteaguas, el cual se presenta en el mapa 1 de anexos, donde se presentan la delimitación del área de estudio.



5.2.1.4. Hidrografía. Para generar el orden de corriente, se realizó con el uso del WMS 8.3, ya que permite generar las corrientes de los ríos, asignándole un valor de acumulación del flujo de 100 km^2 , dejando identificadas las corrientes principales, estas pueden ser consultadas en el mapa 3 de anexos, correspondiente a la hidrología.

5.2.1.5. Delimitación de subcuencas. La delimitación de las subcuencas se realizó en base a la disponibilidad de información meteorológica, hidrométrica e hidrología en la cuenca. También se consideró las zonas de riesgo de inundación a lo largo del cauce principal de río para realizar la simulación del tránsito de avenidas. Como punto importante es señalar que se ubicaron las salidas de las subcuencas haciéndolas coincidir con la ubicación de las estaciones hidrométricas convencionales con aforos a nivel diario.

Para delimitarlas se hizo uso del programa WMS 8.3 dejando establecido cinco subcuencas, tal y como se presenta en la en mapa 1 de anexos, delimitación de la cuenca, cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Área y porcentaje de superficie por subcuenca

Subcuenca	Área (Km^2)	Área (ha)	Superficie (%)
Alta del río La Sierra	1,456.09	145,608.53	32.91
Media del río La Sierra	1,687.25	168,724.55	38.13
baja del río La Sierra y Teapa	721.7	72,170.00	16.31
Alta del río Teapa	559.63	55,962.92	12.65
Total=	4,424.66	442,466.00	100

La subcuenca con mayor área es la media del río la Sierra con 38.13% y la que presenta menor área es la del río Teapa con el 12.65%. El área total de la cuenca es de 4424.66 km^2 .

5.2.2. Caracterización de la cuenca hidrológica

Con el sistema de información geográfica del mapa base obtenido, se caracterizó la cuenca en forma morfométrica, hidrológica, climática, edafológica, fisiográfica, de uso de

suelo y vegetación, así como de la ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas existentes.

5.2.2.1. Morfometría, fisiografía e hidrografía de la cuenca. La caracterización de las cuencas hidrológicas consiste en el análisis morfométrico, fisiográfico y de relieve, estimación de parámetros de caracterización específica, lineales, de área y de relieve, cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Características morfométricas, fisiográficas e hidrografía de la cuenca del río La Sierra

Características	Parámetros	Valor
Parámetros lineales asociados a la hidrografía	Longitud del cauce principal	245 Km
	Orden de corriente	4to orden
	Relación de bifurcación	2.2
	Longitud media del cauce	4.73 Km
	Densidad de drenaje	0.29 Km/Km ²
	Densidad de corriente	0.58 cauces/Km ²
	Longitud media del flujo superficial	1.67 Km
Parámetros lineales y de área de la cuenca	Área	4,424.66 Km ²
	Forma	Hoja alargada
	Perímetro	648.22 Km
	Longitud de la cuenca	136.25 Km
	Coefficiente de compacidad	2.75
	Razón de elongación	0.31
	Factor de forma	0.23
Parámetros asociados al relieve	Pendiente media de la cuenca	40%
	Elevación media de la cuenca	300 m
	Pendiente del cauce	0.84%

5.2.2.2. Meteorología. Las estaciones meteorológicas se localizaron a partir de una revisión en las instituciones, encargadas del resguardo de la información climática.

El inventario de estaciones meteorológicas se elaboró, con base en la información de diferentes fuentes, como son las bases de datos climatológicos del ERIC III, elaborada por el IMTA, del Servicio Meteorológico Nacional y del Organismo de Cuenca Frontera Sur, (OCFS), de la CONAGUA. Se definieron las estaciones meteorológicas localizadas en la



cuenca del río La Sierra y en la del río Teapa, con las que se realizó un estudio meteorológico. Para cada estación se registró la información siguiente: clave, nombre, altitud, latitud, longitud, subcuenca, estado y registro cuadro 5.3.

En total se consideraron 20 estaciones meteorológicas, como condición mínima era que presentaran por lo menos diez años de registro. La única que queda fuera de la cuenca es la estación 7355 Jitotol, considerada por la cercanía a la cuenca.

Cuadro 5.3. Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río La Sierra

No.	Clave	Nombre	Altitud	Latitud	Longitud	Subcuenca	Edo	Registro
1	7390	Tzontehuitz	760	16.834	-92.58	Alta	Chis	1994-2009
2	7033	San Pedro Chenalho (smn)	1600	16.9	-92.6	Media	Chis	1939-1990
3	7149	San Pedro Chenalho (dge)	1480	16.894	-92.626	Media	Chis	1966-2008
4	7071	Guaquitepec	1040	16.978	-92.29	Media	Chis	1966-2008
5	7207	Larrainzar	1930	16.887	-92.716	Media	Chis	1972-2008
6	7355	Jitotol	1700	17.08	-92.85	Media	Chis	1982-2008
7	7389	Sitala	2800	17.024	-92.306	Alta	Chis	1984-2008
8	7160	Simojovel (dge)	700	17.133	-92.717	Media	Chis	1965-1999
9	7005	Almandro (cfe)	565	17.183	-92.767	Media	Chis	1955-1994
10	7167	Tapilula	780	17.249	-93.013	Teapa	Chis	1965-2007
11	27070	Oxolotan	36	17.383	-92.75	Media	Tab	1974-2009
12	27024	La Huasteca	108	17.52	-92.927	Teapa	Tab	1970-2007
13	27011	Dos Patrias Tacotalpa	60	17.613	-92.798	Baja	Tab	1950-1999
14	27037	Pueblo Nuevo	60	17.854	-92.879	Baja	Tab	1948-2000
15	27042	Tapijulapa	22	17.467	-92.817	Media	Tab	1962-2007
16	7217	Solosuchiapan	60	17.428	-93.029	Teapa	Chis	1973-2006
17	27044	Teapa (dge)	38	17.567	-92.967	Teapa	Tab	1960-2007
18	27045	Teapa (smn)	50	17.55	-92.95	Teapa	Tab	1962-1988
19	27061	Puyacatengo	86	17.513	-92.92	Teapa	Tab	1972-2008
20	27068	Campo Exp. Puyacatengo	25	17.5	-92.917	Teapa	Tab	1974-1999

Las variables que se obtuvieron para el análisis son: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, evaporación, nubosidad, tormenta, granizo y niebla.

A. Complemento de datos faltantes y generación de datos sintéticos. Para el complemento de datos faltantes y generación de datos sintéticos, se utilizó el modelo ClimGen, es un programa de versión libre que puede ser descargado en la dirección http://www.bsyse.wsu.edu/CS_Suite/ClimGen/index.html, sin embargo para registrarse en la dirección http://bsyse.wsu.edu/rnelson/registration/registration_console_CGI.exe, el programa solo es ejecutado en el sistema operativo de Windows XP, figura 5.10.

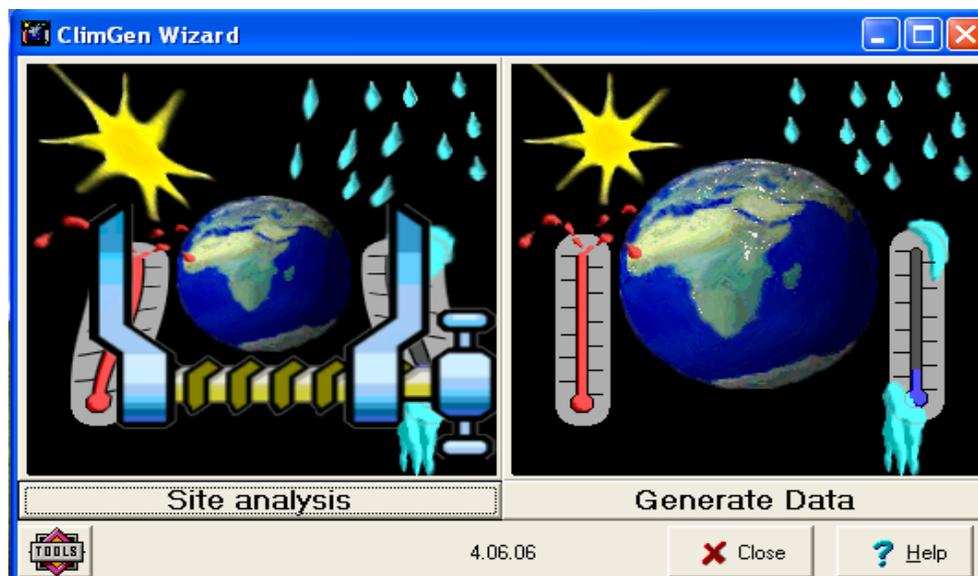


Figura 5.10. Generador climático Climgen

Para cargar los datos en Climgen, se debe de tener un registro mínimo de las variables: precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima a nivel diario. La estructura de los datos, consisten en acomodarlos en una hoja de Excel, iniciando por el numero del día, consecutivo hasta el último día del registro, en el caso de que a la base de datos le falte alguna fechas, es necesario complementarlas para que el tiempo sea consistente, en la siguiente columna se coloca el dato de la variable que se desea generar, en el orden siguiente: año, día juliano, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y el dato de radiación si se tiene disponible. En la columna A: Año, B: Día Juliano, C:



Precipitación, D: Temperatura máxima, E: Temperatura mínima iniciando en la fila 1 de la hoja.

Definida la base de datos se guarda en formato *.dat, con el procedimiento de guardarse en *.txt, en forma tabular para ms dos y después con el bloc de notas pasarlo a *.dat.

En Climgen, al seleccionar herramientas y abrir el archivo en formato *.dat, en esta sección se tiene que establecer los parámetros de la generación de datos, es decir los años de inicio, los datos que se están introduciendo, seleccionando la forma estándar, en la que los datos están separados por un espacio.

Como siguiente paso es necesario seleccionar los datos de entrada que corresponde al archivo con formato *.dat que se genera automáticamente al ser abierto, este es un archivo con formato *.UED.

En el sitio de análisis, en la ventana principal de Climgen, se selecciona el documento en formato *.UED, y en la ventana de editar, seleccionar los datos de localización (latitud, longitud y altitud de la estación meteorológica).

En los datos diarios de clima, se despliegan los datos graficados de las variables, en la parte inferior la precipitación, en la superior la oscilación térmica, estimándose la radiación. Se guardan en formato *.loc, seleccionar, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Considerar todos los datos del registro para el análisis, en las características del *.UED, se corren los datos para el análisis y se generan los parámetros meteorológicos. En opciones, seleccionar los parámetros para generar la evapotranspiración de referencia por el método de Penman Monteith (Allen et al., 2006).

Al generar la serie de tiempo, se asigna el año inicial y final de los datos, en datos de salida, seleccionar la forma de exportación tipo *.txt.



B. Definición del área de influencia por estación meteorológica. Para la definición del área de influencia por estación, consistió en ubicar las estaciones meteorológicas, en un plano base, a los cuales se les agregaron la capa de oscilación térmica, temperatura media, precipitación, evaporación, topografía, subcuencas de acuerdo a la hidrografía y uso de suelo de la zona, mediante un polígono, se fueron digitalizando las áreas con características parecidas en las variables consideradas, figura 5.11 y cuadro 5.4, generando 20 áreas de influencia a las cuales se les aplicarán los conceptos relacionados a las variables que se recabaron.

Cuadro 5.4. Áreas de influencia por estación

No.	Clave	Nombre	X	Y	Z	Área (Km ²)	Superficie (%)
1	7390	Tzontehuitz	-92.58	16.834	760	434.984	9.831
2	7033	San Pedro Chenalho (smn)	-92.6	16.9	1600	60.432	1.366
3	7149	San Pedro Chenalho (dge)	-92.626	16.894	1480	135.901	3.072
4	7071	Guaquitepec	-92.29	16.978	1040	270.861	6.122
5	7207	Larrainzar	-92.716	16.887	1930	272.909	6.168
6	7355	Jitotol	-92.85	17.08	1700	127.414	2.88
7	7389	Sitala	-92.306	17.024	2800	432.738	9.781
8	7160	Simojovel (dge)	-92.717	17.133	700	558.88	12.632
9	7005	Almandro (cfe)	-92.767	17.183	565	377.07	8.522
10	7167	Tapilula	-93.013	17.249	780	224.51	5.074
11	27070	Oxolotan	-92.75	17.383	36	468.376	10.586
12	27024	la Huasteca	-92.927	17.52	108	113.245	2.56
13	27011	Dos Patrias Tacotalpa	-92.798	17.613	60	170.507	3.854
14	27037	Pueblo Nuevo	-92.879	17.854	60	142.205	3.214
15	27042	Tapijulapa	-92.817	17.467	22	128.817	2.912
16	7217	Solosuchiapan	-93.029	17.428	60	183.081	4.138
17	27044	Teapa (dge)	-92.967	17.567	38	75.458	1.705
18	27045	Teapa (smn)	-92.95	17.55	50	24.146	0.546
19	27061	Puyacatengo	-92.92	17.513	86	115.671	2.614
20	27068	Campo Exp. Puyacatengo	-92.917	17.5	25	107.211	2.423
Total=						4424.416	100

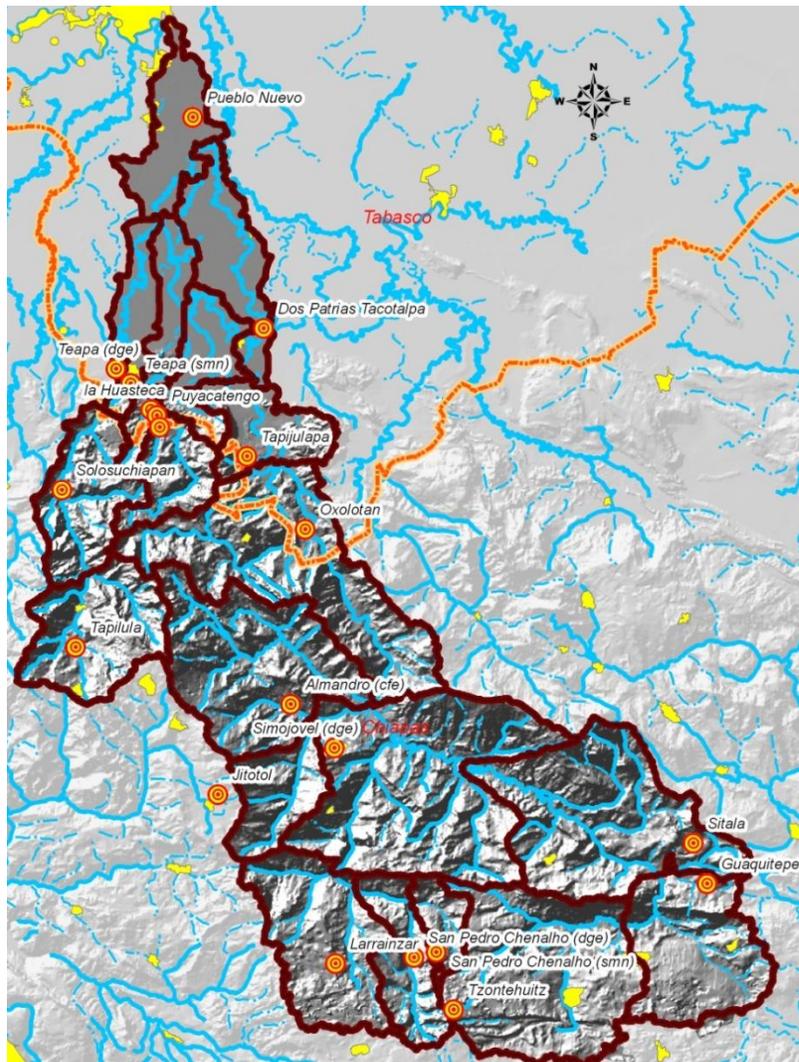


Figura 5.11. Área de influencia por estación

El área de influencia de la estación meteorológica 7160 Simojovel es la que mayor superficie representa con 558 Km² que representa el 12.63%, la estación con menor superficie de influencia corresponde a la meteorológica 27045 Teapa(SMN) con 24.14 km² que representa el 0.54%.

5.2.2.4. Clima. En el área de estudio, se definieron cinco subgrupos de climas, según Köpen modificado por García (1964), para los climas de México en los que podemos encontrar: semicálido del grupo C, semicálido del grupo A, templado con verano fresco largo y cálido.



De los climas que se encuentran en la cuenca, mapa 8 de anexos y el análisis de los diagramas, podemos generalizar las siguientes condiciones con respecto a temperatura y precipitación de la zona cuadro 5.5.

Cuadro 5.5. Climas predominantes en la cuenca

Tipo de clima	Descripción con respecto a temperatura	Descripción con respecto a la precipitación
Am(f)	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
A(f)	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.
(A)C(m)(f)	Semi-cálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Con precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
(A)C(fm)	Semi-cálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.
Aw2(x')	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
C(m)(f)	Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C.	Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

A. Precipitación: La precipitación media mensual y anual para cada estación, fue calculada utilizando todo el periodo de registro cuadro 5.6.



Cuadro 5.6. Precipitación media mensual y anual

No.	Clave	Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	7390	Tzontehuitz	2.7	4.5	10	41.9	168.9	433.3	317.2	445	466.2	262.6	40	9.5	2201.8
2	7033	San Pedro Chenalho (smn)	42.5	34.5	46	71.3	147.8	339.3	270.1	281.3	363.7	216.2	86	68.7	1967.4
3	7149	San Pedro Chenalho (dge)	37.8	36.6	30.1	48.6	109.4	279.8	218.2	263.6	291.4	167.3	66.2	47	1596
4	7071	Guaquitepec	84.2	64.5	65.3	78.5	139.9	279.2	180.7	229.8	325	229.2	125.4	98.5	1900.2
5	7207	Larrainzar	68.8	58.5	43.4	70.5	133.6	248.2	201.1	248.7	315.4	184.1	95.2	69.8	1737.3
6	7355	Jitotol	44.9	44.5	26.7	39.9	121.4	262.6	210.7	238.6	270.4	155.5	97.3	80.2	1592.7
7	7389	Sitala	127.8	54.3	85.1	78.9	138.1	253.6	194.3	216.9	310.7	276.6	113.6	159.8	2009.7
8	7160	Simojovel (dge)	59.9	61.2	34.3	49	127.4	314.1	230.8	299.3	341.2	201.8	116.4	80.1	1915.5
9	7005	Almandro (cfe)	53.3	38.1	30	47.3	123.4	245	201.8	246	282.1	177.3	91.9	67	1603.2
10	7167	Tapilula	189	167.4	97.5	105.1	161.6	331.5	275.6	318.4	417.2	391.4	259.7	209.3	2923.7
11	27070	Oxolotán	235.8	200.7	139	139.3	201.3	393.8	252.4	303	482.3	463.6	314.1	278.8	3404.1
12	27024	La Huasteca	140.5	161.2	82.7	77.9	99.3	305.2	247.1	349.1	391.9	386.2	279.9	206.2	2727.2
13	27011	Dos Patrias Tacotalpa	187.8	145.3	103.7	96.5	152.9	307.9	291	350.8	482	414.4	259.4	208.6	3000.3
14	27037	Pueblo Nuevo	134.5	82.1	59.7	47.3	97.6	238.9	192.1	240	348.5	303.4	182.3	134	2060.4
15	27042	Tapijulapa	259.4	206.4	142.9	149.2	197.5	355.4	276.8	359.7	526.9	503.7	321.3	258.9	3558.1
16	7217	Solosuchiapan	344.7	356.2	190.8	204.8	197	499.2	448.3	557.1	699.9	743.2	483.1	413.3	5137.6
17	27044	Teapa (dge)	261.4	206.7	120.1	111.4	153.2	363.6	295.5	394.9	538.3	470.4	287	273.2	3475.7
18	27045	Teapa (smn)	297	250.6	157	128.9	172	367.9	337.8	448.1	599.9	480	339.9	322.3	3901.4
19	27061	Puyacatengo	268.4	255	136.4	143.4	180.2	417	279.1	438.9	584.7	497.7	369.6	323.7	3894.1
20	27068	Campo Exp. Puyacatengo	305.5	253.2	165.3	133.6	187.5	379.9	284.5	390.6	584.3	528.5	389.4	342.6	3944.9

De las estaciones, la que mayor precipitación mensual y anual presenta es 7217 Solosuchiapan con una precipitación anual de 5137.6 mm, la que menor precipitación anual presenta es 7355 Jitotol con 1592.7 mm, cuadro 5.6.

La temporada de lluvias, se presenta en los meses de junio, septiembre y octubre, en el resto del año hay una disminución de la precipitación siendo los meses más secos de marzo, abril y mayo. Existen una sequía intraestival en el mes de julio, afectado a los cultivos de la zona, principalmente en las zonas bajas, cuadro 5.6.

Se generó a partir de la precipitación anual, un mapa de isoyetas, la distribución de la precipitación en la cuenca, a pesar de que en la parte de aguas arriba, se tiene el efecto orográfico, las precipitaciones más altas se tiene en la parte baja, esto quizá es debido a



la acción de los ciclones que entran del golfo de México, provocando que las corrientes torrenciales, se descarguen en las partes bajas.

La precipitación en la zona varía de 1550 a 5200 mm al generar los intervalos a cada 500 mm, debido a la interpolación, genera las curvas con valores menores y mayores a la registrada, el método de interpolación que se utilizó, es la interpolación Spline, Díaz et al. (2008), recomienda que es una interpolación aceptada cuando se trabaja con puntos de variables climáticas, ver mapa 12 en el anexo.

Cuadro 5.7. Superficie ocupada por isoyetas

Precipitación media anual (mm)	Área (m ²)	Área (Ha)	Área (Km ²)	Superficie (%)
4900-5200	396,912,981.01	39,691.30	396.91	8.97
4400-4900	114,416,118.84	11,441.61	114.42	2.59
3900-4400	169,314,772.87	16,931.48	169.31	3.83
3400-3900	476,897,795.25	47,689.78	476.90	10.78
2900-3400	822,327,452.27	82,232.75	822.33	18.59
2400-2900	669,091,811.34	66,909.18	669.09	15.12
1900-2400	938,461,415.98	93,846.14	938.46	21.21
1550-1900	837,159,684.43	83,715.97	837.16	18.92
Total=	4,424,582,032.00	442,458.20	4,424.58	100.00

La mayor superficie ocupada por el rango de precipitación es 1900-2400 mm con aproximadamente el 21.21 %, abarcando una extensión de 938.46 km² y el rango de precipitación que menos aparece es de 4400-4900 mm, con aproximadamente 2.59% de la superficie total equivalente a 114.42 km². Comparada la zona, con la media nacional, se puede decir que está por arriba de los 750 mm, no se calculó la precipitación media general, ponderada por áreas entre isoyetas.

B. Temperatura: La temperatura mensual y anual para cada estación, se presenta en el cuadro 5.8.



Cuadro 5.8. Temperatura mensual y anual

NO.	Clave	Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	7390	Tzontehuitz	16.2	16.4	19.8	22.2	23.4	22.9	21.9	21.6	21.9	21	19.6	17.2	20.3
2	7033	San Pedro Chenalho (smn)	14	14.1	15.3	16.4	17.1	17	16.7	16.9	16.6	15.5	14.6	14	15.7
3	7149	San Pedro Chenalho (dge)	12.6	13.7	15.3	17.7	18.5	17.9	17.4	17.2	17.4	16.3	14.8	13.2	16
4	7071	Guaquitepec	16.4	17.1	18.8	20.8	21.9	21.7	21.3	21.3	21	19.9	18.8	17.5	19.7
5	7207	Larrainzar	12.1	12.7	14.6	16	17.2	17.3	17.2	16.2	15.4	14.9	14.3	13.1	15.1
6	7355	Jitotol	11.7	12.3	12.7	13.8	14.2	14.1	13.4	14.2	13.6	13.1	12.6	12.4	13.2
7	7389	Sitala	15.9	16.2	16.5	17.1	18.4	20.2	19.9	19.4	19.7	19.1	17.5	16	18
8	7160	Simojovel (dge)	18.3	18.8	20.6	22.1	22.4	21.6	21.5	21.1	20.8	20.4	19.6	18.3	20.5
9	7005	Aljandro (cfe)	17.4	17.6	19	21.6	23.5	24.2	22.9	22.8	22.9	21.9	19.9	18.4	21
10	7167	Tapilula	17.5	17.8	20.1	22.2	23.1	22.9	22.2	21.8	21.8	20.9	19.4	18.1	20.7
11	27070	Oxolotan	19.3	19.9	21.4	23.5	24.8	24.8	24.1	24.1	23.9	23	21.6	20.1	22.5
12	27024	la Huasteca	19.6	20.1	22.3	24.1	25.9	25.9	25.2	25	24.8	23.9	22.2	20.7	23.3
13	27011	Dos Patrias Tacotalpa	19.3	19.7	21.7	23.7	25	24.9	24.2	23.9	23.8	22.9	21.3	19.9	22.5
14	27037	Pueblo Nuevo	19.5	19.8	21.7	23.8	25.3	25.5	24.9	24.8	24.5	23.5	21.7	20.2	22.9
15	27042	Tapijulapa	19.8	20.2	22.1	24.1	25.6	25.6	24.7	24.6	24.5	23.6	22	20.4	23.1
16	7217	Solosuchiapan	18.5	18.8	21.1	23	24.9	24.7	23.9	23.7	23.4	22.5	20.9	19.2	22.1
17	27044	Teapa (dge)	19.5	20	21.9	24.2	25.6	25.6	24.9	24.7	24.5	23.5	21.7	20.2	23
18	27045	Teapa (smn)	20.2	20.8	22.4	24.1	25.4	25.1	24.5	24.5	24.4	23.6	22	20.7	23.1
19	27061	Puyacatengo	19.9	19.7	20.7	23.1	24.5	24.3	23.4	23.7	24.2	23.1	22	20	22.4
20	27068	Campo Exp. Puyacatengo	19.3	19.8	21.3	23.7	25.2	25.3	24.5	24.2	24.1	23.1	21.8	20.1	22.7

La temperatura mínima reportada, se presenta en la estación 7355 Jitotol, con 11.7°C en el mes de diciembre, y la temperatura más alta en la estación 27024 La Huasteca con 25.9°C, en el mes de mayo.

La temperatura más alta se presenta en los meses de abril a junio y la más baja de noviembre a enero, con una oscilación térmica de aproximadamente 14.2°C.

Las isotermas de temperatura media anual, se elaboraron a partir de la interpolación spline, y se calcularon las áreas entre cada isoterma, podemos ver que la variación de la temperatura en la cuenca va desde los 10 hasta los 24°C. La temperatura predominante en la zona es de los 23-24°C cubriendo una superficie de 32.12% equivalente a 1421.19 km². Y la temperatura con menor superficie reportada es de 13-14°C con el 4.02% de la superficie total siendo 178.05 km², cuadro 5.9.



Cuadro 5.9. Superficie ocupada para cada temperatura media anual

Temperatura media anual(°C)	Área (m ²)	Área (Ha)	Área (Km ²)	Superficie (%)
23-24	1,421,186,042.06	142,118.60	1,421.19	32.12
22-23	257,409,100.66	25,740.91	257.41	5.82
21-22	684,991,718.66	68,499.17	684.99	15.48
20-21	268,982,278.69	26,898.23	268.98	6.08
19-20	245,330,266.62	24,533.03	245.33	5.54
18-19	253,751,599.41	25,375.16	253.75	5.74
17-18	280,738,507.42	28,073.85	280.74	6.34
16-17	287,620,188.14	28,762.02	287.62	6.50
15-16	276,487,353.64	27,648.74	276.49	6.25
14-15	270,039,089.79	27,003.91	270.04	6.10
13-14	178,045,886.93	17,804.59	178.05	4.02
Total=	4,424,582,032.00	442,458.20	4,424.58	100.00

Si se analiza la temperatura con respecto a la altura del terreno, hacia las partes altas, pegadas a la sierra en dirección noreste la temperatura va de los 10°C hacia la parte baja con 24°C, presentándose una mayor temperatura en las partes bajas de la cuenca, mapa 9 de anexos.

C. Evaporación: La evaporación mensual y anual de la cuenca, se presenta en el cuadro 5.10, donde se aprecia que el valor más bajo de evaporación es de 762.9 mm anuales reportada en la estación 7160 Simojovel (dge) y el valor más alto en la estación 7390 Tzontehuitz con 1645.3 mm.

La evaporación más alta se presentan en los meses de abril y mayo, con aproximadamente 133 mm al mes. Los valores más bajos se dan de noviembre a enero con 67 mm.



Cuadro 5.10. Evaporación media mensual y anual en mm

No.	Clave	Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	7390	Tzontehuitz	109.1	139.7	200	220.5	187.7	143.7	138.1	140	119	95.3	79.9	72.3	1645.3
2	7033	San Pedro Chenalho (smn)	66.3	79.4	126.6	135.3	138.3	97.1	111.1	112.4	91.7	76.9	66.5	62.5	1164.1
3	7149	San Pedro Chenalho (dge)	65.1	71.6	109.9	122	120.3	89.5	102.4	103.2	85.8	77.6	66.8	64.3	1078.5
4	7071	Guaquitepec	91.7	102.3	129.6	143	146.1	135	141	138.8	128.2	116.3	89.4	88.1	1449.5
5	7207	Larrainzar	75.5	84.3	107.4	107.3	106.5	86.3	93.6	91.7	85.5	76.6	70.4	68.6	1053.7
6	7355	Jitotol	105.1	99.5	121	117.9	120.8	112.4	113.2	120.4	104.5	112.1	107.1	108.4	1342.4
7	7389	Sitala	100.4	92.1	118.7	119.6	132.3	134.7	145.8	134.7	120.7	145.6	92.1	87.8	1424.5
8	7160	Simojovel (dge)	51.6	54.7	68.3	73.8	78.5	66.9	70.4	69.2	62.9	62.4	52.6	51.6	762.9
9	7005	Almandro (cfe)	81.5	92.5	144.3	159.1	161	127.3	127.2	123.7	106.4	95	78.6	74.6	1371.2
10	7167	Tapilula	49.3	50.8	86.1	99.9	113.2	90.7	93.5	87.6	78.2	66	53.3	47.5	916.1
11	27070	Oxolotan	58.3	62.8	105	118.4	148.4	118.7	127	122.1	104.8	89.2	69.1	57.4	1181.2
12	27024	la Huasteca	60.2	58.5	106.2	122.8	141.1	122.6	129.1	125.7	108.6	89.3	65.5	60.1	1189.7
13	27011	Dos Patrias Tacotalpa	60.9	65.2	102.3	117.8	136.1	121	118.4	120.2	100.7	86	67.9	62.3	1158.8
14	27037	Pueblo Nuevo	62.2	70.9	109.9	128.5	144.1	127.5	130.8	126.6	101.5	89	70.3	61.1	1222.4
15	27042	Tapijulapa	56.3	60.8	99.8	116.5	134.5	111.9	111.4	108.4	91.4	80.5	64.2	55.7	1091.4
16	7217	Solosuchiapan	51.1	50.2	90.5	102.8	128.7	97.4	102.8	99.9	86.9	76.3	58	48.4	993
17	27044	Teapa (dge)	47.6	53.7	93.4	121.1	147.6	125.3	116.3	110.5	87.5	73.1	57.3	50.9	1084.3
18	27045	Teapa (smn)	35.8	40.3	123	168.9	189.9	94.1	87.4	83	65.7	54.9	43	38.2	1024.3
19	27061	Puyacatengo	67.1	87.5	119.8	114.6	166.9	176.2	145.6	145.2	106.9	92.5	71.1	70.5	1363.9
20	27068	Campo Exp. Puyacatengo	64.7	68.9	110.2	127.7	141.6	118.8	120.8	120.7	97.7	83.8	71.1	62.1	1188.1

Para elaborar los mapas de evaporación en el área de estudio, se repartió la superficie que le corresponde a cada de curva de igual valor, cuadro 5.11, el rango de evaporación en la zona es de 700-1700 mm, pero si distribuimos e interpolamos los datos anuales, la mayor área de evaporación en la cuenca es de 700-800 mm con una superficie de 653.72 km² que equivale a un 14.77% del total, la menor área de evaporación en la cuenca con el rango de 1500-1600 mm con aproximadamente 289.48 km² que corresponde al 6.54% del total de área, mapa 10 de anexos.

Cuadro 5.11. Superficie ocupada para cada intervalo de evaporación media anual

Evaporación media anual (mm)	Área (m ²)	Área (Ha)	Área (Km ²)	Superficie (%)
1600-1700	485,463,074.79	48,546.31	485.46	10.97
1500-1600	289,484,419.34	28,948.44	289.48	6.54
1400-1500	501,902,351.89	50,190.24	501.90	11.34
1300-1400	413,981,452.28	41,398.15	413.98	9.36
1200-1300	390,517,394.96	39,051.74	390.52	8.83
1100-1200	391,291,851.55	39,129.19	391.29	8.84
1000-1100	426,669,497.68	42,666.95	426.67	9.64
900-1000	436,872,958.99	43,687.30	436.87	9.87
800-900	434,678,577.44	43,467.86	434.68	9.82
700-800	653,720,453.09	65,372.05	653.72	14.77
Total=	4,424,582,032.00	442,458.20	4,424.58	100.00

D. Evapotranspiración: La superficie con el rango de evapotranspiración más alto en la cuenca es de 1200-1300 mm, con aproximadamente 16.83% de la superficie total, que corresponde a 744.87 km² y la menor cantidad es del rango de 1000-1100 mm con 6.96% de área total que equivale a 307.78 km², cuadro 5.12. Los rangos de variación en la zona son de 1000 a 1700 mm anuales, mapa 14 de anexos.

Cuadro 5.12. Superficie ocupada para cada intervalo de evapotranspiración media anual

Evapotranspiración media anual (mm)	Área (m ²)	Área (Ha)	Área (Km ²)	Superficie (%)
1700-1800	528,610,213.36	52,861.02	528.61	11.95
1600-1700	517,873,052.76	51,787.31	517.87	11.70
1500-1600	454,653,404.94	45,465.34	454.65	10.28
1400-1500	740,936,252.14	74,093.63	740.94	16.75
1300-1400	720,673,653.37	72,067.37	720.67	16.29
1200-1300	744,866,389.24	74,486.64	744.87	16.83
1100-1200	409,193,818.40	40,919.38	409.19	9.25
1000-1100	307,775,247.80	30,777.52	307.78	6.96
Total=	4,424,582,032.00	442,458.20	4,424.58	100.00



E. Cobertura nubosa: La nubosidad en las estaciones, se refiere a la porción cubierta por nubes en el cielo, de las estaciones analizadas, la que mayor días nublados presenta es 27045 Teapa (SMN) con 91 días, principalmente en los meses de julio a septiembre. En la estación 7217 Solosuchiapan con 89 días nublados de los meses de septiembre a noviembre.

F. Tormenta: La estación 27042 Tapijulapa, presenta el mayor número de días con tormenta con 31 en el mes de Agosto, seguida de la estación 7005 Almandro con 26 días en junio, 7033 San Pedro Chenalho (SMN) con 23 días en septiembre, de las estaciones analizadas, la que no reporta tormenta eléctrica es Jitotol y Puyacatengo, 7207 Larraínzar reporta 1 día.

G. Granizo: La estación 27045 Teapa (SMN) es la que presenta el mayor número de días con granizo, con aproximadamente 69 días al año, seguida de la estación 7005 Almandro (CFE) con 60 días, la estación 7390 Tzontehuitz, con 57 días al año, estas se originan en el periodo de agosto a diciembre.

5.2.2.5. Geología. El mapa de geología que se utilizó para el estudio es de INEGI elaborada en el año 2005, en donde se presentan las siguientes estructuras geológicas y la superficie que abarca en la cuenca cuadro 5.13.

Como elementos estructurales por su formación, se desarrolla un sinclinal, que tiene orígenes desde Ocosingo hasta Amatán en dirección sureste a noroeste, a todo lo largo de la cuenca del río la sierra.

El anticlinal, se localiza desde Yoshib, hasta Simojovel, localizado de sureste a noroeste paralela al sinclinal en la parte inferior.

Cuadro 5.13. Superficies de estructuras geológicas

Tipo	Clave	Clase	Área (km ²)	Superficie (%)
Caliza	Ki(cz)	Sedimentaria	39.31	0.89
Caliza	Ks(cz)	Sedimentaria	669.35	15.09
Ígnea extrusiva intermedia	Q(lgei)	Ígnea extrusiva	23.32	0.53
Suelo	Q(s)	Suelo	439.90	9.92
Limolita-Arenisca	Te(lm-ar)	Sedimentaria	377.12	8.50
Lutita-Arenisca	Te(lu-ar)	Sedimentaria	254.60	5.74
Arenisca	Tm(ar)	Sedimentaria	270.59	6.10
Caliza	To(cz)	Sedimentaria	1,135.60	25.61
Lutita-Arenisca	To(lu-ar)	Sedimentaria	495.33	11.17
Caliza	Tpal(cz)	Sedimentaria	91.70	2.07
Lutita-Arenisca	Tpal(lu-ar)	Sedimentaria	562.40	12.68
Ígnea extrusiva básica	Ts(lgei)	Ígnea extrusiva	75.79	1.71
Total=			4,424.66	100.00

La mayor afloración geológica corresponde al tipo caliza, que pertenece a la clase sedimentaria y con formación en el periodo cenozoico, pero del mioceno con el 25.61%, como segundo lugar por su superficie es la caliza sedimentaria pero con formación en el cretácico superior con el 15.09%, la superficie con menor porcentaje es del tipo Ígnea extrusiva intermedia con 0.53%.

5.2.2.6. Edafología. La caracterización edafológica de la cuenca fue realizada tomando como base el esquema de clasificación FAO (1975) y la información en las cartas edafológicas escala 1:50,000 de INEGI, identificándose dieciséis unidades de suelo cuadro 5.14, mapa 6 en anexos referente a edafología en los que podemos encontrar: Acrisol húmico, Acrisol ortico, Acrisol Plintico, Feozem haplico, Fluvisol calcáreo, Fluvisol eutrico, Fluvisol gleyico, Gleysol cálcico, Gleysol eutrico, Gleysol mólico, Gleysol vertico, Litosol, Luvisol albico, Luvisol crómico, Luvisol ortico, Rendzina.



Cuadro 5.14. Superficie ocupada por cada tipo de suelo

No.	Tipo de suelo	Clave	Área (km ²)	Superficie (%)
1	Rendzina	E	473.74	10.71
2	Luvisol ortico	Lo	280.86	6.35
3	Luvisol crómico	Lc	1,529.93	34.58
4	Luvisol albico	La	20.52	0.46
5	Litosol	I	208.23	4.71
6	Gleysol vertico	Gv	25.58	0.58
7	Gleysol molico	Gm	41.51	0.94
8	Gleysol eutrico	Ge	250.32	5.66
9	Gleysol calcico	Gc	16.34	0.37
10	Fluvisol gleyico	Jg	124.37	2.81
11	Fluvisol eutrico	Je	23.51	0.53
12	Fluvisol calcarico	Jc	0.06	0.001
13	Feozem haplico	Hh	409	9.24
14	Acrisol plintico	Ap	85.51	1.93
15	Acrisol ortico	Ao	162.75	3.68
16	Acrisol húmico	Ah	770.06	17.4
	Total=		4,424.66	100

La mayor superficie la presenta el tipo de suelo Luvisol crómico (Lc) con el 34.58% del área total de la cuenca, seguida del Acrisol húmico (Ah) con el 17.40% del total, el suelo que menor superficie abarca en la cuenca es el Fluvisol calcarico (Jc) con el 0.001%.

5.2.2.7. Uso de suelo y vegetación. Para caracterizar el uso de suelo de la cuenca, se realizó una clasificación semi- supervisada en base a imágenes del satélite Landsat ETM+ del año 2002. La clasificación se realizó apoyándose con el programa Idrisi Selva, así como el mapa de uso del suelo y vegetación del INEGI serie II elaborada en el año 1990, cuadro 5.15.

Cuadro 5.15. Superficie de uso de suelo y vegetación

No.	Comunidad	Clave	Área (km ²)	Superficie (%)
1	Pastizal cultivado	C	1,335.77	30.19
2	Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes	TP	411.98	9.31
3	Agricultura de temporal con cultivos anuales	TA	587.49	13.28
4	Bosque de pino	P	44.64	1.01
5	Bosque de pino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	P	142.82	3.23
6	Bosque de pino-encino (incluye encino-pino)	PQ	75.41	1.7
7	Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con vegetación secundaria	PQ	135.9	3.07
8	Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	Q	8.42	0.19
9	Bosque mesófilo de montaña	M	490.39	11.08
10	Bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	M	496.31	11.22
11	Selva alta y mediana perennifolia	AMp	274.76	6.21
12	Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	AMp	365.61	8.26
13	Selva baja perennifolia	Bp	3.33	0.08
14	Selva baja perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	Bp	4.87	0.11
15	Pastizal inducido	I	12.54	0.28
16	Popal-Tular	PT	27.75	0.63
17	Asentamiento humano		5.73	0.13
18	Cuerpo de agua		1.43	0.03
Total=			4,426.66	100

El principal uso de suelo que se presenta en la cuenca con el 30.19% corresponde a pastizal cultivado en la parte baja de la cuenca y en las zonas cercanas a los ríos, el segundo lugar con el 13.28% que corresponde a la agricultura de temporal con cultivos anuales en la parte alta de la cuenca, producto del cambio de uso de suelo de bosque ha agrícola. Con el 0.11% cubierto por selva baja perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, superficie reducida por la tala inmoderada de la zona y el cambio de selva a agricultura de temporal, mapa 7 en anexos.



5.2.3. Análisis hidrometeorológico

Con la finalidad de analizar la relación entre la precipitación y los escurrimientos, para las avenidas correspondientes, ambos registrados en las cuencas alta y media del río de la Sierra y en la cuenca del río Teapa, se realizó un estudio de análisis hidrometeorológico de las mismas.

El análisis hidrometeorológico consistió en: la ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas existentes en las cuencas de estudio; el estudio temporal y espacial específicos de la precipitación y los escurrimientos históricos correspondientes; y finalmente la relación sincrónica precipitación-escurrimiento, considerando sistemas de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH).

Se elaboró un inventario de estaciones meteorológicas e hidrométricas convencionales, localizadas en los estados de Chiapas y Tabasco, específicamente en la cuenca del río Grijalva; posteriormente se definieron las que se ubican dentro de la cuenca del río La Sierra y de la cuenca del río Teapa.

5.2.3.1. Estaciones meteorológicas consideradas. Las estaciones meteorológicas se localizaron a partir de una revisión en las instituciones, con base en la información de diferentes fuentes, como son las bases de datos climatológicos del ERIC III, IMTA, del Servicio Meteorológico Nacional y del Organismo de Cuenca Frontera Sur, (OCFS), de la CONAGUA. Se definieron las estaciones meteorológicas localizadas en las cuencas alta y media del río La Sierra y en la del río Teapa, con las que se realizó un estudio meteorológico. Para cada estación se registró la información siguiente: cuenca, río, subcuenca, entidad, organismo operador, identificación (clave y nombre), georeferenciación (altitud, longitud y latitud) y situación operativa, cuadro 5.16.



Cuadro 5.16. Estaciones meteorológicas ubicadas en las cuencas del río La Sierra y del río Teapa

NO.	CUENCA	RÍO	SUBCUENCA	ENTIDAD	ORGANISMO	CLAVE	NOMBRE	ALTITUD	LONGITUD	LATITUD	SITUACIÓN
1	Lacantun	La Sierra	Media	Chiapas	CFE	7005	Almandro (CFE)	565	-92.77	17.18	Suspendida
2	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-SMN	7033	San Pedro Chenalho (SMN)	1600	-92.60	16.90	Suspendida
3	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Alta	Chiapas	CNA-DGE	7071	Guaquitepec	1040	-92.29	17.15	Operando
4	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-DGE	7149	San Pedro Chenalho (DGE)	1480	-92.63	16.89	Operando
5	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-DGE	7160	Simojovel (DGE)	700	-92.72	17.13	Operando
6	Grijalva-Villahermosa	Teapa		Chiapas	CNA-DGE	7167	Tapilula	780	-93.01	17.25	Operando
7	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-DGE	7186	Finca El Escalón	680	-92.83	17.35	Suspendida
8	Grijalva-Tuxtla	Teapa		Chiapas	CFE	7194	Rayón (CFE)	1340	-93.00	17.20	Suspendida
9	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-SMN	7198	Simojovel (SMN)	700	-92.72	17.14	Suspendida
10	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-DGE	7207	Larrainzar	1930	-92.72	16.89	Operando
11	Grijalva-Villahermosa	Teapa		Chiapas	CNA-SMN	7217	Solosuchiapa	60	-93.03	17.43	Suspendida
12	Lacantun	La Sierra	Alta	Chiapas	CFE	7324	Chacte (CFE)	1140	-92.33	16.93	Suspendida
13	Grijalva-Tuxtla	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-DGE	7355	Jitotol	1700	-92.85	17.08	Operando
14	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Media	Chiapas	CNA-SMN	7357	El Bosque	1060	-92.72	17.05	Suspendida
15	Grijalva-Tuxtla	La Sierra	Alta	Chiapas	CNA-DGE	7373	Tzontehuitz	2800	-92.58	16.83	Operando
16	Grijalva-Villahermosa	La Sierra	Alta	Chiapas	CNA-DGE	7389	Sitala	760	-92.31	17.17	Operando
17	Grijalva-Villahermosa	Teapa	Baja	Chiapas	CNA-DGE	7390	Tzontehuitz	760	-92.58	16.83	Operando
18	Grijalva-Villahermosa	Teapa	Baja	Tabasco	CNA-DGE	27011	Dos Patrias Tacotalpa	60	-92.80	17.61	Operando
19	Grijalva-Villahermosa	Teapa		Tabasco	CNA-SMN	27024	La Huasteca	108	-92.93	17.52	Operando
20	Grijalva-Villahermosa	Teapa	Baja	Tabasco	CNA-DGE	27037	Pueblo Nuevo	60	-92.88	17.85	Operando
21	Usumacinta	La Sierra	Media	Tabasco	CNA-DGE	27042	Tapijulapa	22	-92.82	17.47	Operando
22	Usumacinta	Teapa		Tabasco	CNA-DGE	27044	Teapa (DGE)	38	-92.97	17.57	Operando
23	Usumacinta	Teapa		Tabasco	CNA-DGE	27045	Teapa (SMN)	50	-92.97	17.57	Suspendida
24	Usumacinta	Teapa		Tabasco	CNA-DGE	27061	Puyacatengo	86	-92.92	17.51	Operando
25	Usumacinta	Teapa		Tabasco	CNA-DGE	27068	Campo Exp. Puyacatengo	25	-92.92	17.50	Operando
26	Usumacinta	La Sierra	Media	Tabasco	CNA-DGE	27070	Oxolotan	36	-92.75	17.38	Operando



5.2.3.2. Estaciones hidrométricas existentes. Se definieron las estaciones hidrométricas en las cuencas alta y media del río La Sierra y en la cuenca del río Teapa, con las que se realizó el estudio hidrométrico. Para cada estación se registró la información siguiente: cuenca, río, subcuenca, entidad, organismo operador, identificación (clave y nombre), georeferenciación (altitud, longitud y latitud) y situación operativa, cuadro 5.17.

Cuadro 5.17. Estaciones hidrométricas ubicadas en las cuencas del río La Sierra y del río Teapa

No.	CUENCA	RÍO	SUBCUENCA	ENTIDAD	ORGANISMO	CLAVE	NOMBRE	ALTURA	LONGITUD W (° Dec)	LATITUD N (° Dec)	SITUACIÓN
1	Grijalva	La Sierra	Alta	Chiapas	CNA	3022	Chacté	805	-92.333	16.933	Suspendida
2	Grijalva	La Sierra	Media	Chiapas	CFE	30135	Almandro	243	-92.663	17.183	Operando
3	Grijalva	La Sierra	Media	Tabasco	CNA	30111	Oxolotán	63	-92.750	17.280	Operando
4	Grijalva	La Sierra	Media	Chiapas	CNA	3028	San Pedro	235	-92.513	17.175	Suspendida
5	Grijalva	La Sierra	Media	Tabasco	CNA	30093	Tapijulapa	41	-92.817	17.467	Operando
6	Grijalva	Teapa		Tabasco	CNA-SMN	30031	Puyacatengo	29	-92.938	17.567	Operando
7	Grijalva	Teapa		Tabasco	CNA-SMN	30032	Teapa	31	-92.967	17.567	Operando
8	Grijalva	Teapa y Sierra	Baja	Tabasco	CNA-SMN	30016	Pueblo Nuevo	10	-92.928	17.854	Operando

Como se puede observar en el plano cuatro y seis en anexos correspondiente a las estaciones hidrométricas y las estaciones meteorológicas. Actualmente no cubren completamente toda el área de las subcuencas del río La Sierra. En el caso de la subcuenca alta presenta 4 estaciones meteorológicas, Tzontehuitz, Guaquitepec, Sitala y Chacté de las cuales esta última está suspendida. Así mismo, las estaciones en operación se concentran en áreas cercanas al parteaguas, faltando la parte sur de este en ser cubierto.



Por otro lado, una buena parte de la cuenca alta está descubierta de observación meteorológica. En cuanto a estaciones hidrométricas no se tiene una a la salida de la subcuenca alta, que registre los escurrimientos que ocurren en ella.

En el caso de la subcuenca media, tiene 11 estaciones de las cuales solo están operando 6 y 5 están suspendidas. La verificación de esta información se realizó posteriormente, mediante visitas de campo directamente en las estaciones.

5.2.3.3. Estudio temporal de la precipitación y los escurrimientos históricos.

Se colectó y revisó la información documental histórica de la precipitación diaria registrada en las estaciones meteorológicas y los gastos diarios registrados en las estaciones hidrométricas, definidas para realizar el estudio temporal y espacial específicos de la precipitación y los escurrimientos históricos correspondientes.

A. Análisis de la precipitación: Para realizar el estudio de la precipitación en las subcuencas se utilizaron los acervos meteorológicos publicados por la CONAGUA de las estaciones meteorológicas definidas en el cuadro 5.16.

Para cada una de las 26 estaciones relacionadas, se procesó la información diaria registrada en sus periodos de registro. En virtud de la gran cantidad de información que se procesó 365 datos por año por el número de años de registro para las 26 estaciones seleccionadas, la información se presenta en forma gráfica, como pluviogramas, para la precipitación diaria de cada una de las 26 estaciones consideradas. Este proceso se ejemplifica con la información de la estación meteorológica 27042 Tapijulapa, ya que presenta en su registro datos desde 1962 a 2007, presentando un número de años considerable de datos.

B. Precipitación máxima diaria de todo el registro, estación 27042 Tapijulapa:

Los datos de precipitación diarios por año, se agregaron en forma consecutiva de



todos los años, de tal manera que resultó una matriz de precipitación diaria de los años de que consta el registro histórico (365 o 366 días por el número de años de registro, en el caso de esta estación ejemplo, la matriz de 1962 a 2007 consta de 15,899 de los 16,801 datos que deberían ser, sin considerar los faltantes); esto permitió observar su comportamiento en todos los años de registro, cuadro 5.18.

Cuadro 5.18. Segmentos de la matriz de precipitación diaria, estación meteorológica 27042 Tapijulapa

No.	Año	Mes	Día	Precipitación (mm/día)
1	1964	1	1	1.8
2	1964	1	2	0
3	1964	1	3	0
4	1964	1	4	4
5	1964	1	5	3.3
6	1964	1	6	0
7	1964	1	7	0
8	1964	1	8	0
...
16683	2007	9	4	0
16684	2007	9	5	22.5
16685	2007	9	6	21
16686	2007	9	7	80
16687	2007	9	8	0
16688	2007	9	9	23.5
16689	2007	9	10	0
16690	2007	9	11	9
16691	2007	9	12	11.5
16692	2007	9	13	2
Estadísticos				
No.			15,899	
Media			9.82	
Mediana			0	
Desvest			23.30	
Max			343.9	
Min			0	

Con la matriz de la precipitación máxima diaria se elaboró el pluviograma de todo el registro, lo que permite visualizar su comportamiento en todos los años de registro, figura 5.12.

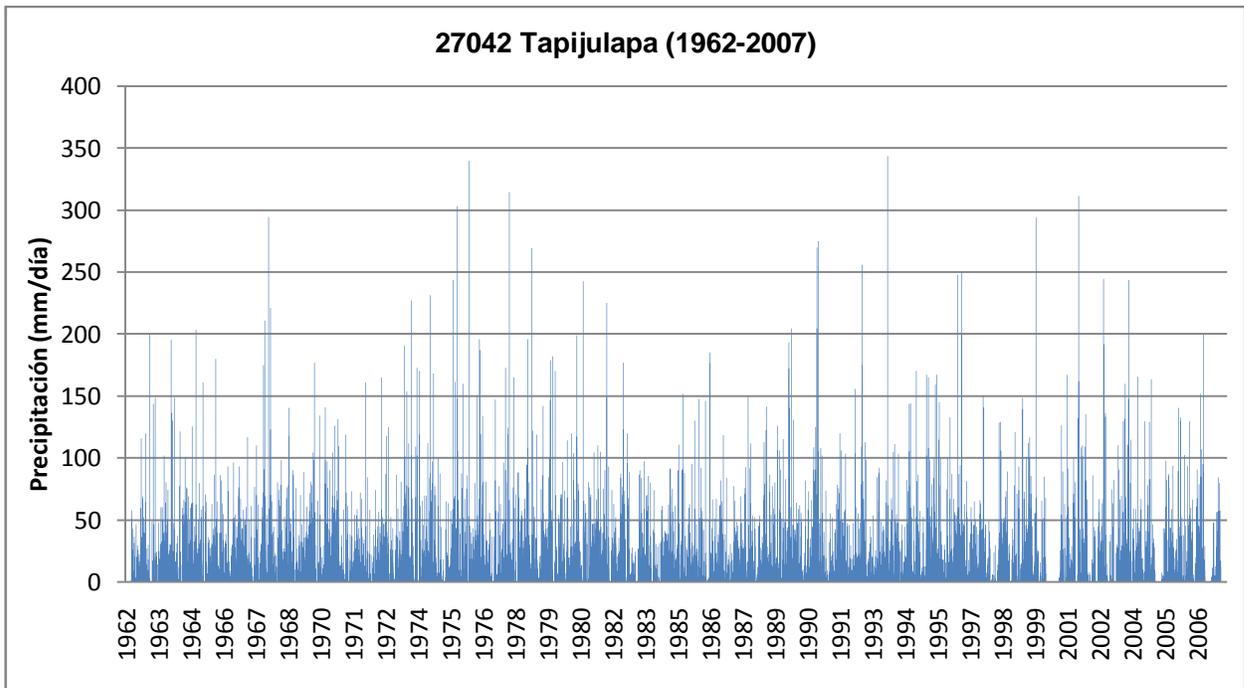


Figura 5.12. Precipitación diaria estación meteorológica 27042 Tapijulapa de 1962 a 2007

Como se puede observar, entre otras manifestaciones del registro, que aun cuando la precipitación media diaria del registro en esta estación, es de 9.82 mm/24 horas, se presentó un máximo extraordinario de 343.9 mm/24 horas, el 22 de octubre de 1993, lo que seguramente se reflejará en gastos y volúmenes en avenidas de gran magnitud. Esto indica la intensidad de precipitación máxima registrada en 24 horas, pero no indica cómo se distribuyó en esas 24 horas, para conocer las intensidades en mm/hora de los eventos que ocurrieron en ese día; para esto se requiere de registros pluviográficos continuos, que se pueden obtener en tiempo cuasi real con estaciones meteorológicas automáticas que registren esta variable.

C. Precipitación máxima diaria mensual y anual: Para obtener la precipitación máxima diaria en 24 horas y de ella sus parámetros estadísticos, a partir de la precipitación máxima diaria observada en cada año de registro de cada estación,



según se describió en el apartado anterior, se analizó toda la información diaria, se procesó para obtener la precipitación máxima en 24 horas que se presentó en el día, en cada mes y en cada año de registro de las 26 estaciones consideradas en el estudio.

En virtud del gran volumen de información, como ejemplo, se describe el proceso para la estación meteorológica 27042, Tapijulapa. A partir de precipitación máxima diaria observada en cada año de registro elaboró un resumen de la precipitación máxima diaria mensual y anual, así como sus parámetros estadísticos, con la finalidad de determinar su valor máximo máximo y la fecha en que se presentó el valor de la precipitación máxima diaria de todo el registro histórico, cuadro 5.19.

Cuadro 5.19. Precipitación máxima diaria mensual y anual, estación meteorológica 27042 Tapijulapa

Precipitación máxima diaria histórica (mm)															
Estación: 27042 Tapijulapa															
No	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pr Max diaria anual (mm)	FECHA
1	1962			12.0	58.2	37.3	47.0	26.2	116.2	69.3	120.4	27.4	200.6		
2	1963		144.0	149.0	24.9	48.2	60.5	60.5	102.2	80.7	74.4	195.5	130.4		
3	1964	149.2	37.5	77.7	122.0	66.6	101.1	76.5	69.6	63.6	126.1	45.4	203.9	203.9	05/12/1964
4	1965	80.0	58.5	161.3	71.0	65.0	36.6	63.0	43.2	86.7	180.4	20.0	86.5	180.4	02/10/1965
5	1966	63.8	33.3	39.3	93.4	27.8	96.4	52.7	54.3	93.7	67.6	58.5	50.5	96.4	27/06/1966
6	1967	117.3	49.7	16.5	61.9	77.1	110.7	62.9	31.2	174.9	211.1	54.4	294.7	294.7	22/12/1967
7	1968	221.6	65.4	23.6	80.7	74.3	78.7	98.7	52.8	76.4	140.9	52.2	90.3	221.6	12/01/1968
8	1969	86.8	76.2	38.2	70.2	46.8	88.7	61.2	46.4	81.1	104.6	177.3	29.7	177.3	19/11/1969
9	1970	134.8	54.4	20.2	29.8	141.4	97.5	90.6	104.8	126.5	73.8	131.4	19.3	141.4	03/05/1970
10	1971	38.2	58.8	119.2	61.8	38.4	73.6	54.4	58.9	43.8	72.4	67.4	34.6	119.2	07/03/1971
11	1972	161.2	84.8	58.5	22.3	38.7	74.4	57.3	58.8	165.4	48.0	118.1	125.6	165.4	05/09/1972
12	1973	52.6	43.7	3.4	86.6	59.4	81.4	48.8	191.3	154.3	111.8	227.6	102.5	227.6	28/11/1973
13	1974	29.3	173.1	2.7	170.7	65.8	69.7	69.9	112.6	231.5	97.6	168.6	25.2	231.5	19/09/1974
14	1975	100.0	87.8	44.8	9.5	65.2	63.8	57.4	58.9	244.1	303.3	105.6	51.9	303.3	29/10/1975
15	1976	160.1	67.3	75.8	86.4	340.0	40.0	43.6	150.8	54.2	196.0	134.2	81.0	340.0	01/05/1976
16	1977	81.0	33.5	56.0	37.3	37.3	147.3	56.4	77.7	47.5	96.7	173.3	125.0	173.3	10/11/1977
17	1978	314.7	35.2	165.4	70.9	88.8	65.3	57.4	67.5	95.3	196.0	80.7	269.7	314.7	02/01/1978
18	1979	122.4	119.1	17.9	20.9	86.1	142.1	49.9	47.9	146.8	182.3		170.3		



19	1980	54.4	48.1	71.1	97.1	73.9	114.6	45.2	120.0	104.1	199.1	117.7	43.3	199.1	30/10/1980
20	1981	14.1	242.8	63.3	80.7	76.4	46.7	104.6	51.3	110.7	105.1	45.0	75.8	242.8	11/02/1981
21	1982	90.2	225.3	36.5	74.3	63.0	52.5	23.1	36.1	87.7	177.0	63.0	120.2	225.3	06/02/1982
22	1983	89.1	28.3	17.4	24.7	27.1	90.7	84.4	97.6	69.9	85.9	80.9	36.9	97.6	30/08/1983
23	1984	74.6	31.0	28.9	31.6	61.6	36.5	41.8	39.2	92.1	91.7	57.0	61.6	92.1	25/09/1984
24	1985	90.7	111.1	90.6	152.3	88.3	46.7	63.4	95.7	30.1	130.5	46.7	148.1	152.3	13/04/1985
25	1986	92.5	42.3	146.6	2.6	185.6	66.9	33.3	51.3	67.3	62.6	82.0	118.8	185.6	28/05/1986
26	1987	38.4	84.1	31.1	23.7	77.8	65.9	48.7	29.6	69.5	34.7	92.9	150.5	150.5	29/12/1987
27	1988	92.1	112.1	54.2	52.4	12.6	53.8	37.1	112.8	122.8	141.6	87.1	77.8	141.6	03/10/1988
28	1989	59.9	80.8	126.6	106.6	91.2	115.6	83.1	44.1	193.5	204.8	131.1	42.7	204.8	19/10/1989
29	1990	64.3	62.2	56.1	10.5	82.3	58.4	73.7	66.4	108.9	125.2	270.0	275.4	275.4	04/12/1990
30	1991	108.4	56.0	73.8	9.9	32.2	55.3	52.2	42.7	78.5	76.2	120.1	51.1	120.1	01/11/1991
31	1992	103.7	47.6	46.1	29.9	47.9	156.0	60.5	55.7	256.5	175.2	113.1	19.2	256.5	29/09/1992
32	1993	31.6	45.3	53.8	25.7	84.7	92.3	49.1	45.1	43.1	343.9	62.1	67.9	343.9	22/10/1993
33	1994	105.1	111.3	54.8	103.9	46.6	34.1	44.8	82.8	143.6	144.4	61.6	33.6	144.4	09/10/1994
34	1995	170.3	86.6	57.8	52.9	13.0	167.7	165.5	98.9	84.5	160.0	167.6	145.5	170.3	04/01/1995
35	1996	100.0	18.6	30.4	100.1	22.7	133.3	87.5	56.7	248.2	87.5	250.0	200.1	250.0	25/11/1996
36	1997	63.2	81.6	32.2	60.6	49.2	65.5	50.9	41.0	66.5	150.4	141.1	31.0	150.4	27/10/1997
37	1998	49.5	41.0	6.3	29.9		129.0	129.5	51.5	69.0	89.5	50.5			
38	1999	43.1	121.0	71.3	93.5	14.4	149.0	73.2	101.4	112.5	117.3	45.5	56.0	149.0	13/06/1999
39	2000	294.5	26.0	16.0	66.0	85.5									
40	2001	26.0	126.7	63.3	167.4	92.2	23.0	29.5	100.0		311.5	109.0	110.5		
41	2002	109.5	135.7	8.5	8.5	86.5	45.0		67.5	41.0	64.0	245.0	136.5		
42	2003		38.5	75.0	83.0	30.5	110.5	67.0	130.0	160.5	69.0	244.0	115.0		
43	2004	43.0	59.5	59.0	166.0	47.0	67.5	130.0	41.5	129.5	83.5	164.0	35.5	166.0	12/04/2004
44	2005				8.0	43.5	98.0	87.5	76.0	94.0	28.2	35.0	141.0		
45	2006	133.0	52.7	103.0	46.0	94.0	130.0	67.0		61.0	91.0	152.0	107.2	152.0	16/11/2006
46	2007	200.0				12.5	48.5	56.5	84.7	80.0					
Estadísticos															
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL		
Años	42	43	44	45	45	45	44	44	44	44	43	43	36		
Promedio	101.3	77.6	58.1	64.1	67.7	82.8	65.4	74.2	108.2	130.8	113.3	104.5	196.1		
Desvest	65.8	50.2	42.8	44.7	53.2	37.1	28.1	34.9	58.0	70.8	67.1	70.8	67.9		
Mediana	90.5	59.5	54.5	61.8	63.0	73.6	59.0	62.7	89.9	114.6	105.6	90.3	178.9		
Max	314.7	242.8	165.4	170.7	340.0	167.7	165.5	191.3	256.5	343.9	270.0	294.7	343.9	22/10/1993	
Min	14.1	18.6	2.7	2.6	12.5	23.0	23.1	29.6	30.1	28.2	20.0	19.2	92.1		

Precipitación máxima diaria mensual y anual. Con la matriz de la precipitación máxima diaria mensual y anual, con la finalidad de visualizarla, se elaboró el pluviograma de cada mes, para todos los años de registro, figura 5.13.

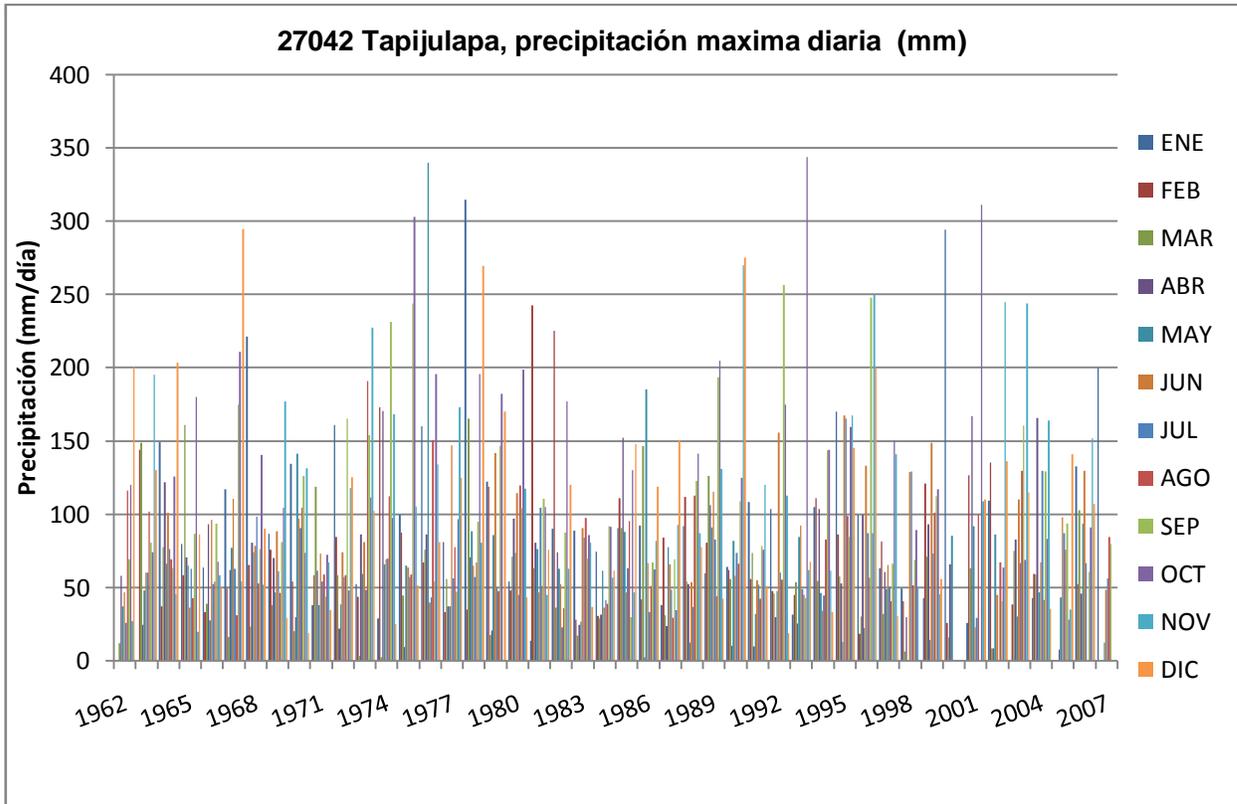


Figura 5.13. Precipitación máxima en 24 horas, por meses, en todo su registro histórico, estación meteorológica 27042 Tapijulapa

Como se puede observar, en el cuadro 5.19 y figura 5.12, en el registro de la estación meteorológica 27042, Tapijulapa con 36 años completos, la precipitación máxima en 24 horas fue de 343.9 mm y se registró el 22 de octubre 1993, la que representa una intensidad media máxima diaria de 14.33 mm/hora, esto sugiere que la intensidad de la precipitación, en mm/hora, en esa fecha pudo ser alta. Los parámetros estadísticos indican los valores que esta variable adquiere. Así mismo, en la figura 5.13, se pueden observar los valores de la precipitación máxima en 24 horas registrada en cada uno de los meses y el año de 1993 en el que se observó el máximo.

D. Precipitación media anual y máxima anual: Con la finalidad de evaluar la magnitud de la precipitación anual en las cuencas en estudio, se procesaron las



precipitaciones mensuales y anuales. Con los parámetros estadísticos, mensuales y anuales de todo el registro, se calcularon la precipitación media anual y la máxima anual, en cada una de las 26 estaciones meteorológicas consideradas.

E. Precipitación media anual: La información de precipitación mensual se obtuvo del ERIC III y de información complementaria proporcionada por el Organismo de Cuenca Frontera Sur (OCFS). Con esa información se calcularon las precipitaciones registradas en cada año. Se estimaron sus parámetros estadísticos mensuales y anuales, mapa 12 de anexos.

F. Precipitación máxima anual: De acuerdo a los parámetros estadísticos obtenidos se calculó la precipitación máxima anual observada en el periodo de registro mapa 13 en anexos.

G. Isoyetas de la precipitación máxima maximorum en 24 horas: Se presenta el mapa 11 de anexos de isoyetas de precipitaciones máximas máximum registradas en el periodo de registro de precipitación diaria de cada estación. La subcuenca alta del río La sierra registra un promedio de 125.4 mm, la subcuenca media de 217.9 mm y la del río Teapa de 316.2 mm en 24 horas, respectivamente, con una distribución ascendente del sureste al noroeste.

H. Isoyetas de precipitación media anual: Se presenta el mapa 12 de anexos de isoyetas de precipitaciones medias anuales en el periodo de registro de precipitación anual de cada estación. Como se puede observar, las precipitaciones medias anuales altas se presentan en las partes bajas de las cuencas. La subcuenca alta del río de La sierra registra un promedio de 1979.5 mm, la subcuenca media de 2187.1 mm y la del río Teapa de 3726.30 mm/año, respectivamente, con una distribución ascendente del sureste al noroeste.



I. Isojetas de precipitación máxima anual: Se presenta el mapa 7 en anexos de isoyetas de precipitaciones máximas anuales registradas en el periodo de registro de precipitación máxima anual de cada estación. Como se puede observar, las precipitaciones máximas anuales se presentan en las partes bajas de las cuencas. La subcuenca alta del río La Sierra registra un promedio de 2302.8 mm, la media de 3132.4 mm y la del río Teapa de 5065.9 mm/año, respectivamente, con una distribución ascendente del sureste al noroeste.

Del análisis de la precipitación en las cuencas alta y media del río La Sierra y del río Teapa se puede observar lo siguiente:

Algunos de los registros meteorológicos de las estaciones incluidas en el análisis, no presentan continuidad en su registro; algunos no están actualizados, otros están suspendidos, de tal forma que es corto el periodo en que son coincidentes dichos registros para todas las estaciones meteorológicas en las cuencas. Para contar con la mayor información posible, se utilizaron todos los valores de las variables de precipitación con que se contó en cada una de las estaciones consideradas en este análisis.

Las estaciones localizadas en las cuencas bajas son las que tienen registros más completos.

En cuanto a los valores de las variables de precipitación, máxima en 24 horas, media anual y máxima anual descritas, se puede inferir que:

Se observa un gradiente descendente, con sus valores menores en las partes altas de las cuencas hidrológicas en los estados de Chiapas y Tabasco con los mayores en las partes bajas, con variaciones, por supuesto, en el transecto, del noreste en las partes altas de las cuencas en el estado de Chiapas al noroeste en las partes bajas, principalmente en el estado de Tabasco.



La subcuenca alta del río La Sierra registra una intensidad máxima de 125.4 mm/24 horas, la media de 217.9 mm/24 horas y la del río Teapa de 316.2 mm/24 horas, respectivamente, con una distribución ascendente del sureste al noroeste lo que sugiere que las intensidades horarias pudieran ser de moderadas a fuertes, ya que en general la duración de las tormentas no es de 24 horas. Para tener información con mayor resolución se requiere información pluviográfica, que se registre digitalmente con estaciones automáticas a periodos de registro más cortos (horas o minutos).

Las precipitaciones medias y máximas anuales, siguen el mismo patrón, ya que varían en forma ascendente del sureste al noroeste, con medias anuales en la subcuenca alta de 1979.5 mm/año, en la media de 2187.1 mm/año en la cuenca del río de La sierra y la del río Teapa de 3726.3 mm/año, respectivamente. En el caso de las precipitaciones máximas se observan medias anuales en la subcuenca alta de 1979.5 mm/año, en la media de 2187.1 mm/año en la cuenca del río de La sierra y la del río Teapa de 3726.3 mm/año, respectivamente.

En la cuenca del río Teapa, se han registrado los valores más altos: 396.4 mm/24 horas, media anual de 4,986.6 mm/año y máximas anuales de 7,254.2 mm/año. Esto, se debe al impacto de los fenómenos ciclónicos que se presentan en el Golfo de México y que inciden en la llanura costera del estado de Tabasco.

También se observa, que la distribución de las estaciones meteorológicas convencionales no cubren completamente las cuencas, como se observa en la subcuenca alta del río La Sierra, donde su área noroeste no cuenta con estaciones meteorológicas y algunas de las que existían están suspendidas. Lo mismo se observa en las subcuencas media del río La Sierra y del río Teapa. En cuanto a su distribución, de acuerdo a la finalidad de alertamiento temprano, se deben tener estaciones en la parte alta de la cuenca que complementen a las existentes o nuevas que complementen la red, lo que permitirá tener mayor



anticipación, la presentación de eventos extremos, de acuerdo a los tiempos de concentración de los escurrimientos.

5.2.3.4. Análisis hidrométrico. Para el análisis hidrométrico se ubicaron las estaciones hidrométricas, que miden los escurrimientos y en los cauces principales, para realizar el estudio hidrométrico de las subcuencas alta y media de la cuenca del río La Sierra y en la cuenca del río Teapa, se utilizaron los acervos hidrométricos existentes, como los boletines hidrológicos y las bases de datos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) que posteriormente se llamó Sistema de Información de Aguas Superficiales (SIAS) y de información proporcionada por el Organismo de Cuencas Frontera Sur, de la CONAGUA. Se elaboró una relación de estaciones hidrométricas convencionales, ubicadas en las cuencas.

La información que se usó fue el gasto o caudal diario de todos los años de registro de ocho estaciones hidrométricas convencionales, cuadro 5.21.

A. Estaciones consideradas: Con el apoyo de los inventarios, se seleccionaron ocho estaciones hidrométricas existentes en las cuencas, así como sus registros históricos de información diaria.

Se seleccionaron las estaciones hidrométricas que registran escurrimientos a la salida de las subcuencas del río La Sierra y Teapa, que registran las avenidas que se generan de acuerdo de los registros de la precipitación en las estaciones meteorológicas que queden dentro de ellas. Esto es lo que se definió como sistemas hidrometeorológicos que son los que reflejan la respuesta de esas unidades hidrológicas, “cerradas” por las estaciones hidrométricas correspondientes, a los efectos de la precipitación.



B. Sistemas hidrométricos: De acuerdo a las consideraciones indicadas, se definieron tres sistemas hidrométricos, que cubren un área en las cuencas de 3864 km².

En la cuenca del río La Sierra: El sistema hidrológico de las subcuenca alta con el cierre de la estación hidrométrica convencional 30202 Chacté que registra las estaciones del río Chacté hasta ese punto, 30135 Almandro que registra los escurrimientos conjuntos de la subcuenca alta y la del río Plátanos de la subcuenca media, de un área 2,243 km².

El sistema hidrológico de la subcuenca media que considera las estaciones hidrométricas convencionales interiores: 30135 Almandro, y la 30028 San Pedro que registran los escurrimientos de la subcuenca alta y de los ríos Plátanos y San Pedro, respectivamente, la 30111 Oxolotán, que registra escurrimientos de las cuencas alta y media hasta este punto del río La Sierra, con una área de 2901 km² y la 30093 Tapijulapa que cierra la cuenca media y registra los escurrimientos de las dos subcuencas, alta y media del río La Sierra, en una área de 3219 km².

En el río Teapa:El sistema hidrológico del río Teapa, que considera la estación hidrométrica convencional 30032 Teapa, con área drenada de 476 km² y 30031 Puyacatengo que registran los escurrimientos de un área de 169 km² del río Teapa hasta esos puntos.

C. Análisis de la información hidrométrica histórica: De acuerdo a la relación de estaciones hidrométricas localizadas dentro de las cuencas en estudio, figura 5.5, se realizó el análisis temporal de los escurrimientos, (SRH, 1980).

D. Obtención de la información hidrométrica: Con la relación de las estaciones hidrométricas consideradas en las cuencas en estudio cuadro 5.17, se obtuvo la información diaria y mensual registrada en el sistema SIAS, complementada con



información proporcionada por el Organismo de Cuenca Frontera Sur (OCFS), de cada una de ellas.

E. Proceso: Para cada una de las estaciones relacionadas, se procesó la información diaria del gasto calculando sus parámetros estadísticos, media, desviación estándar, mediana y valores máximo y mínimo. Así se obtuvo el gasto máximo diario observado en cada año de registro de cada estación. Como ejemplo se describe el proceso para la estación hidrométrica 30111 Oxolotán.

F. Escurrimiento máximo diario en todo el registro, estación 30111 Oxolotán:

La información de gastos diarios por año extraída del SIAS, para los 365 o 366 días de cada año de registro, se procesó para elaborar matrices con vectores año, mes, día y gasto medio diario observado, para cada año de registro, dejando en blanco el valor cuando se marca como no disponible, para el caso de la estación 30111 Oxolotán, la matriz presenta datos desde 1965 a 1999, teniendo una matriz de datos de 12614 datos, que deberían de ser a partir de su fecha de inicio de toma de datos, sin embargo existen datos faltantes, teniendo 12,603 como datos observados para el procesamiento de los datos tal y como se presenta en el cuadro 5.20.

Cuadro 5.20. Segmentos de la matriz con información de gastos diarios, en la estación hidrométrica 30111 Oxolotán

No.	Año	Mes	Día	Gasto diario (m ³ /s)
1	1965	6	10	28.53
2	1965	6	11	29.50
3	1965	6	12	44.29
4	1965	6	13	37.07
5	1965	6	14	28.91
6	1965	6	15	25.90
...
12616	1999	12	24	60.59
12617	1999	12	25	86.68
12618	1999	12	26	113.88



12619	1999	12	27	122.34
12620	1999	12	28	77.56
12621	1999	12	29	61.36
12622	1999	12	30	53.60
12623	1999	12	31	47.71
Estadísticos				
No.		12,603.00		
Media		84.43		
Mediana		45.52		
Desvest		121.52		
Max		2,224.75		
Min		4.15		

Con las matrices elaboradas se dibujaron los hidrogramas diarios para cada año y para todos los años de registro, con la finalidad de visualizar el valor del gasto diario máximo observado, de todo el registro histórico de esa estación, figura 5.14.

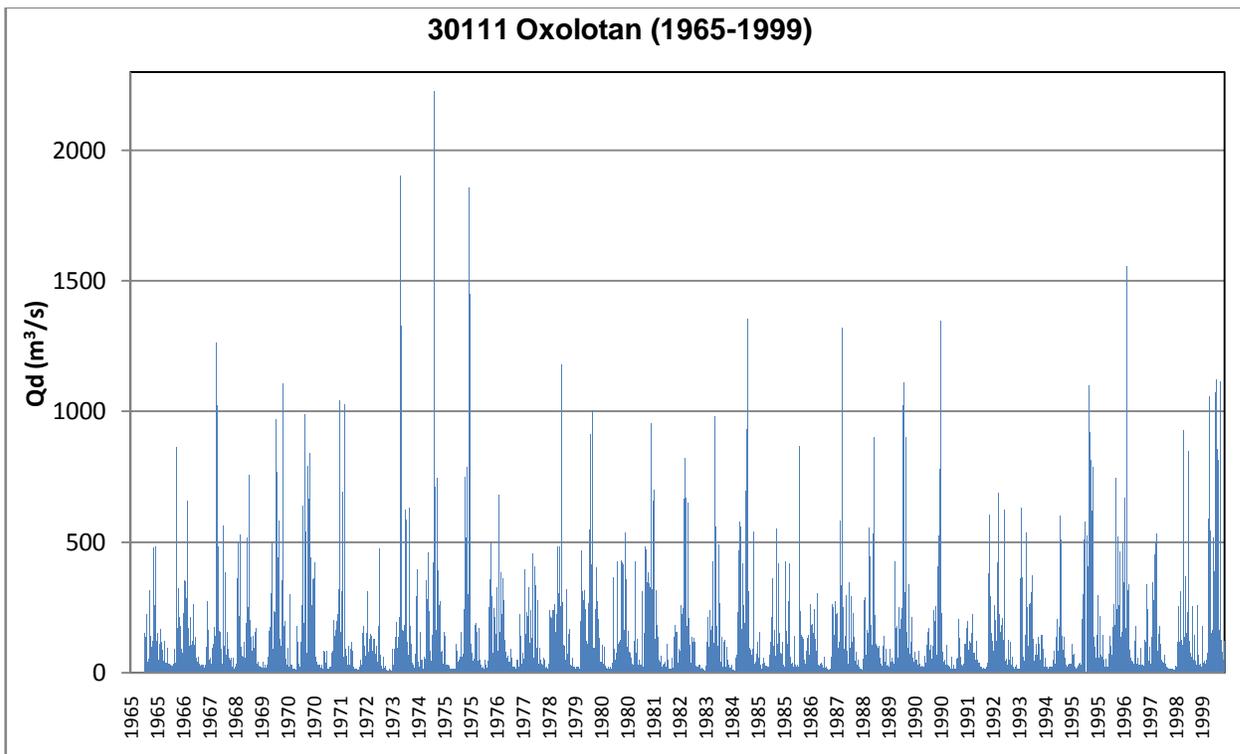


Figura 5.14. Hidrograma de gastos diarios estación 30111 Oxolotán de 1965 a 1999



Como se puede observar, entre otras manifestaciones del registro, que aun cuando el escurrimiento medio diario en el río del tramo de Oxolotán es de $84.43 \text{ m}^3/\text{s}$ se presentó una avenida máxima extraordinaria el 20 de septiembre de 1974 con $2224.75 \text{ m}^3/\text{s}$, provocando en las zonas bajas inundaciones. Esto indica los gastos registrados en 24 horas, pero no indica cómo se distribuyó en esas 24 horas, para conocer los eventos que ocurrieron en ese día; para esto se requiere de registros hidrométricos continuos, que se pueden obtener en tiempo real con estaciones hidrométricas automáticas que registren con mayor resolución la variable.

G. Gasto máximo diario mensual y anual. Para obtener el gasto máximo diario en 24 horas, y sus parámetros estadísticos, a partir de los datos observados diarios, se analizó para obtener el gasto mayor en un mes y para cada año de las estaciones hidrométricas consideradas para el estudio.

Debido a la gran cantidad de información que se manejó solo se mostrará el ejemplo de la estación 30111 Oxolotán, realizándose un resumen de los gastos máximos por mes y año, con el objetivo de identificar el año en el que se presentó el evento extraordinario. Obteniendo el valor máximo maximorum de gastos para la estación, se presenta la matriz de gastos mensuales y anuales.



Cuadro 5.21. Gasto máximo diario mensual y anual, estación hidrométrica 30111 Oxolotán

Gasto máximo diario histórico(m ³ /s)															
No	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Qd Max anual (m ³ /s)	FECHA
1	1965						151.78	224.41	315.32	132.23	481.73	150.47	165.81	481.73	23/10/1965
2	1966	93.48	119.17	93.86	27.14	58.44	861.97	321.73	175.49	351.54	656.23	305.61	120.79	861.97	29/06/1966
3	1967	260.77	60.42	57.37	29.69	25.90	270.68	145.15	109.25	1,261.61	1,022.31	155.43	563.68	1,261.61	29/09/1967
4	1968	383.11	155.56	54.37	52.94	357.28	498.32	528.60	113.91	513.47	755.94	137.33	152.53	755.94	21/10/1968
5	1969	170.65	42.10	20.33	40.30	58.63	174.30	500.00	969.91	766.60	247.44	1,106.51	196.27	1,106.51	20/11/1969
6	1970	300.01	133.94	20.28	14.68	178.09	258.96	639.01	985.96	841.96	702.49	420.08	62.20	985.96	03/08/1970
7	1971	28.69	30.33	83.36	79.53	19.32	81.15	200.79	318.06	1,040.93	691.02	1,025.30	99.46	1,040.93	08/09/1971
8	1972	88.07	118.16	15.44	16.11	47.68	177.10	309.54	129.86	145.52	128.71	101.70	476.40	476.40	16/12/1972
9	1973	57.63	30.84	19.96	12.79	86.70	146.01	192.21	1,903.88	410.71	622.90	630.47	179.14	1,903.88	22/08/1973
10	1974	31.28	394.27	52.97	155.16	60.91	354.21	457.51	140.50	2,224.75	742.46	389.81	207.03	2,224.75	20/09/1974
11	1975	153.46	27.81	25.56	13.31	27.56	106.22	154.49	143.48	749.20	1,856.04	1,449.63	74.65	1,856.04	30/10/1975
12	1976	189.65	167.06	61.37	18.76	46.11	356.60	501.54	246.39	326.93	679.28	383.35	274.71	679.28	10/10/1976
13	1977	64.00	40.42	87.51	20.18	47.81	222.59	73.74	391.50	323.18	235.48	452.85	404.72	452.85	11/11/1977
14	1978	276.55	92.84	52.92	20.36	231.67	237.35	261.36	479.58	481.68	1,178.51	106.07	318.24	1,178.51	16/10/1978
15	1979	166.76	55.32	23.30	22.75	195.79	467.78	313.27	266.92	912.50	1,001.74	402.46	273.86	1,001.74	05/10/1979
16	1980	63.73	105.33	97.81	21.76	22.40	363.41	426.37	164.97	427.99	537.14	357.07	92.98	537.14	30/10/1980
17	1981	52.59	427.35	127.61	48.70	311.81	481.23	469.91	954.69	697.80	443.94	183.38	62.36	954.69	21/08/1981
18	1982	34.47	52.89	107.95	55.15	136.52	183.06	87.34	256.31	822.02	671.23	651.31	136.59	822.02	24/09/1982
19	1983	132.86	21.70	29.92	17.44	24.75	209.45	236.44	425.20	980.41	488.91	265.83	123.52	980.41	03/09/1983
20	1984	97.89	48.49	27.53	9.43	228.32	576.01	558.29	416.18	930.50	1,354.33	86.72	539.52	1,354.33	02/10/1984
21	1985	117.37	155.24	34.44	55.02	23.47	212.77	359.03	550.17	416.06	151.64	115.36	424.23	550.17	25/08/1985
22	1986	416.00	67.90	138.00	29.80	867.00	234.00	128.00	132.00	145.00	262.00	245.00	302.00	867.00	31/05/1986
23	1987	32.40	36.40	57.50	19.80	33.80	261.00	270.00	226.00	583.00	1,320.00	294.00	343.00	1,320.00	01/10/1987
24	1988	291.79	226.87	77.41	47.23	12.98	288.49	164.16	552.25	443.24	902.01	106.38	102.52	902.01	04/10/1988
25	1989	103.00	138.00	29.90	87.70	53.20	426.00	248.00	247.00	1,112.00	900.00	336.00	211.00	1,112.00	24/09/1989
26	1990	77.91	47.58	83.80	25.35	62.42	114.50	169.68	99.74	236.29	406.09	776.80	1,345.60	1,345.60	01/12/1990
27	1991	45.52	103.80	21.71	59.22	30.25	204.23	151.67	35.15	164.84	196.31	147.75	224.87	224.87	04/12/1991
28	1992	119.81	41.75	23.20	16.19	35.81	605.24	221.60	256.73	662.94	688.18	208.34	622.93	688.18	02/10/1992
29	1993	123.22	114.86	60.05	27.79	14.85	630.16	362.49	533.83	259.66	370.23	272.86	108.82	630.16	27/06/1993
30	1994	134.38	142.57	88.69	55.01	22.10	22.51	82.53	203.31	600.44	510.03	136.33	27.78	600.44	27/09/1994
31	1995	34.97	106.22	70.37	33.82	36.61	509.96	576.54	1,099.25	811.50	787.94	144.51	294.61	1,099.25	29/08/1995
32	1996	217.18	140.44	51.65	138.46	116.73	309.46	745.70	462.49	497.58	668.50	1,553.90	207.41	1,553.90	09/11/1996
33	1997	43.49	178.40	54.59	96.19	29.39	125.20	336.99	96.88	344.24	531.22	177.83	168.41	531.22	28/10/1997
34	1998	68.88	32.66	15.70	15.67	11.79	51.32	253.78	311.34	927.50	342.02	848.66	253.89	927.50	04/09/1998
35	1999	140.39	259.14	32.44	174.91	44.97	589.12	1,054.60	514.88	1,121.50	855.90	1,114.63	122.34	1,121.50	18/09/1999
Estadísticos															
	NO.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	FECHA
	PROMEDIO	135.65	115.17	55.85	45.83	104.74	307.49	335.04	406.53	647.64	668.28	435.42	265.25	982.59	
	DESVEST	102.57	95.87	33.32	41.43	160.99	193.22	211.14	378.65	416.78	373.03	394.85	241.12	439.42	
	MEDIANA	110.19	104.57	53.67	28.74	46.89	258.96	270.00	266.92	583.00	668.50	294.00	207.03	954.69	
	MAX	416.00	427.35	138.00	174.91	867.00	861.97	1,054.60	1,903.88	2,224.75	1,856.04	1,553.90	1,345.60	2,224.75	20/09/1974
	MIN	28.69	21.70	15.44	9.43	11.79	22.51	73.74	35.15	132.23	128.71	86.72	27.78	224.87	

H. Hidrograma de gastos máximos diarios por mes y anuales. Con la matriz de gasto máximo diario mensual y anual, se elaboró el hidrograma de cada mes, para todos los años de registro, figura 5.15.

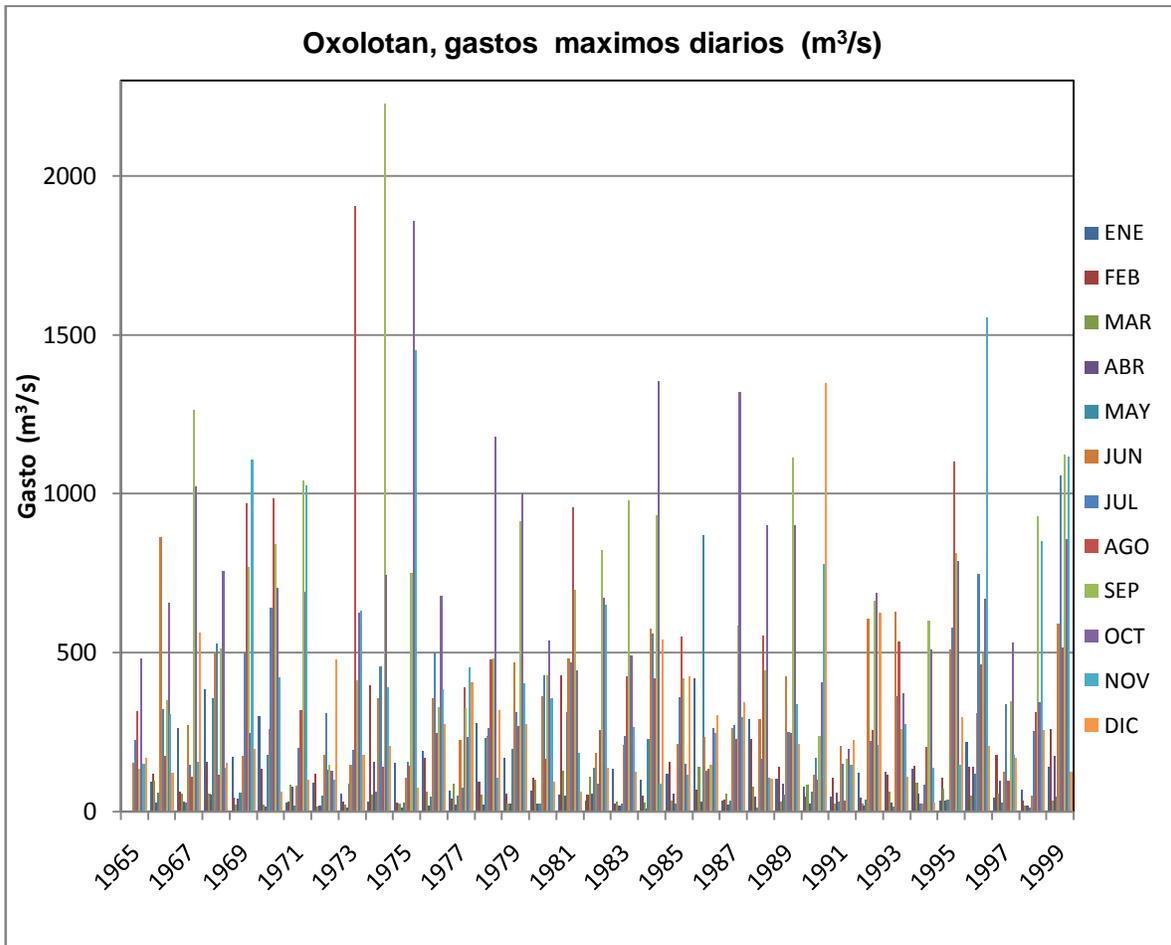


Figura 5.15. Gastos máximos en 24 horas, por mes, en todo su registro histórico, estación hidrométrica 30111 Oxolotán

El valor máximo se observa en el año de 1974 y el evento máximo en septiembre, lo que se puede esperar que en los meses cercanos se presenten las avenidas máximas, tal como se analiza para el año de 1974, el evento y visualizar que en la fecha 20 de septiembre se presenta este evento.



I. Esgurrimientos diarios. El proceso descrito, se realizó para las estaciones consideradas. Los resultados para las subcuencas alta y media del río La Sierra y para la cuenca del río Teapa, se presentan en el cuadro 5.22, en esta parte se presenta un análisis somero de los resultados de ese proceso. Los escurrimientos máximos diarios se integran para las cuencas alta y media del río La Sierra en la estación hidrométrica 30093 Tapijulapa, donde pueden alcanzar un gasto máximo diario de 2626.3 m³/s, que son gastos de avenidas altos. La cuenca del río Teapa hasta las estaciones 30032, Teapa y 30031, Puyacatengo registran también gastos máximos diarios del orden de 1,065.65 y 395.229 m³/s respectivamente, las que descargan aguas abajo de la estación hidrométrica 30093 Tapijulapa, las que en conjunto podrían alcanzar 4080.79 m³/s, si se presentaran juntas. Las afectaciones que pudieran causar estas avenidas, en las subcuencas en Chiapas y Tabasco principalmente en las llanuras de inundación de Tabasco pudieran ser destructivas.



Cuadro 5.22. Escurrecimientos diarios máximos y sus parámetros estadísticos

No.	Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Altura	Área Drenada	Subcuenca	Río	Registro	No.	Qmd	Mediana Qmd	Desvest Qmd	Qmd Max	Qmd Min
			°W	°N	msnm	Km ²			Años	Días	m ³ /s/año				
1	30022	Chacté	92° 19' 59.9"	16° 56' 00"	805	649	Alta	La Sierra	1978-1986	2,370	24.885	16.200	24.897	231.000	3.700
2	30135	Almandro	92° 29' 45"	17° 11' 00"	243	2243	Media	La Sierra	1973-1995	8,094	66.070	38.300	80.599	1,148.000	0.500
3	30028	San Pedro	92° 30' 45"	17° 10' 30"	235	279	Media	La Sierra	1971-1981	1,461	13.395	7.830	18.065	215.500	0.520
4	30111	Oxolotan	92° 45' 00"	17° 22' 00"	63	2901	Media	La Sierra	1965-1999	12,603	84.430	45.520	121.523	2,224.750	4.150
5	30093	Tapijulapa	92° 49' 00"	17° 28' 00"	41	3219	Media	La Sierra	1964-1999	13,008	108.131	61.155	139.006	2,626.300	0.608
6	30032	Teapa	92° 58' 00"	17° 34' 00"	31	476	Teapa	Teapa	1950-1999	16,792	40.826	24.849	55.274	1,065.650	0.239
7	30031	Puyacatengo	92° 56' 15"	17° 34' 00"	29	169	Teapa	Teapa	1950-1999	16,353	17.738	11.302	22.200	395.229	0.052
8	30016	Pueblo Nuevo	92° 55' 40"	17° 51' 14"	10	4398	Baja	Sierra y Teapa	1947-1999	18,811	197.98	130.09	180.47	1,270.10	5.21

Del análisis de los escurrimientos históricos registrados en las estaciones hidrométricas en las cuencas del río La Sierra y del río Teapa se puede concluir que: Algunos de los registros hidrométricos de las estaciones incluidas en el análisis, no presentan continuidad en su registro de datos; algunos no están actualizados, otros están suspendidos, de tal forma que es corto el periodo en que son coincidentes dichos registros para todas las estaciones hidrométricas en las cuencas. Para contar con la mayor información posible, se utilizaron todos los valores de las variables de escurrimiento con que se conto en cada una de las estaciones consideradas en este análisis.



En cuanto a los valores de los escurrimientos máximos diarios cuadro 5.22, se observa un gradiente descendente, como debiera ser, con sus valores menores en las estaciones hidrométricas de las partes altas de las cuencas hidrológicas en los Estados de Chiapas y Tabasco con los mayores en las partes bajas, con variaciones, por supuesto, en el transecto, del noreste en las partes altas de las cuencas en el Estado de Chiapas al noroeste en las partes bajas, principalmente en el Estado de Tabasco.

La subcuenca alta del río La sierra a la altura de la estación 30135 Almandro, registró un gasto máximo diario de $1,148.0 \text{ m}^3/\text{s}$, que incluye los escurrimientos del río Plátanos.

La subcuenca media del río La sierra registra a la altura de la estación 30093 Tapijulapa, un gasto máximo de $2626.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

La cuenca del río Teapa hasta las estaciones 30032 Teapa y 30031 Puyacatengo, registran en conjunto $1,460.879 \text{ m}^3/\text{s}$ que descargan aguas abajo de la 30093 Tapijulapa, en conjunto podrían alcanzar $4080.79 \text{ m}^3/\text{s}$, si se presentaran juntas.

También se observa, que la distribución de las estaciones hidrométricas no corresponden a las salidas en las subcuencas, como se observa en la subcuenca alta del río La Sierra, donde la estación 30135 Almandro, registra gastos que incluyen los escurrimientos del río Plátanos, que corresponde a la cuenca media.

5.2.3.5. Definición del área específica de modelación. Para el análisis hidrometeorológico, se definieron seis Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) generando la matriz de coincidencia y un análisis de la relación lluvia-escurrimiento para los eventos extraordinarios y la incidencia que tienen las cuencas a la generación de escurrimiento.

Las unidades de respuesta hidrológica (URH) que se formaron de acuerdo a la distribución de las estaciones hidrométricas y meteorológicas son: Chacté, Almandro, Oxolotán, Tapijulapa, Teapa y Puyacatengo. La estación San Pedro no presentó ninguna estación meteorológica para su estudio, y la estación Pueblo Nuevo, no representa el fenómeno natural, ya que antes de que registre, el río se desborda en la parte baja, funcionando la planicie como un vaso regulador que favorece la disminución del gasto para avenidas máximas.

A. Unidad de respuesta hidrológica Chacté. El sistema Chacté se analizó considerando las estaciones que se encuentran aguas arriba de su ubicación de la estación hidrométrica, las estaciones meteorológicas que se consideraron son: 7390 Tzontehuitz y 7324 Chacté, tal y como se ve en la figura 5.16.

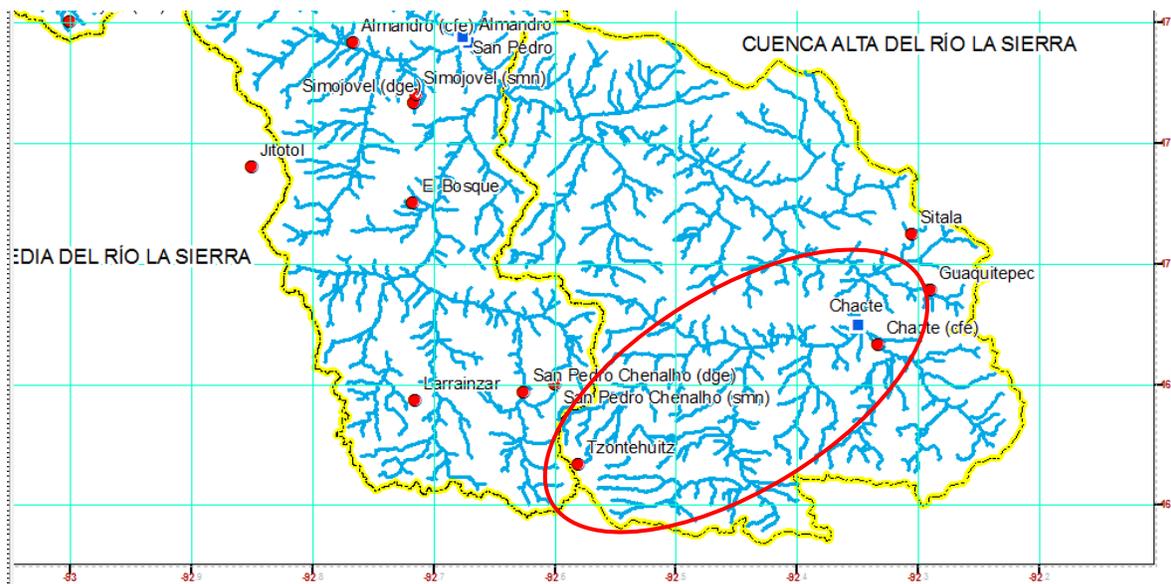


Figura 5.16. Unidad de respuesta hidrológica Chacté

Considerando el sistema Chacté, se realizó la matriz de coincidencia, estableciendo el periodo de los registros de la estación hidrométrica Chacté. Los espacios vacíos, corresponden a los años sin datos.



La matriz de coincidencia es el registro de los datos en el tiempo, para las estaciones hidrométricas y meteorológicas que representan a un sistema hidrológico, establecidos a partir de la conformación de las subcuencas.

Cuadro 5.23. Matriz de coincidencia en el sistema Chacté

T	Clave	No años	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Años	19	19	19	19	19	19	19	19	19
			78	79	80	81	82	83	84	85	86
M	7390	Tzontehuitz									
M	7324	Chacte	78	79	80	81	82	83			
H		Chacte	78			81	82	83	84	85	86

La estación meteorológica Tzontehuitz, no puede ser analizada, ya que su periodo de registro no coincide con los de la estación hidrométrica Chacté.

La relación entre la lluvia y el escurrimiento será analizado por URH, ya que la suma de los eventos de precipitación son los causantes del escurrimiento y principalmente en eventos extraordinarios, con estos análisis podemos determinar cual precipitación registrada a nivel histórico es la causante de las avenidas extraordinarias que provocan inundaciones en la zona de la ciudad de Villahermosa Tabasco y zonas aledañas.

Considerando la matriz de coincidencia, podemos apreciar que la única estación que presenta registros de precipitación es la estación meteorológica (EM) Chacté, por lo que la sincronización se hará en el periodo de 1978-1983.

Y el año que se analizó debido a la consistencia de datos y por ser el evento de escurrimiento más alto es para 1983.

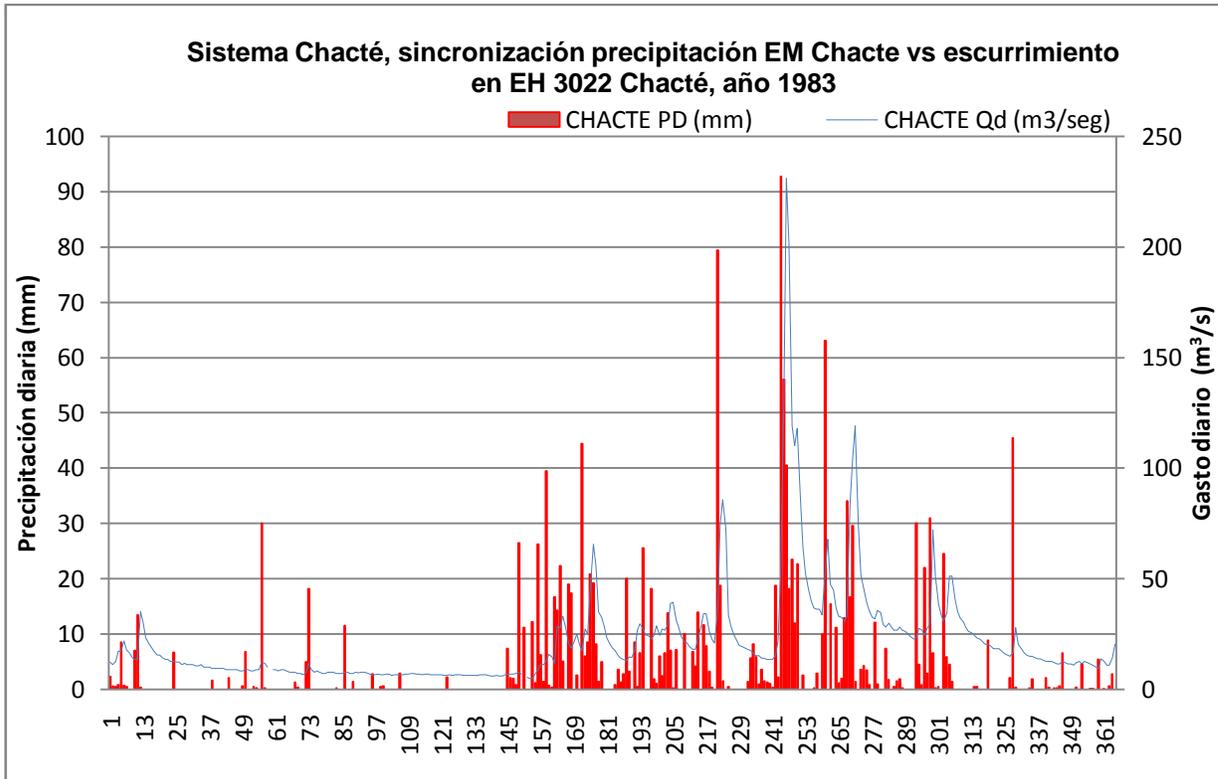


Figura 5.17. Sincronización de estaciones en el sistema Chacté

Si se analiza la avenida máxima que se presentó el 3 de septiembre de 1983 en la estación Chacté, tenemos una precipitación que se registró en la estación meteorológica Chacté de 92.8 mm en la parte alta de la cuenca y se presentó el día 1 de septiembre. Por lo que el tiempo del evento entre la precipitación registrada y el día en el que se presenta el escurrimiento, es de 2 días aproximadamente, debido a la resolución de los datos que se están utilizando, de ahí la importancia de tener resoluciones más finas en la toma de datos, para entender el comportamiento hidrológico de la cuenca alta.

B. Unidad de respuesta hidrológica Almandro. El sistema Almandro se analizó considerando las estaciones meteorológicas: 7390 Tzontehuitz, 7324 Chacté, 7033 Chenalho, 7357 El Bosque, 7071 Guaquitepec, 7149 San Pedro, 7207 Larraínzar, 7389 Sitalá, 7355 Jitotol, 7160 Simojovel, 7198 Simojovel SMN y 7005 Almandro, tal y como se ve en la figura 5.18.

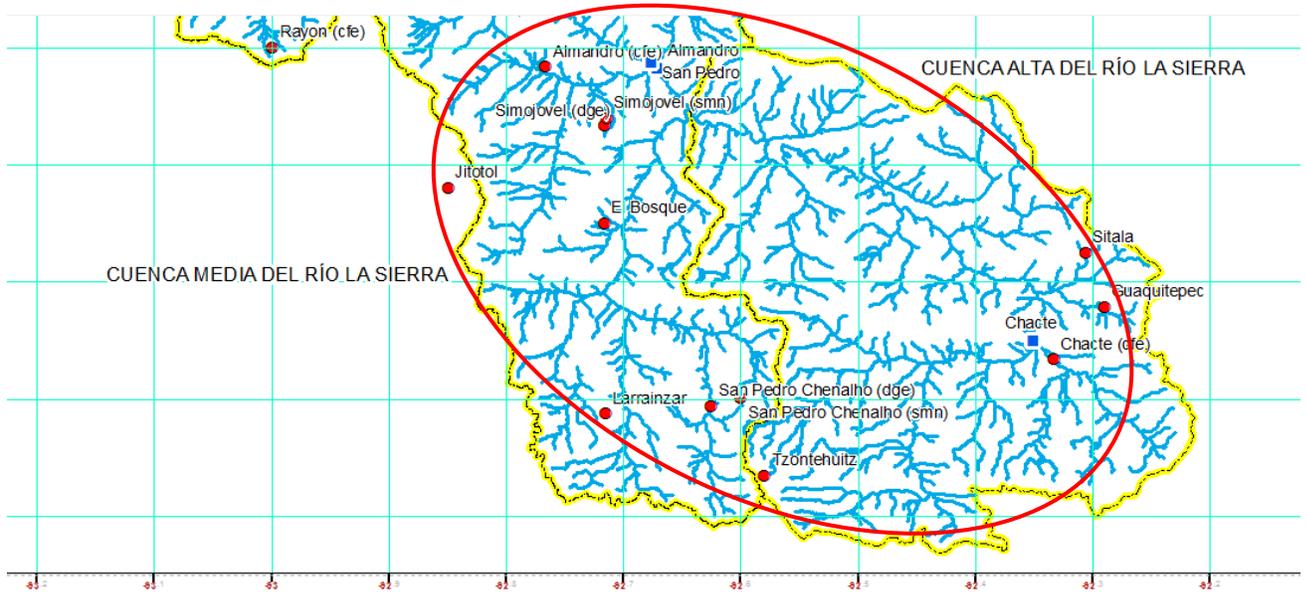


Figura 5.18. Unidad de respuesta hidrológica Almandro

Considerando la URH de Almandro, se realizó la matriz de coincidencia, estableciendo el periodo de los registros de la estación hidrométrica Almandro. Los espacios vacíos, corresponden a los años sin datos para las estaciones que no presentan registro

Cuadro 5.24. Matriz de coincidencia en el sistema Almandro

T	Clave	No años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
		Años	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
			73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
M	7390	Tzontehuitz																						94	95
M	7324	Chacte						78	79	80	81	82	83												
M	7033	Chenalho	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90					
M	7357	El Bosque										82	83												
M	7071	Guaquitepec	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
M	7149	San Pedro	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
M	7207	Larrainzar	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90		92	93	94	95
M	7389	Sitala												84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
M	7355	Jitotol										82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
M	7160	Simojovel	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
M	7198	Simojovel Smn																							
M	7005	Almandro	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	
H		Almandro	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95

La estación meteorológica Simojovel del SMN a pesar de que se encuentra dentro del sistema, los años de registro no coinciden con los de la estación hidrométrica, por lo que se no podrá analizar, para determinar los tiempos de respuesta de la precipitación y la generación de escurrimiento.

El mayor evento extraordinario de una avenida registrada en la estación hidrométrica Almandro, se presentó el 20 de septiembre de 1974 con un gasto de $1148 \text{ m}^3/\text{s}$, registrándose en la cuenca alta y media el 19 de septiembre una precipitación de 90 mm por la estación Guaquitepec, y para la cuenca media se registró por la estación Almandro 95.8 mm, Chenalho y San Pedro Chenalho reportaron 99.8 mm, Larráinzar reportó 117.10 mm, sin embargo la estación Simojovel presenta para el mismos día 19 de septiembre 7 mm datos muy bajos en relación a la ubicación de la estación y la distribución del evento.

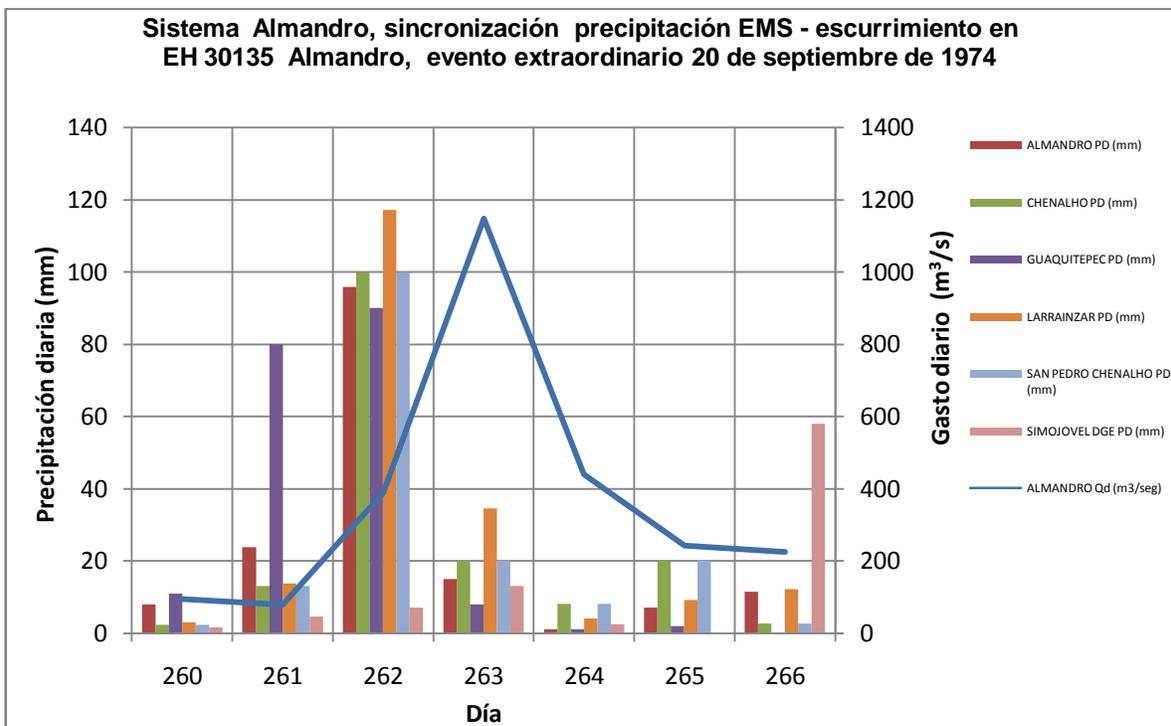


Figura 5.19. Avenida máxima presentada en el sistema Almandro

Se eligió este evento solo para ejemplificar una de avenida extrema, en el que se representa la influencia de la precipitación en el hidrograma. El tiempo de respuesta para una precipitación promedio de 100.5 mm en 24 horas, la respuesta entre la lluvia y escurrimiento es de un día aproximadamente entre la cuenca alta y media, provocando una avenida de 1148 m³/s.

Sin embargo para este periodo analizado, no se presentan todas las estaciones meteorológicas, por lo que se eligió un periodo donde se tengan el mayor número de estaciones, datos que son mostrados en el anexo correspondiente a sincronización y es analizado para el año 1983.

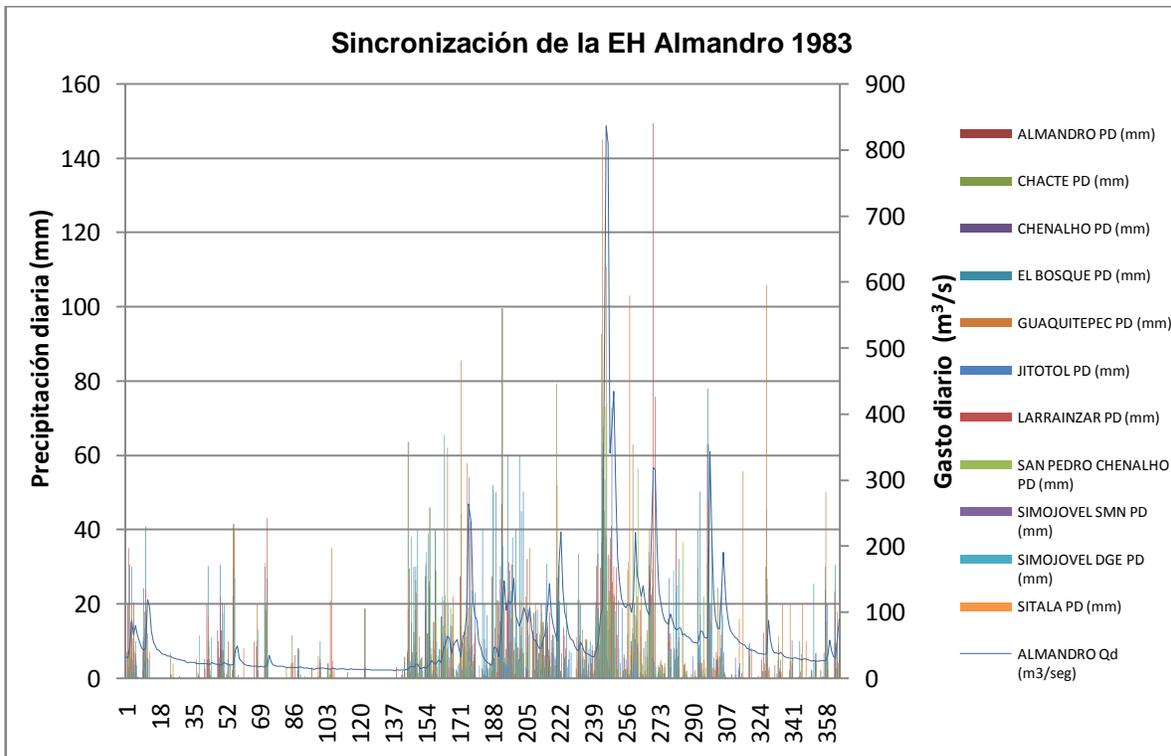


Figura 5.20. Sincronización de estaciones en el sistema Almandro

Si se analiza la influencia que presentan las estaciones con mayor precipitación y la respuesta del hidrograma en la estación meteorológica Guaquitepec, para el 1

de septiembre se presentó una precipitación de 145 mm, para el mismo día Chacté reportó una precipitación de 92.8 mm provocando en la estación hidrométrica Almandro un registro de 837 m³/s para el 3 de septiembre, por lo que el tiempo de respuesta fue de dos días.

C. Unidad de respuesta hidrológica Oxolotán. El sistema Oxolotán se analizó considerando las estaciones que se encuentran aguas arriba de su ubicación de la estación hidrométrica, las estaciones meteorológicas que se consideraron son: 7390 Tzontehuitz, 7324 Chacté, 7033 Chenalho, 7357 El Bosque, 7071 Guaquitepec, 7149 San Pedro, 7207 Larráinzar, 7389 Sitalá, 7355 Jitotol, 7160 Simojovel, 7198 Simojovel SMN y 7005 Almandro, tal y como se ve en la figura 5.21.

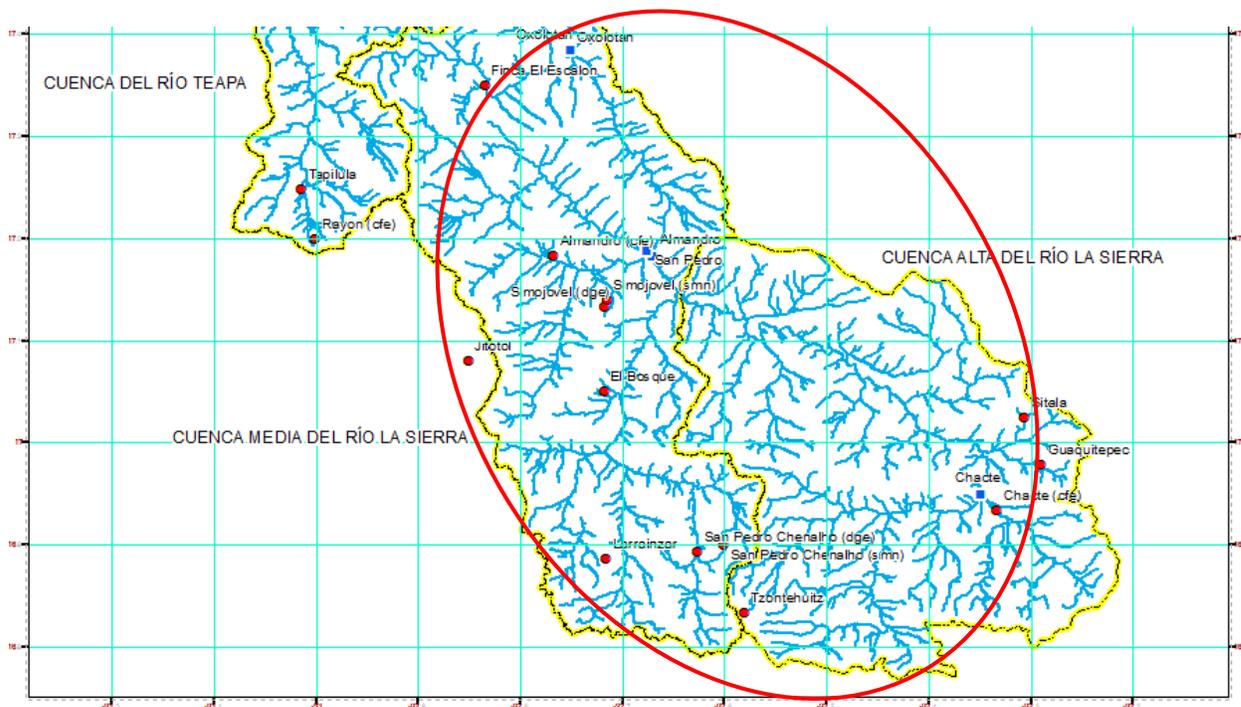


Figura 5.21. Unidad de respuesta hidrológica Oxolotán

Considerando la URH de Oxolotán, se realizó la matriz de coincidencia, estableciendo el periodo de los registros de la estación hidrométrica Oxolotán. Los



espacios vacíos, corresponden a los años sin datos para las estaciones que no presentan registro.

Cuadro 5.25. Matriz de coincidencia en el sistema Oxolotán

T	Clave	No años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35												
		Años	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19											
			65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99												
M7390	Tzontehuitz																																				94	95	96	97	98	99							
M7324	Chacte															78	79	80	81	82	83																												
M7033	Chenalho		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90																					
M7357	El Bosque																				82	83																											
M7071	Guaquitepec		66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99													
M7149	San Pedro		66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99													
M7207	Larrainzar									72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90		92	93	94	95	96	97	98	99												
M7389	Sitala																						84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99											
M7355	Jitotol																					82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99										
M7160	Simojovel		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99												
M7198	Simojovel Smn		65	66	67	68																																											
M7005	Almandro		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94																	
H	Oxolotan		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99												

De la matriz de coincidencia podemos ver que la estación del bosque es la que menos información presenta en la URH, con tan solo 2 años de registro, pero las estaciones que mayor información presentan son la estación Guaquitepec y San Pedro.

El evento extraordinario de una avenida registrada en la estación hidrométrica Oxolotán, se presentó el 20 de septiembre de 1974 con un gasto de 2224.75 m³/s, y con una precipitación el 19 de septiembre de 90 mm por la estación Guaquitepec, y para la cuenca media se registró por la estación Almandro 95.8 mm, Chenalho y San Pedro Chenalho reportó 99.8 mm, Larráinzar reportó 117.10 mm, sin embargo la estación Simojovel presenta para el mismo día 19 de septiembre 7 mm datos muy bajos en relación a la ubicación de la estación y la distribución del evento.

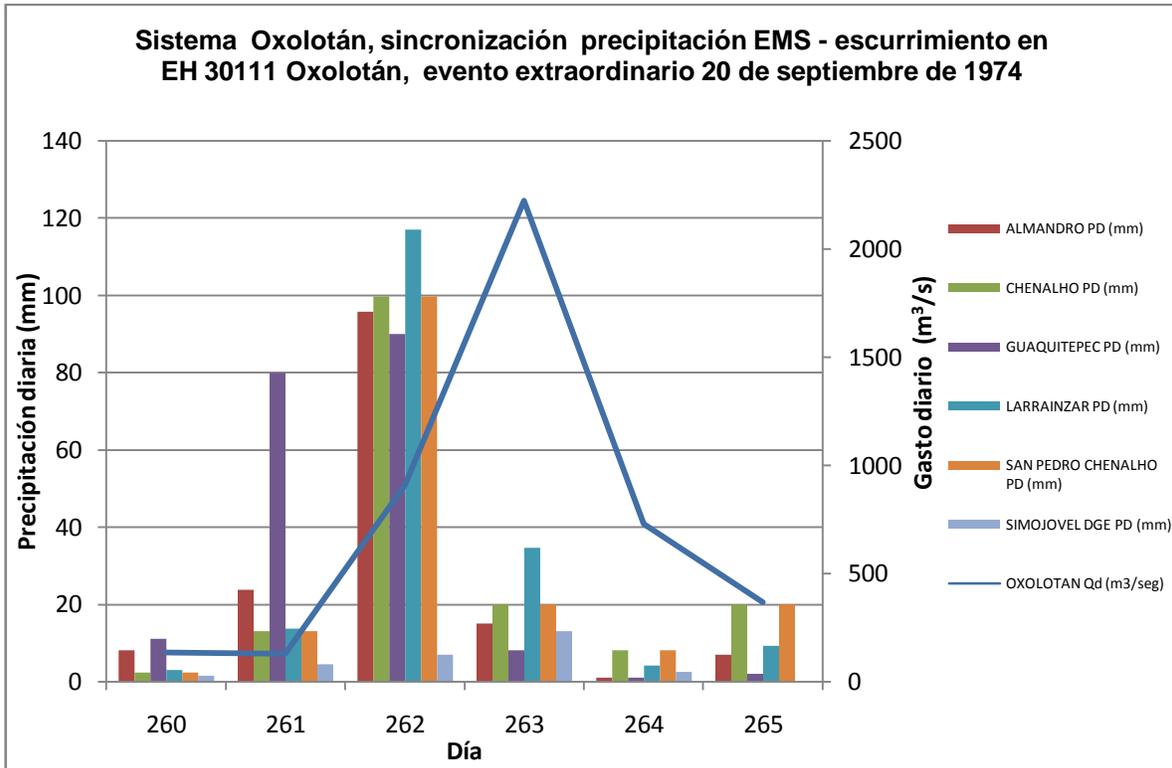


Figura 5.22. Avenida máxima presentada en el sistema Oxolotán

El tiempo de respuesta para una precipitación promedio de 100.5 mm en 24 horas, la respuesta entre la lluvia y el escurrimiento es de un día aproximadamente entre la cuenca alta y media, provocando una avenida de 2224.75 m³/s.

Sin embargo para este periodo analizado, no se presentan todas las estaciones meteorológica, por lo que se eligió un periodo donde se tengan el mayor número de estaciones, datos que son mostrados en el anexo correspondiente a sincronización y es analizado para el año 1983

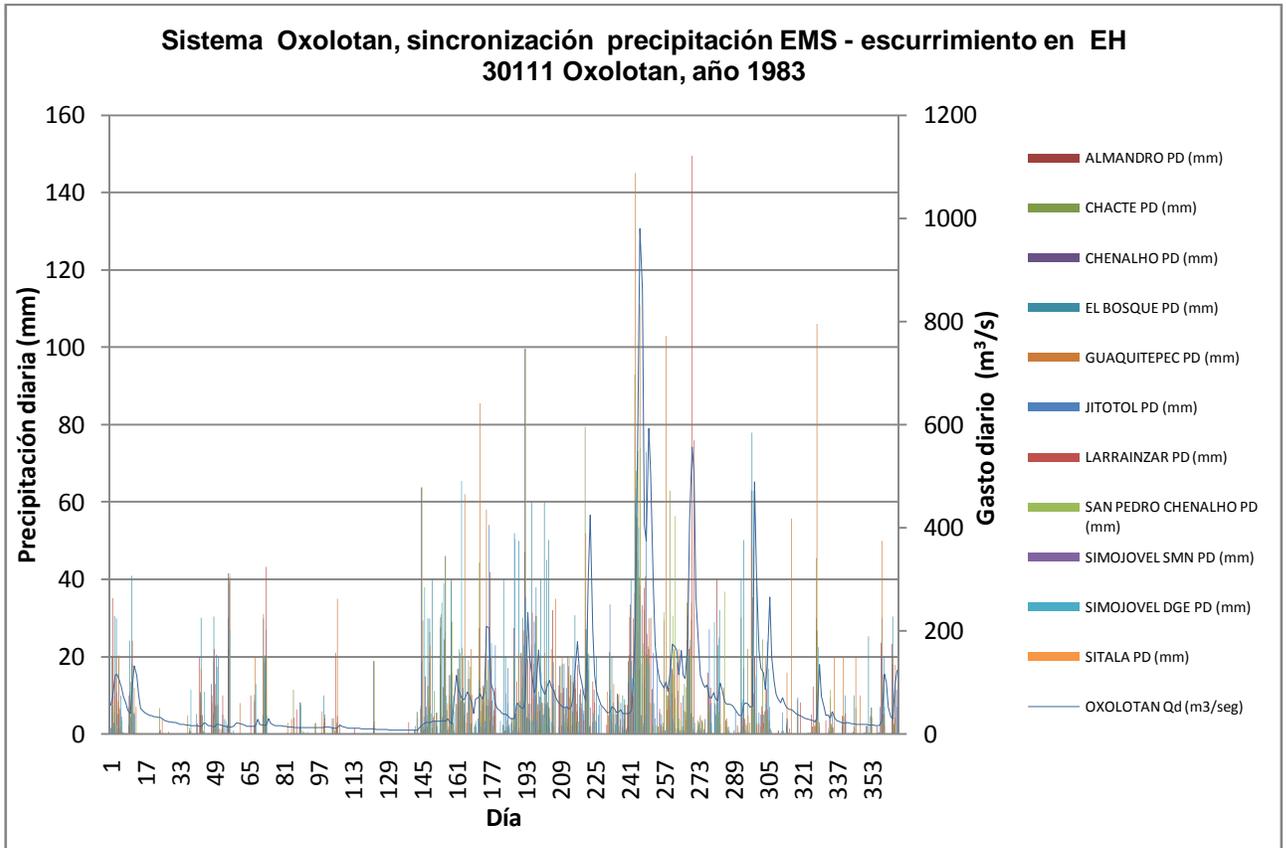


Figura 5.23. Sincronización de estaciones en el sistema Oxolotán

Si analizamos la influencia que presentan las estaciones con mayor precipitación y la respuesta del hidrograma, tenemos que en la estación meteorológica Guaquitepec, para el 1 de septiembre se presentó una precipitación de 145 mm, para el mismo día Chacté reportó una precipitación de 92.8 mm provocando en la estación hidrométrica Oxolotán un registro de 980.41 m³/s para el 3 de septiembre, por lo que el tiempo de respuesta fue de dos días.

D. Unidad de respuesta hidrológica Tapijulapa. El sistema Tapijulapa se analizó considerando las estaciones meteorológicas que se encuentran aguas arriba de la estación hidrométrica Tapijulapa, las estaciones meteorológicas que se consideraron son: 7390 Tzontehuitz, 7324 Chacté, 7033 Chenalho, 7357 El Bosque, 7071 Guaquitepec, 7149 San Pedro, 7207 Larráinzar, 7389 Sitalá, 7355

Jitotol, 7160 Simojovel, 7198 Simojovel SMN, 7005 Almandro, y 7186 Finca el escalón, figura 5.24.

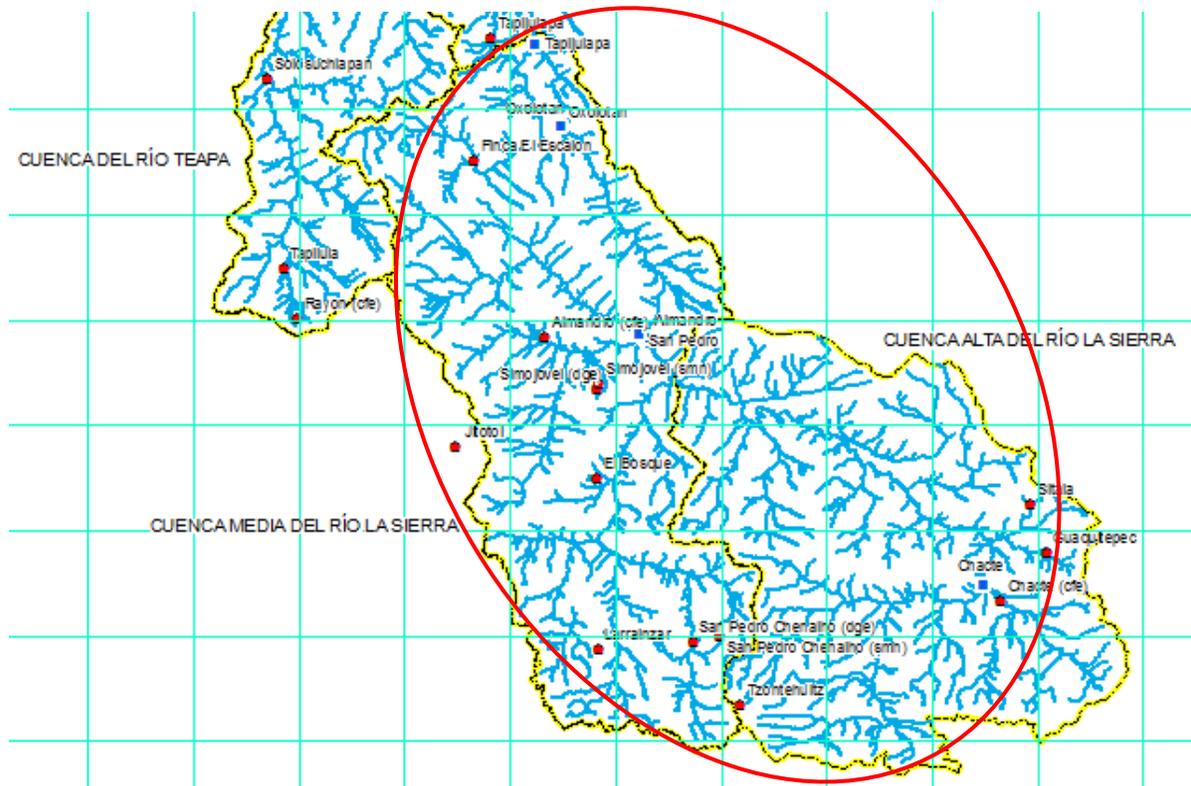


Figura 5.24. Unidad de respuesta hidrológica Tapijulapa

Considerando la URH de Tapijulapa, se realizó la matriz de coincidencia, estableciendo el periodo de los registros de la estación hidrométrica Tapijulapa. Los espacios vacíos, corresponden a los años sin datos para las estaciones que no presentan registro.



Cuadro 5.26. Matriz de coincidencia en el sistema Tapijulapa

T	Clave	No años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36								
		Años	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19							
			64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99								
M	7390	Tzontehuitz																																			94	95	96	97	98	99				
M	7324	Chacté															78	79	80	81	82	83																								
M	7033	Chenalho	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90																	
M	7357	El Bosque																				82	83																							
M	7071	Guaquitepec			66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99								
M	7149	San Pedro			66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99								
M	7207	Larrazarzar									72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99								
M	7389	Sitala																						84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99							
M	7355	Jitotol																					82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99						
M	7160	Simojovel		65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99								
M	7198	Simojovel smn	64	65	66	67	68																																							
M	7005	Almandro	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94													
M	7186	Escalón	64				68		70			73	74	75			78						83		86																					
M	27070	Oxoltan										74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99									
H		Tapijulapa	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99								

En la matriz de coincidencia podemos ver que la estación del bosque y Simojovel SMN son las que menos información presentan en la URH, con tan solo 2 y 4 años de registro, pero las estaciones que mayor información presentan son la estación Guaquitepec y San Pedro con 33 años de registro.

El mayor evento extraordinario de una avenida registrada en la estación hidrométrica Tapijulapa, se presentó el 18 de octubre de 1967 con un gasto de 2626.30 m³/s, y una precipitación registrada el 17 de octubre de 166 mm por la estación Guaquitepec, y para la cuenca media se registró por la estación Almandro 159 mm, Chenalho reportó 60 mm y San Pedro Chenalho reportó 87 mm, Simojovel SMN reportó 130.5 mm, sin embargo la estación Simojovel DGE presenta para el 16 de octubre 65.5 mm.

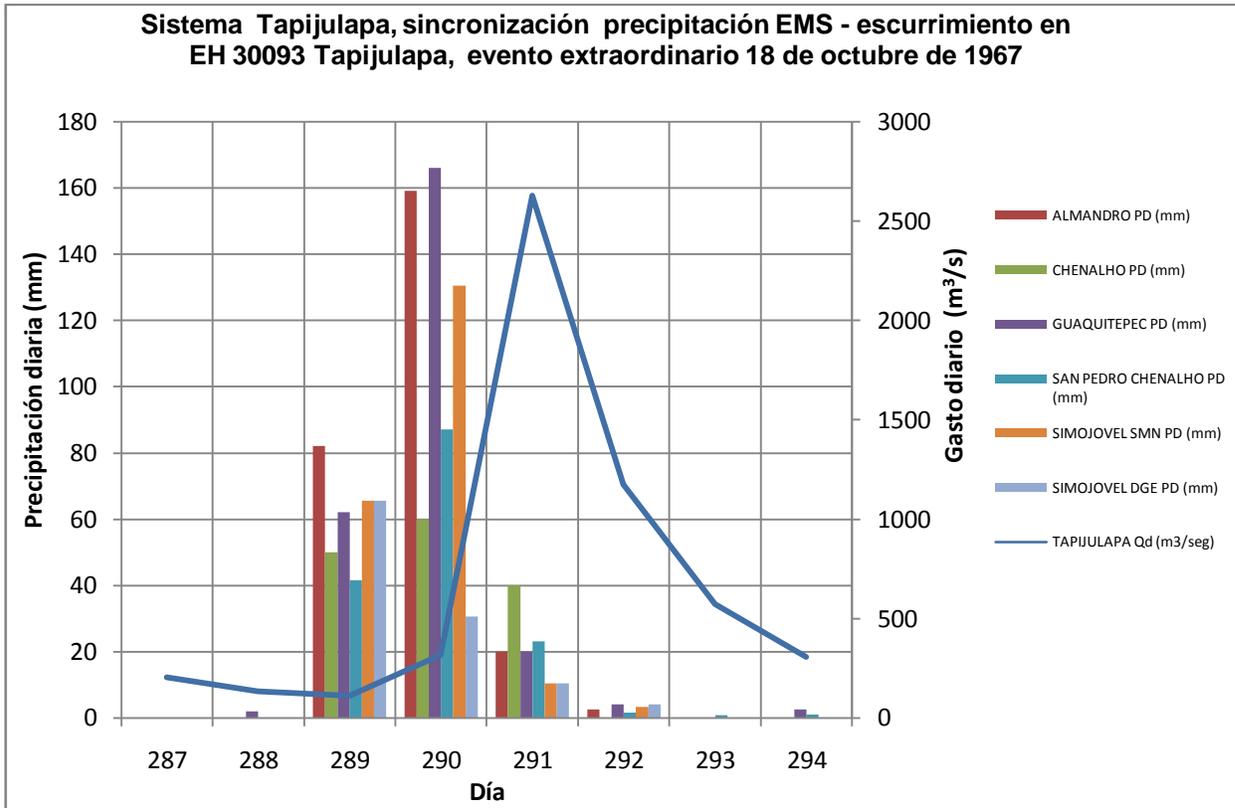


Figura 5.25. Avenida máxima presentada en el sistema Tapijulapa

El tiempo de respuesta para una precipitación promedio de 111.33 mm en 24 horas, la respuesta entre la lluvia y el escurrimiento es de un día aproximadamente entre la cuenca alta y media, provocando una avenida de 2626.30 m³/s.

Sin embargo para este periodo analizado, no se presentan todas las estaciones meteorológica, por lo que se eligió un periodo donde se tengan el mayor número de estaciones y es analizado para el año 1978.

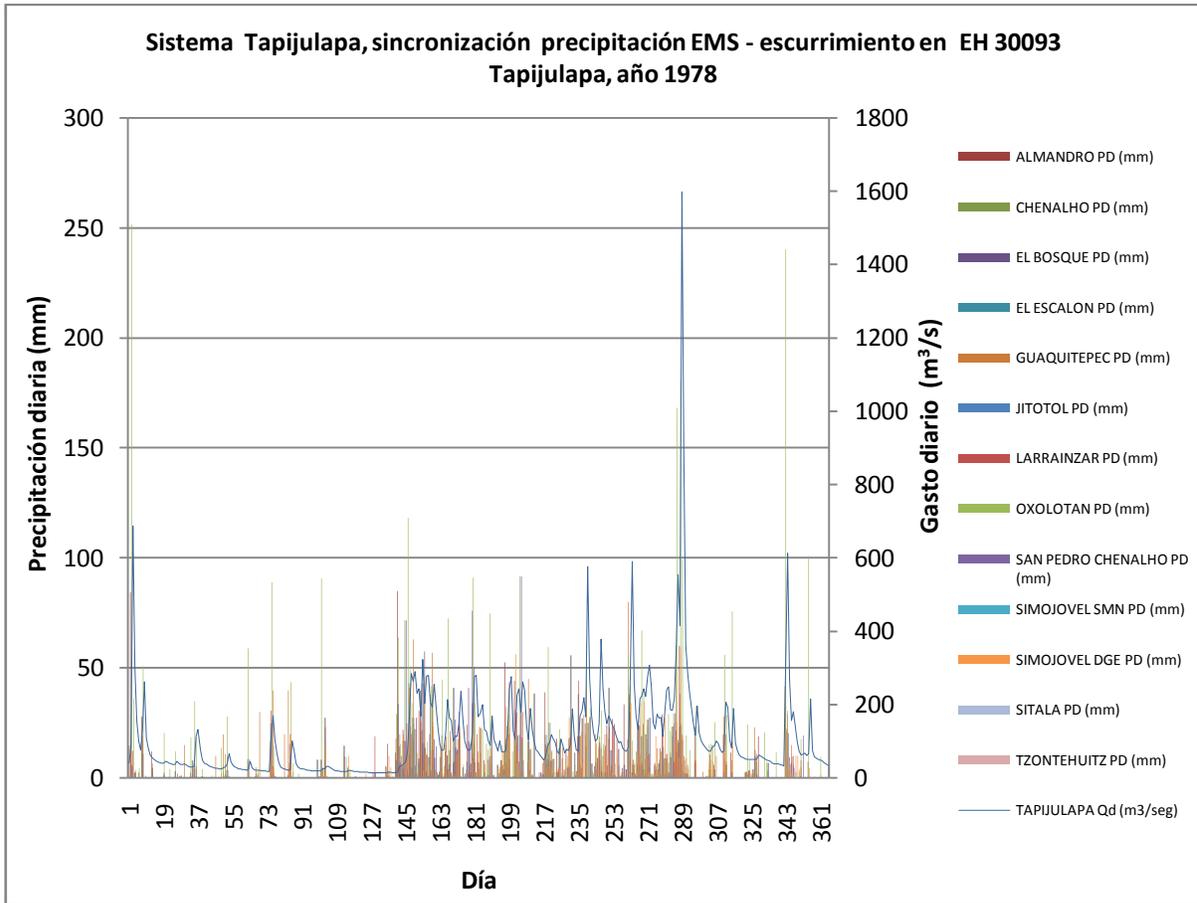


Figura 5.26. Sincronización de estaciones en el sistema Tapijulapa

Si analizamos la influencia que presentan las estaciones con mayor precipitación y la respuesta del hidrograma, tenemos que en la estación meteorológica Tapijulpa, para el 15 de octubre de 1978 se presentó una precipitación de 180.4 mm, para el mismo día Almandro reportó una precipitación de 60 mm y la estación Simojovel DGE reportó 59.5 mm, provocando en la estación hidrométrica Tapijulpa un registro de 1598.77 m³/s para el 16 de octubre de 1978, por lo que el tiempo de respuesta fue de un día.

E. Unidad de respuesta hidrológica Teapa. El sistema Teapa se compone de las estaciones meteorológicas: 7167 Tapilula, 7194 Rayón (CFE) y 7217 Solosuchiapa, como se presenta en la figura 5.27.

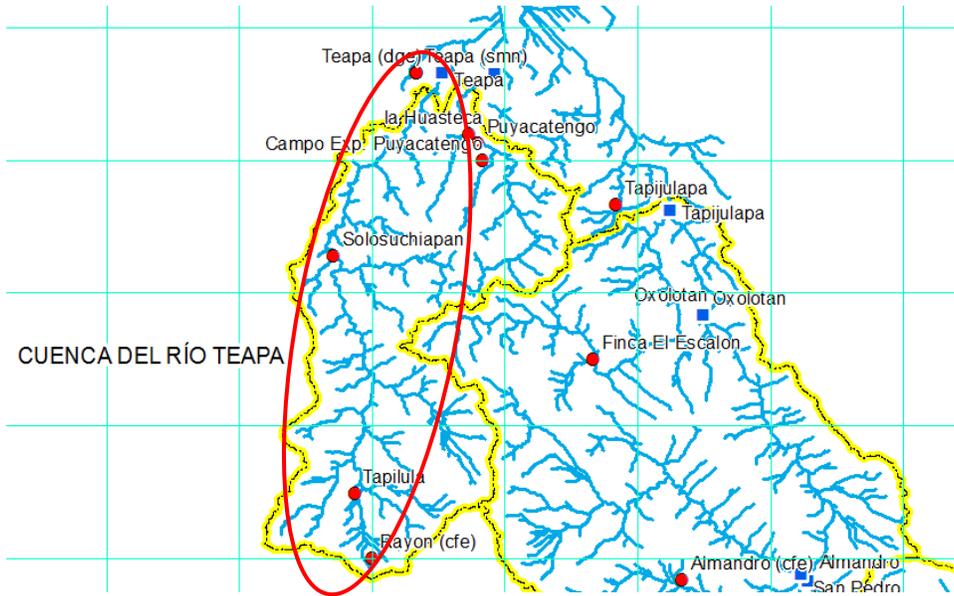


Figura 5.27. Unidad de respuesta hidrológica Teapa

Considerando la URH de Teapa, se realizó la matriz de coincidencia, estableciendo el periodo de los registros de la estación hidrométrica Teapa. Los espacios vacíos, corresponden a los años sin datos para las estaciones que no presentan registro.

Cuadro 5.27. Matriz de coincidencia en el sistema Teapa

T	Clave	No años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35			
		Años	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19		
			65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99			
M	7194	Rayon								72	73	74	75	76	77	78	79	80	81																					
M	7217	Solosuchiapan								73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83																				99
M	7167	Tapilula	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79											90	91	92	93	94	95	96	97	98	99			
H		Teapa	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89					92	93	94	95		97	98	99	

En la matriz de coincidencia del sistema Teapa podemos ver que la estación de Rayón es la que menos información presenta en la URH, con 10 años de registro, y la estación que mayor información presenta es Tapilula con 25 años de registro.

El mayor evento extraordinario de una avenida registrada en la estación hidrométrica Teapa, se presentó el 16 de diciembre de 1972 con un gasto de



1065.65 m³/s, y una precipitación registrada el 15 de diciembre de 180 mm por la estación Rayón, y para el mismo día la estación Tapilula reporta 112 mm.

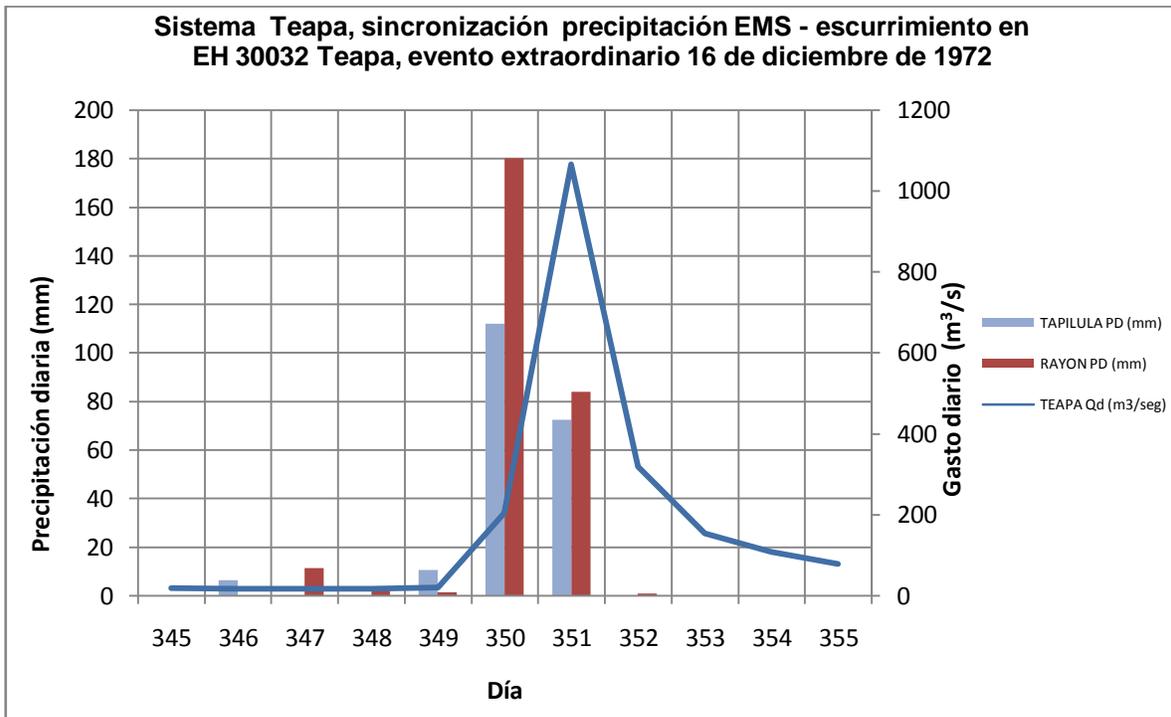


Figura 5.28. Avenida máxima presentada en el sistema Teapa

El tiempo de respuesta para una precipitación promedio de 146 mm en 24 horas, la respuesta entre la lluvia y el escurrimiento es de un día aproximadamente, provocando una avenida de 1065.65 m³/s.

Sin embargo para este periodo analizado, falta considerar la estación Solosuchiapa, lo por lo que se presentará la sincronización de 1973.

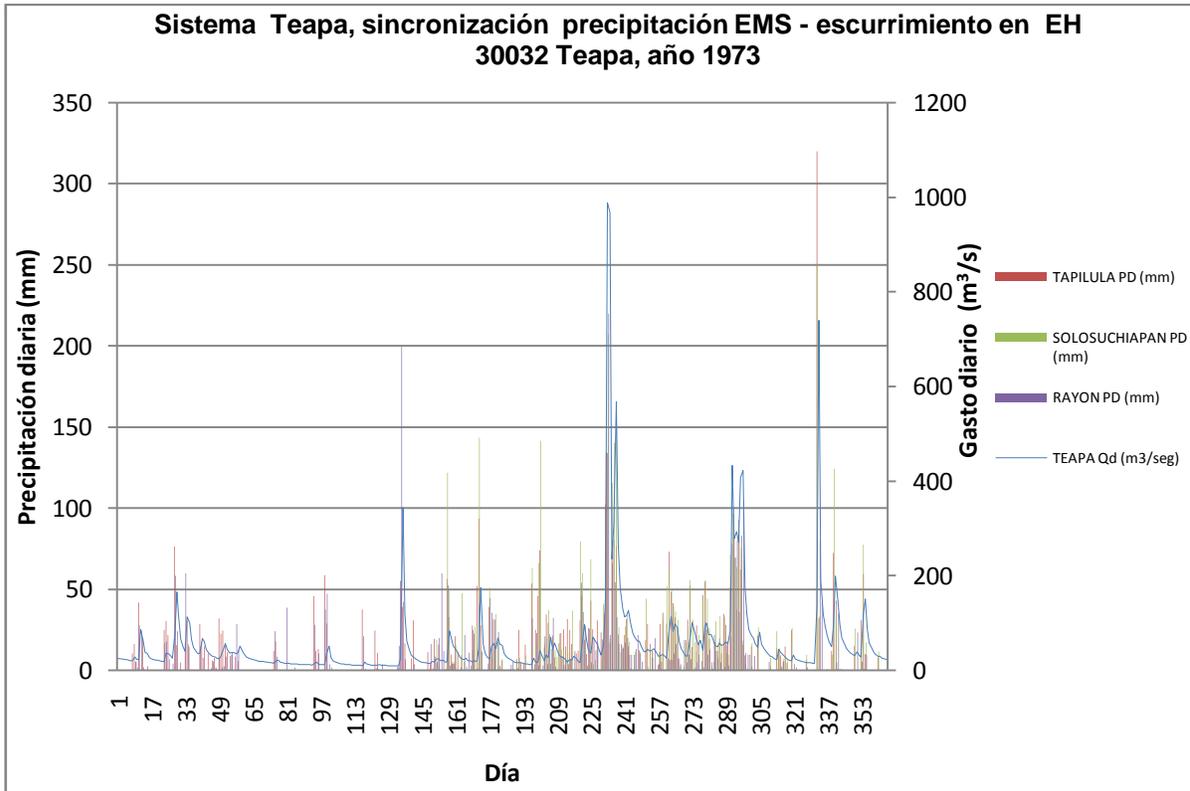


Figura 5.29. Sincronización de estaciones en el sistema Teapa

Si analizamos la influencia que presentan las estaciones con mayor precipitación y la respuesta del caudal, tenemos que en la estación meteorológica Tapilula, para el 20 de agosto de 1973 presentó una precipitación de 102.6 mm, para el mismo día en la estación Solosuchiapa reportó una precipitación de 135.5 mm y la estación Rayón reportó 134 mm, provocando en la estación hidrométrica Teapa un registro de 988.54 m³/s para el 21 de agosto de 1973, por lo que el tiempo de respuesta fue de un día.

En comparación con la cuenca del río La Sierra, la respuesta del escurrimiento a partir de una precipitación es más rápida, por lo que un sistema en tiempo real y con toma de datos más corto permitirá tener el tiempo preciso en el comportamiento del fenómeno.

F. Unidad de respuesta hidrológica Puyacatengo. Para el sistema Puyacatengo se compone de las estaciones meteorológicas: 27024 La Huasteca, 27061 Puyacatengo y 27068 Campo Exp. Puyacatengo, como se presenta en la figura 5.30.

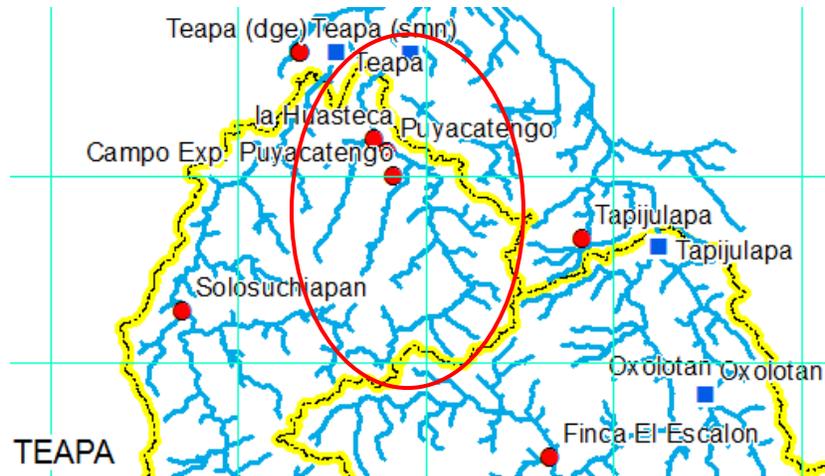


Figura 5.30. Unidad de respuesta hidrológica Puyacatengo

Considerando la URH de Puyacatengo, se realizó la matriz de coincidencia, estableciendo el periodo de los registros de la estación hidrométrica Puyacatengo.

Cuadro 5.28. Matriz de coincidencia en el sistema Puyacatengo

T	Clave	No años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
		Años	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
			70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	
M	27068	C Exp Puyacatengo					74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	
M	27024	La Huasteca	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83											94	95	96	97	98		
M	27061	Puyacatengo			72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	
H		Puyacatengo	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87					91	92	93	94	95	96	97	98	99

El mayor evento extraordinario registrado en la estación hidrométrica Puyacatengo, se presentó el 3 de noviembre de 1951 con un gasto de 556.25 m³/s, sin embargo no presenta buena relación con la estación meteorológica Puyacatengo, por que no presenta buena sincronía entre sus datos.

Pero para analizar todas las estaciones que hacen responder el histograma es para el año 1995.

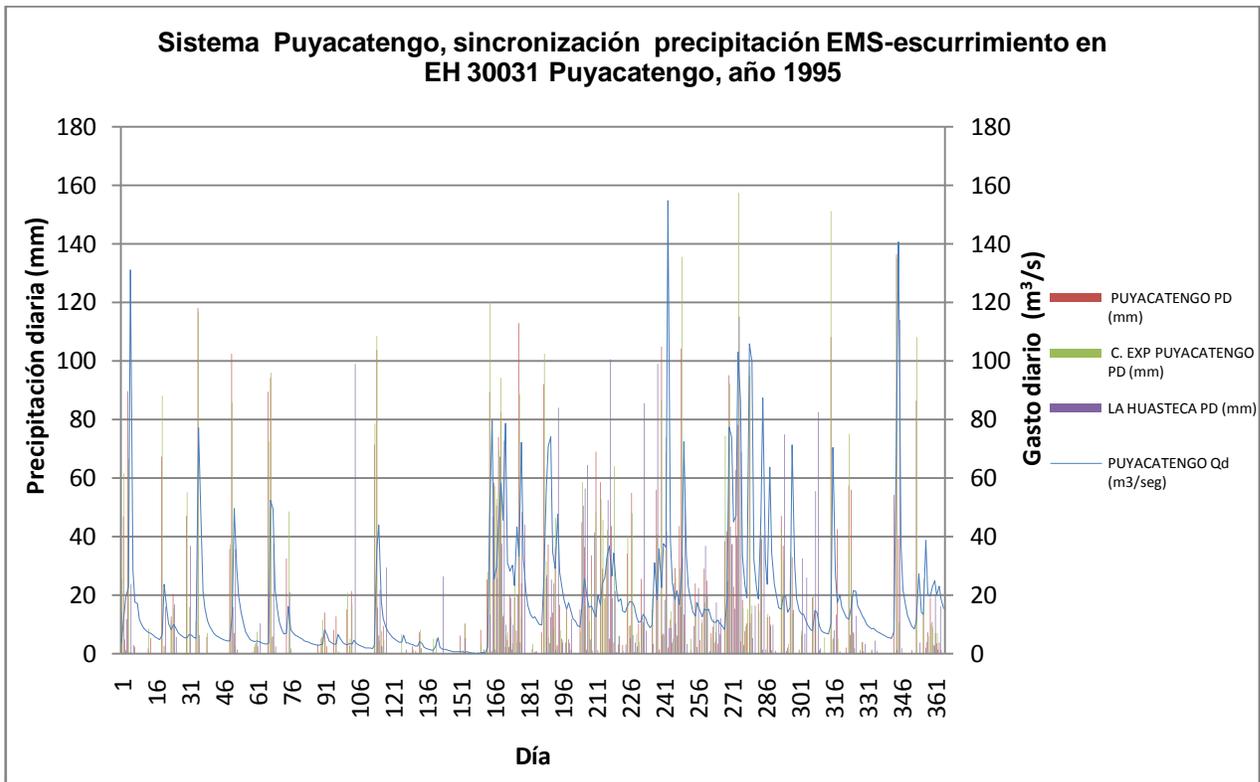


Figura 5.31. Sincronización de estaciones en el sistema Puyacatengo

Si se analiza la influencia que presentan las estaciones con mayor precipitación y la respuesta del hidrograma, se tiene que en la estación meteorológica Campo Experimental Puyacatengo, para el 30 de agosto en 1995 se presentaron 74 mm, en la estación Puyacatengo 68.5 mm y en la estación Huasteca 42 mm, lo que resultó en una avenida registrada en la estación hidrométrica Puyacatengo un registro de $154.67 \text{ m}^3/\text{s}$ para el 31 de agosto de 1995, por lo que el tiempo de respuesta fue de un día.

Al analizar las condiciones hidrometeorológicas de la zona, se determinó que el evento para modelación más representativo de la zona corresponde del 18 al 23



de octubre de 1989, ya que presenta la mayor consistencia de datos meteorológicos e hidrométricos.

5.2.4. Modelación hidrológica con el modelo MIKE SHE

El sistema MIKE puede representar simultáneamente todos los procesos involucrados en el ciclo hidrológico. En particular, este enfoque integrado permite incluir la interacción entre la zona saturada, no saturada y el escurrimiento superficial.

Los procesos que se analizaron en este estudio fueron: Intercepción por el follaje, infiltración a través de la zona no saturada, almacenamiento en depresiones del terreno, evapotranspiración y escurrimiento superficial.

En consecuencia, el modelo MIKE SHE para esta aplicación requiere de ser alimentado con una gran cantidad de datos y parámetros físicos (variación espacial y temporal de datos meteorológicos, hidrológicos, edafológicos y cobertura del suelo).

5.2.4.1. Especificaciones del modelo. En esta sección, se establecieron las fases del movimiento del agua en el ciclo hidrológico, considerando el escurrimiento superficial, el flujo en la zona no saturada, evapotranspiración y el acoplamiento con el modulo de ríos.

El periodo de simulación (18 al 23 de octubre de 1989) y el tiempo (2 horas) en que se llevará a cabo el paso de cada proceso, se especifican en esta sección.

A. Dominio del modelo. El modelo abarca, la cuenca del río La Sierra y Teapa, tal y como se presenta en el mapa 1 en anexos, con un área de 4,424.66 km². La inclusión de estas zonas en el modelo es para especificar las condiciones de



borde o frontera, al flujo de agua superficial en la zona y representar las extracciones de agua de la zona no saturada. Como el modelo es distribuido, el área de estudio se debe discretizar en celdas rectangulares indicando el área para cada una. Se eligió esta área debido a que el río La Sierra no presenta ninguna estructura de control y además que representa un gran impacto en las zonas bajas cercanas a la ciudad de Villahermosa y ciudades cercanas.

El tamaño de la celda que se estableció es de 200 m, con el punto de origen $X_0=491,338.009$ m, $Y_0=1,854,220.674$ m, el sistema coordenado es Universal Transversa de Mercator (UTM), en la zona 15 norte, con meridiano central. El modelo presenta 110,616 celdas con un área modelada de $4,424.66$ km², lo que representa al área de la cuenca.

B. Periodo de simulación. El periodo de aplicación primaria de simulación que se seleccionó fue del 18 al 23 de octubre de 1989, tiempo de 2 horas en pasos de 10 minutos en los que se llevará a cabo los pasos de cada proceso, que se especifican en esta sección.

C. Condiciones de frontera. Para que el modelo identifique la frontera, es necesario elaborar un archivo en formato *.shp, que se procesó en Arc Gis 9.3, que contiene el parteaguas de la cuenca; el modelo asigna automáticamente valores de 1 a las celdas internas y valores de 2 a las celdas de contorno. El preprocesador calcula el dominio del modelo basado en el archivo *.shp y lo define como una cuadrícula rectangular como un archivo de extensión *.dfs2 de la red con los valores enteros 1 para un punto interno, 2 para el punto límite y cero para zonas fuera del dominio del modelo. El preprocesador asigna todos los parámetros que se generan en las demás capas de información como son: edafología, vegetación, precipitación, evapotranspiración, topografía, basado en la capa *.dfs2 que se calcula a partir del polígono que se ha especificado. Si se desea cambiar el

dominio del modelo, lo único que se tiene que hacer es modificar el archivo *.shp o agregar un nuevo archivo *.shp y preprocesar los datos de nuevo.

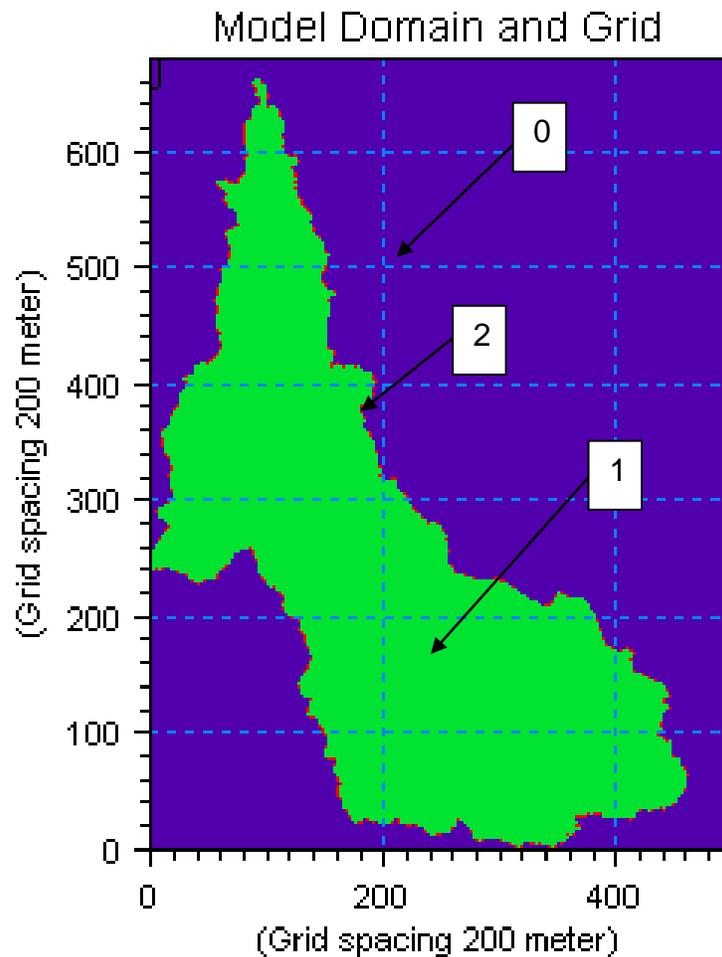


Figura 5.32. Límite del modelo

Aunque en la descripción de los datos aparecen valores del tipo decimal, la base de datos solo posee valores enteros de 0, 1 y 2. El archivo que se generó, tiene 680 filas por 500 columnas, lo que da una cuadrícula de 340,000 celdas, con un área total incluyendo los valores de 0 en el modelo con 13,600 km², figura 5.32.



5.2.4.2. Preparación de los datos de entrada al modelo MIKE SHE. Los datos de entrada que requiere el modelo son: Topografía, precipitación, evapotranspiración, cobertura vegetal y edafología.

A. Preparación de los datos de topografía. El modelo de elevación asigna la altura a cada celda y la separación entre los puntos está en función de la resolución del modelo de elevación, en este caso 30m, así para cada punto se generan sus coordenadas X,Y,Z.

Los datos distribuidos espacialmente, como la topografía se pueden especificar con un archivo Grid (*.dfs2), un Punto / Línea (*.shp) de ArcView o Arc GIS, o un archivo ASCII con valores distribuidos XYZ (Point XYZ en formato *.txt). Si se utiliza un archivo *.shp o un archivo XYZ, el modelo MIKE SHE interpola estos datos en la malla definida en el dominio. Los métodos de interpolación que se pueden elegir son: interpolación bilineal y triangular mediante la selección de la casilla desplegable del método de interpolación. La interpolación bilineal es un buen método para la interpolación de datos de la cuadrícula y el método triangular es bueno para la interpolación de líneas de contorno digitalizado.

El radio de interpolación debe ser lo suficientemente grande como para asegurar que cada rejilla obtiene un valor. El método de los inversos de los cuadrados de las distancias (entre el punto donde se interpola y los puntos donde se tienen los datos). Para la aplicación se usó el valor de 180 m, asegurando que para cada punto se tiene una interpolación de tres puntos en ambos lados. Sin embargo, el radio de búsqueda mínimo es de dos veces el tamaño de la celda, con radios de búsqueda debajo de este no tendrá ningún efecto. En algunos casos, como cuando la red es muy grande o el número de puntos de datos es grande, entonces la interpolación puede llevar mucho tiempo. Esto puede ser un problema, ya que la cuadrícula se vuelve a interpolar cada vez que se introduzca la información, así como, durante la etapa de pre-procesamiento. Para hacer el modelo más eficiente,

se puede guardar con la interpolación en un archivo *.dfs2 para utilizarlo directamente.

Para leer el modelo utilizado de topografía, se debe dar la dirección de donde fue creado el archivo de topografía en *.shp, utilizando la interpolación bilineal. Para verificar si el archivo es aceptado por la configuración que se presenta, el modelo verifica las dos condiciones necesarias para leer el archivo adecuadamente. Cuidando que el archivo que se tiene es del tipo, numérico, es decir que la tabla sea de precisión a tres dígitos, figura 5.33.

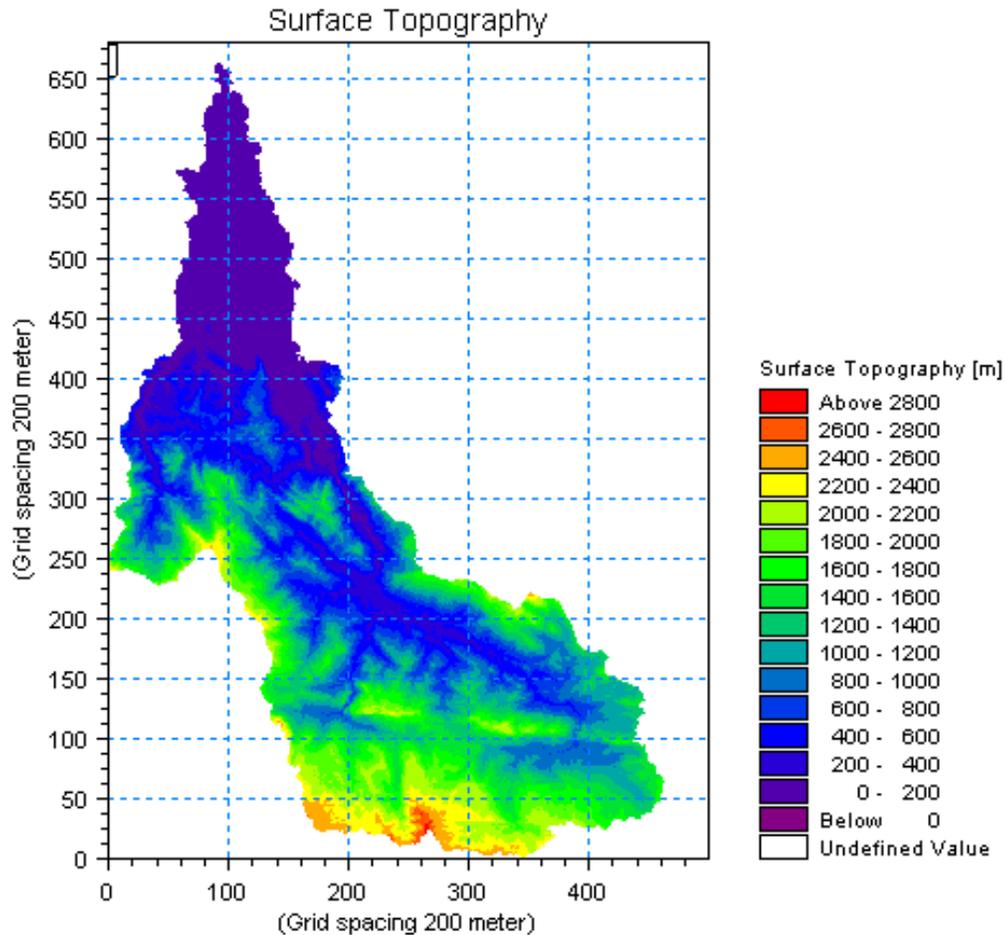


Figura 5.33. Topografía

5.2.4.3. Preparación de la base de datos de precipitación. Para preparar la base de datos de precipitación, del archivo *.txt, que se generó con el Climgen, descrito en la sección de relleno de datos faltantes. Dentro del modelo MIKE SHE, en series de tiempo con formato *.dfs0 en blanco, se presenta una tabla de propiedades: en título, se asigna la clave de la estación; en el eje de información, se tiene una columna de datos de precipitación en 24 horas, que en este caso iniciará desde el 1 de enero de 1980, hasta el 31 de diciembre de 2000, con el objetivo de tener la base de datos completa. El número de datos que se utilizaron fueron 11,323 para cada una de las estaciones meteorológicas. A la precipitación diaria en 24 horas, es necesaria pasarla a forma horaria, ya que las unidades de precipitación que se manejan son mm/h, utilizada como la precipitación media acumulada en un día.

Los datos, se copian del archivo elaborado en Excel a MIKE SHE. En el modelo se guardará el archivo con un identificador, para asociarlo a cada estación meteorológica que le corresponde. Este procedimiento se realizó para las 20 estaciones consideradas en el estudio.

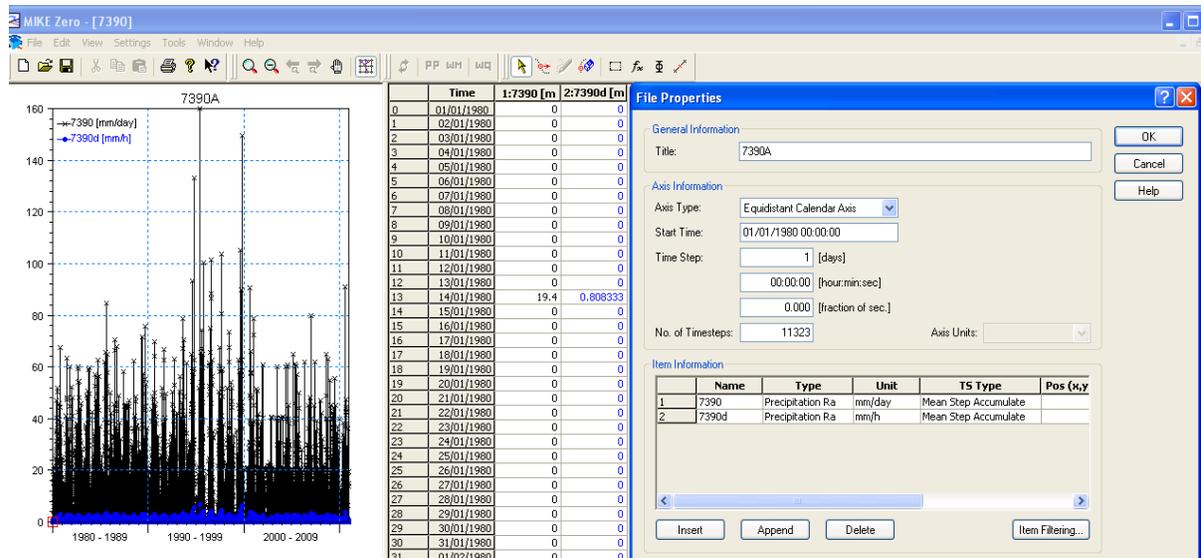


Figura 5.34. Base de datos de precipitación

Para los datos meteorológicos, el modelo requiere que se le asigne un área de influencia a cada estación, figura 5.11.

Para preparar el archivo de área de influencia en formato *.dfs2, que utiliza el modelo MIKE SHE, se selecciona la estación meteorológica, con tipo de archivo polígono en formato *.shp, en unidades métricas; después se lee el archivo donde se tiene la base de datos con el identificador correspondiente a cada estación meteorológica. Generando el área de influencia para cada estación meteorológica, figura 5.11, cada identificador corresponde al área atribuida a cada estación, cuadro 5.4, el identificador 1 corresponde al límite del modelo.

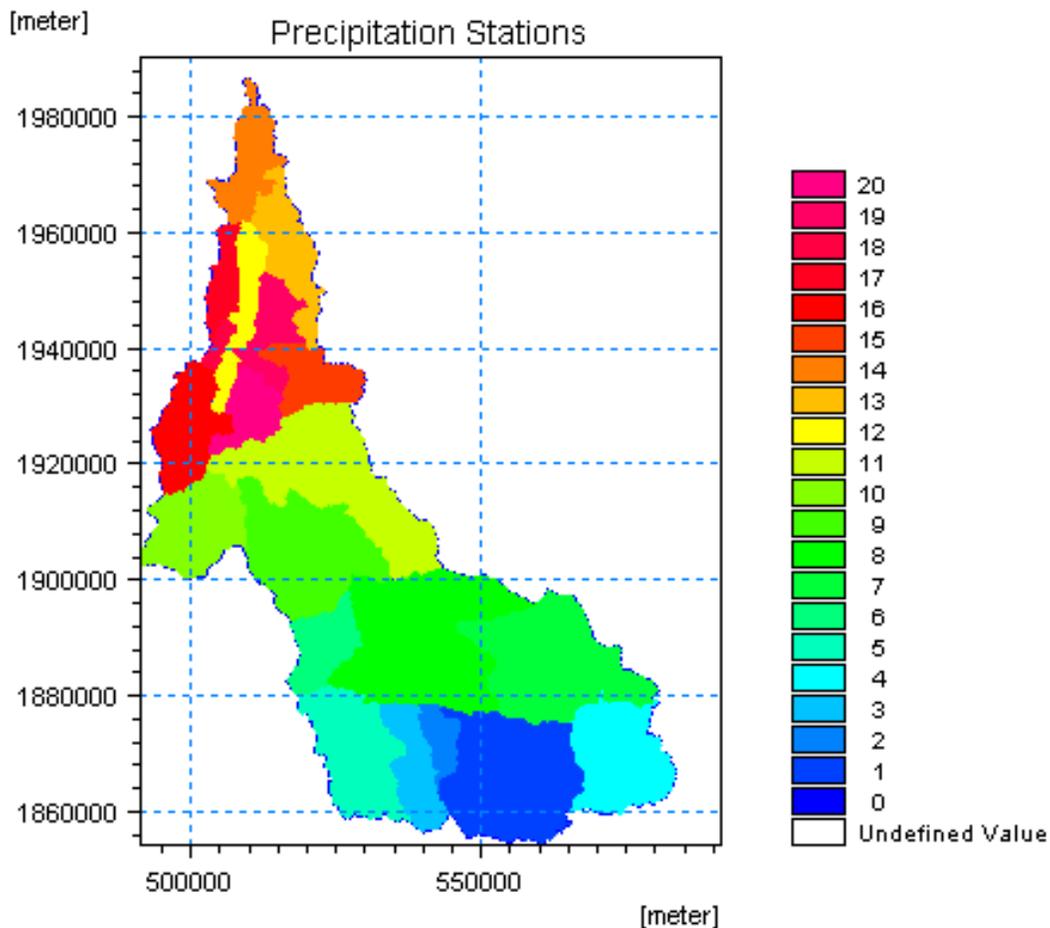


Figura 5.35. Área de influencia de las estaciones meteorológicas y precipitación

B. Preparación de la base de datos de evapotranspiración. En la base datos que se generó en Climgen, se cálculo la evapotranspiración de referencia, para cada estación meteorológica con el método de Penman-Monteith, aunque es un método complejo y que se utiliza más para determinar el momento de riego en tiempo real, sin embargo fue calculado para el periodo del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2000, siendo 11,323 datos para cada estación meteorológica.

Con la creación de las áreas de influencia de las estaciones figura 5.11, se asignan los parámetros necesarios y la misma metodología del punto anterior, utilizando ahora los datos de evapotranspiración.

Para ello se pasa a la sección de evapotranspiración de referencia, y a cada código, se asigna la base de datos de evapotranspiración que le corresponde.

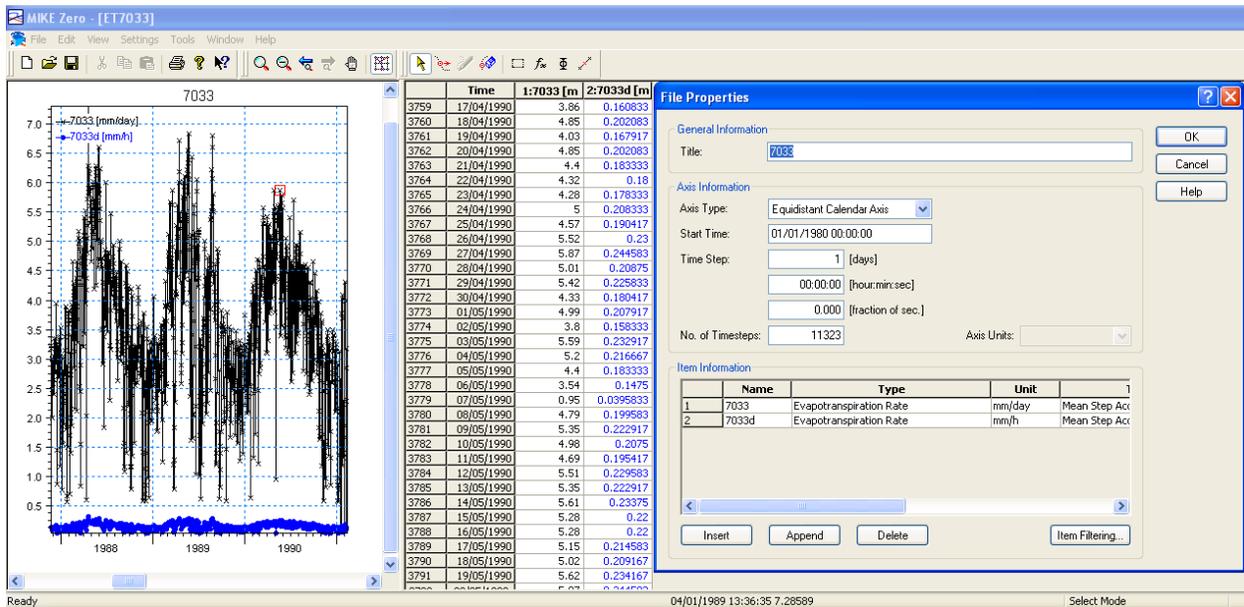


Figura 5.36. Base de datos de evapotranspiración de referencia

El área de influencia que se considera en la estimación de la evapotranspiración de referencia en la cuenca, es la misma que se maneja para la precipitación figura 5.37.

Para cada identificador del área de influencia de la estación meteorológica, se asignó la base de datos de evapotranspiración de referencia, cuadro 5.4., de esta forma se le asigna a cada área de influencia la base de datos de evapotranspiración.

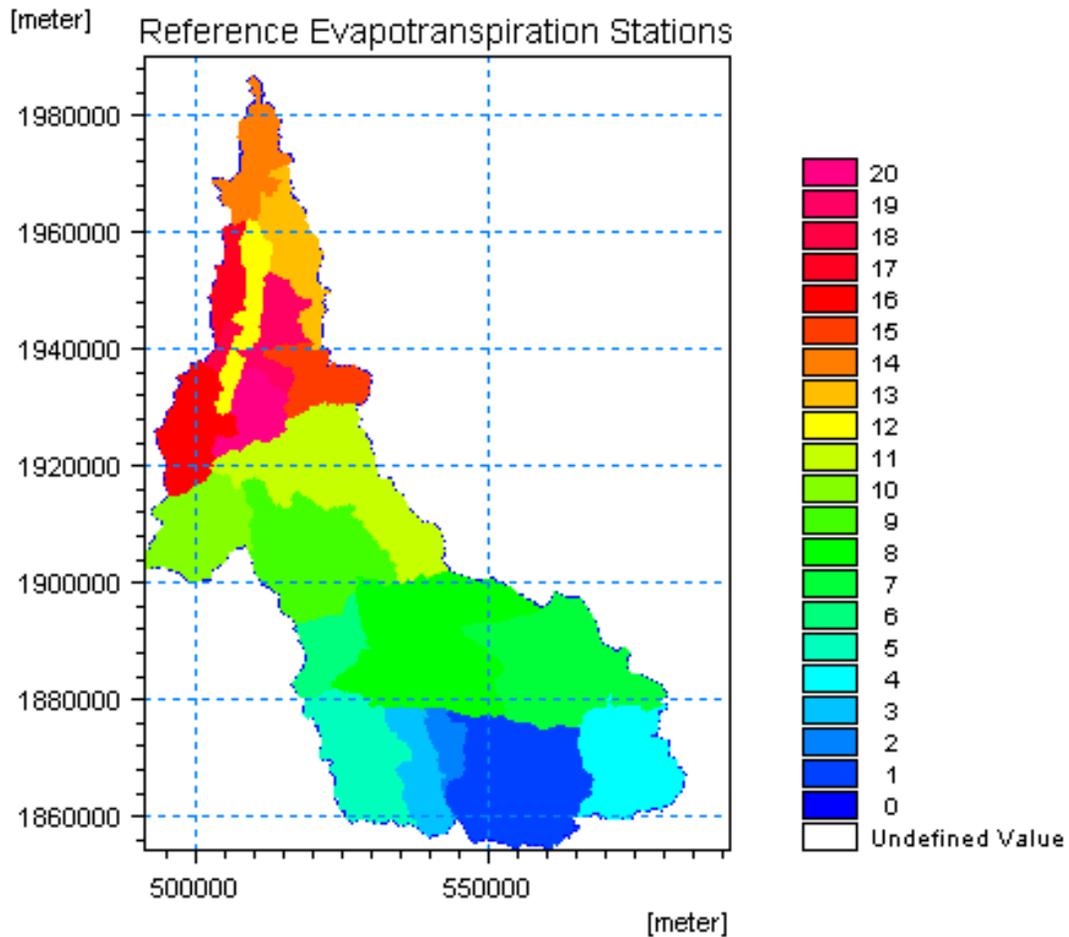


Figura 5.37. Área de influencia para la evapotranspiración de referencia

Para estimar la evapotranspiración de la cobertura vegetal de la cuenca se utiliza la información de uso actual del suelo, INEGI serie II 1990, a la que se le asigna los índices de acuerdo a cada vegetación.

C. Preparación de la información de cobertura vegetal. En la opción uso de suelo, correspondiente a vegetación, con la capa de uso de suelo, que se muestra en el apartado de caracterización de la cuenca, se identificaron dieciséis tipos de vegetación, en los que es necesario, acoplar la capa *.shp, que se elaboró en Arc Gis 9.3, a una base de datos sobre las características del cultivo, más representativo de la cobertura vegetal, en los que se requiere: el índice de área foliar (LAI), la profundidad de raíces (ROOT), el coeficiente de cultivo (Kc) y el intervalo de tiempo para cada etapa de desarrollo, cuadro 5.29.

The screenshot shows the MIKE Zero software interface with a table titled "User Defined Vegetation Development". The table has five columns: "End day", "LAI", "Root", and "Kc". The data is as follows:

	End day	LAI	Root	Kc
1	0	2	800	0.85
2	140	2.2	800	0.85
3	200	2.7	800	0.95
4	320	2.7	800	0.95
5	365	2	800	0.85

Figura 5.38. Base de datos para vegetación

Otros de los parámetros que es importante considerar para cada tipo de vegetación es el número de Manning, que se utiliza en el tema de flujo superficial, pero que es necesario tener en cuenta en esta base de datos, su descripción se presenta en el apartado 5.1.



Cuadro 5.29. Índice de área foliar, profundidad de raíces, coeficiente de cultivo y número de Manning para la cobertura vegetal de la cuenca

No.	Comunidad	Clave	Ciclo (días)	Índice de área foliar (m ² /m ²)	Profundidad de raíces (mm)	Coeficiente de cultivo (Kc)	Manning
1	Pastizal cultivado	C	365	2.86	800	0.89	0.032
2	Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes (plátano)	Tp	240	7.52	900	1.1	0.06
3	Agricultura de temporal con cultivos anuales (maíz)	Ta	125	2.84	760	0.62	0.02
4	Bosque de pino	P	3,650	6	1100	1	0.45
5	Bosque de pino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	P	3,650	6.3	1050	1	0.55
6	Bosque de pino-encino (incluye encino-pino)	Pq	3,650	6.5	1000	1	0.55
7	Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con vegetación secundaria	Pq	3,650	6.8	1100	1.1	0.6
8	Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	Q	3,650	6.8	1100	1.1	0.7
9	Bosque mesófilo de montaña	M	3,650	6.5	1000	1	0.8
10	Bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	M	3,650	6.8	1100	1.1	0.81
11	Selva alta y mediana perennifolia	Amp	3,650	7.5	900	1.2	0.82
12	Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	Amp	3,650	7.5	900	1.2	0.83
13	Selva baja perennifolia	Bp	3,650	7	900	1	0.84
14	Selva baja perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	Bp	3,650	7	900	1	0.845
15	Pastizal inducido	I	365	2.18	500	0.93	0.15
16	Popal-tular	Pt	3,650	2.23	600	1	0.005

Estos valores son promedio, ya que para cada etapa, se consideró cómo se modifica el área foliar, la profundidad de raíz y el coeficiente de cultivo para cada etapa de desarrollo. Con estos valores, se crea la base de datos para cada cultivo y mediante el tipo de archivo *.shp generado en Arc Gis 9.3 correspondiente al uso

de suelo y vegetación, se le asignó para cada código, los parámetros del cuadro 5.29, el valor del símbolo corresponde al número de cada uso de suelo del cuadro 5.29, los valores de 1, es el límite del modelo, el identificador 17 es para un uso de suelo de asentamiento humano y 18 para cuerpo de agua.

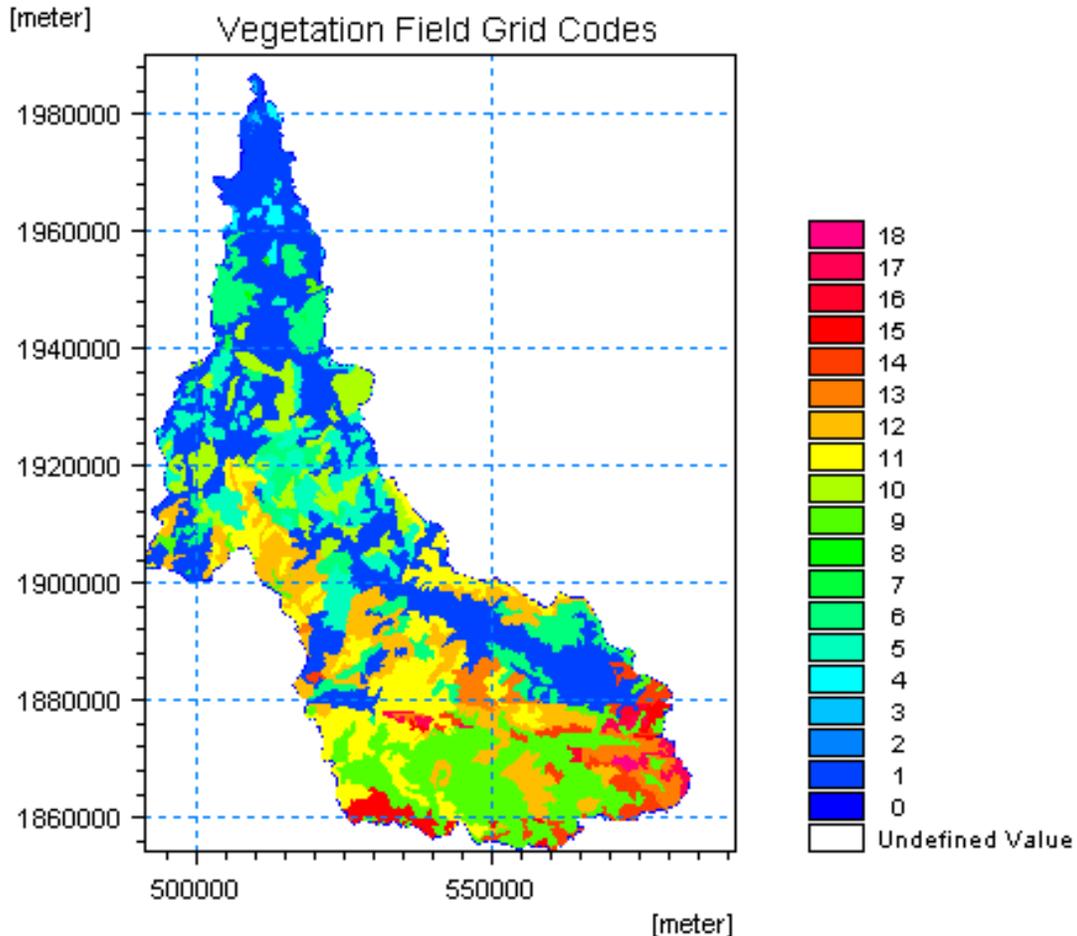


Figura 5.39. Uso de suelo y vegetación

Al ingresar la información del ciclo del cultivo, se indica la fecha de inicio y a partir de la cual se cuenta la duración del cultivo y las condiciones en las que se encuentre la zona, esto es muy importante, ya que en la zona, los ciclos de los cultivos son variables en el tiempo y en espacio.



5.2.4.4. Estimación del flujo superficial. Las variables que se auxilian en la simulación de este proceso son: la rugosidad de la superficie, la detención superficial y la lámina de agua en la superficie al inicio de la simulación.

A. Rugosidad de superficie. Para el número de Manning, se utilizó una distribución espacial, a partir de un archivo *.shp elaborado en Arc Gis 9.3, en el que se le asignó a cada cobertura un número de rugosidad, los cuales se presentan en el cuadro 5.29.

Sin embargo, cuando se quiere dejar una superficie de rugosidad constante, es necesario saber que el valor que se coloca es el denominar de la fracción, por ejemplo si en tablas es el valor es 0.02, que corresponde a un cultivo de maíz, el valor que se coloca en la casilla del número de Manning es de $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ya que se calcula como $(1/50 \text{ m}^{1/3}/\text{s} = 0.02)$

B. Detención superficial. Para estimar la detención superficial se consideró un valor de 0.01 mm, lo que indica que de una lluvia de 1 mm, se detiene el 1% de la lámina precipitada, esto se debe a las características de la cobertura, principalmente este concepto permite ser un buen botón de ajuste para el proceso de calibración.

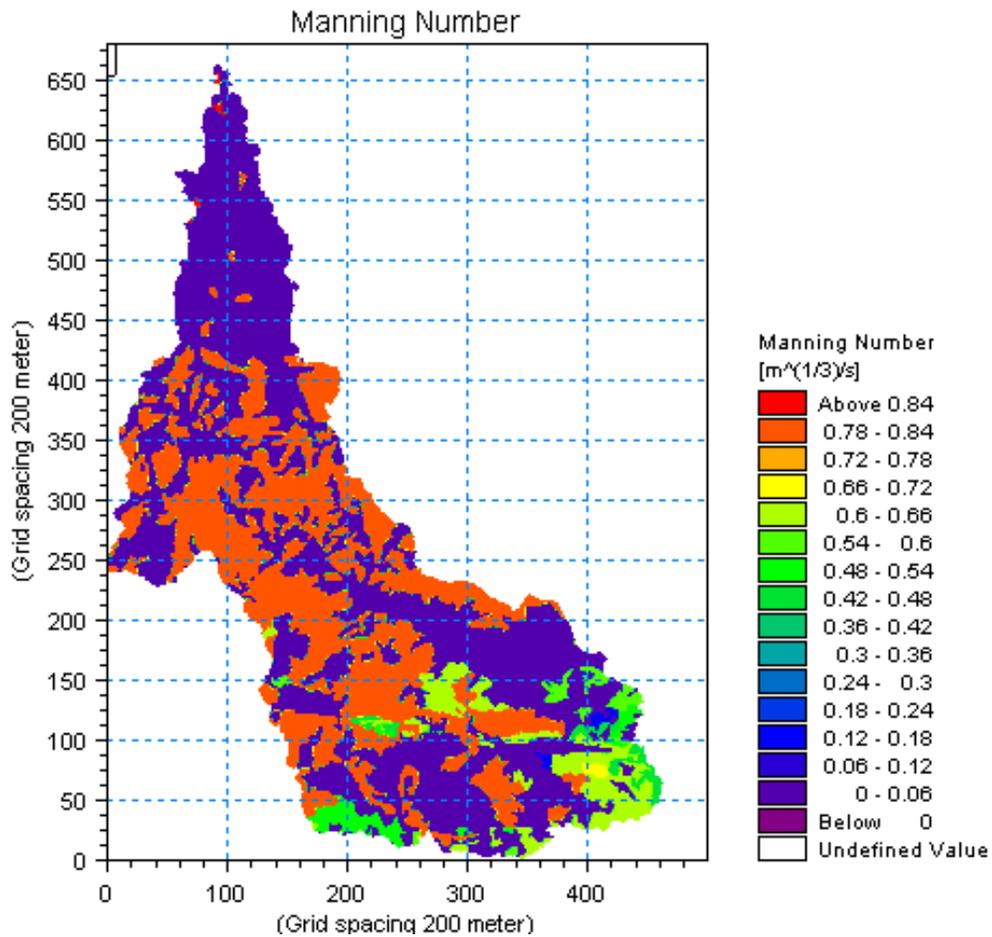


Figura 5.40. Número de Manning

Como se puede ver los valores oscilan entre 0.845 hasta 0.005 m^{1/3}/s, que corresponde a zonas con alta densidad a baja densidad de cobertura, en la superficie de los cultivos.



5.2.4.5. Estimación del flujo en la zona no saturada. Para el análisis del flujo en la zona no saturada, es necesario, preparar la base de datos de la conductividad hidráulica y la curvas de retención y humedad de los tipos de suelo que hay en la zona, en el apartado de edafología, se presentan 16 tipos de suelo, a los que fue necesario, establecer los parámetros de acuerdo al tipo de suelo cuadro 5.30, correspondiente a las variables necesarias para aplicar el modelo de Van Genuchten.

En el proceso de flujo en la zona no saturada se calcula la recarga del modelo de agua subterránea y está estrechamente ligada a la evapotranspiración real, ya que las raíces se encargan de eliminar el agua de la zona no saturada.

En las ecuaciones que se presentan en la descripción del proceso del modelo, requieren de los parámetros siguientes: contenido de humedad saturada (θ_s), contenido de humedad residual (θ_r), conductividad hidráulica saturada (K_s), α y n son los parámetros de Van Genuchten que depende de cada tipo de suelo, para este estudio se consideraron los valores que se presentan en el cuadro 5.30.



Cuadro 5.30. Valores medios para los parámetros de los suelos, en el modelo Van Genuchten

No.	Tipo de suelo	e_r	e_s	α	n	K_s	K_s
		cm^3/cm^3	cm^3/cm^3	$1/\text{cm}$	adim	cm/d	m/s
1	Franco arcilloso	0.085	0.400	0.029	1.252	5.880	6.806E-07
2	Franco arcilloso	0.085	0.400	0.029	1.252	5.880	6.806E-07
3	Franco arcilloso arenoso	0.069	0.386	0.060	1.486	52.505	6.077E-06
4	Franco arcilloso	0.085	0.400	0.029	1.252	5.880	6.806E-07
5	Franco arcilloso arenoso	0.084	0.360	0.048	1.365	20.880	2.417E-06
6	Arcillo arenoso	0.105	0.351	0.031	1.199	2.880	3.333E-07
7	Franco arcillo arenoso	0.067	0.406	0.045	1.340	28.443	3.292E-06
8	Arcillo arenoso	0.092	0.367	0.024	1.155	3.000	3.472E-07
9	Franco arcilloso arenoso	0.084	0.360	0.048	1.365	20.880	2.417E-06
10	Franco Arcilloso	0.072	0.398	0.039	1.323	31.043	3.593E-06
11	Arcilloso arenoso	0.074	0.391	0.067	1.529	205.720	2.381E-05
12	Franco arcilloso arenoso	0.084	0.360	0.048	1.365	20.880	2.417E-06
13	Franco limoso	0.063	0.434	0.032	1.281	13.560	1.569E-06
14	Franco arcillo arenoso	0.081	0.374	0.050	1.390	35.963	4.162E-06
15	Franco arcilloso arenoso	0.084	0.360	0.048	1.365	20.880	2.417E-06
16	Arcillo arenoso	0.094	0.355	0.039	1.282	11.880	1.375E-06

Al seleccionar el modelo, es necesario introducir los coeficientes teóricos, que se presentan en el cuadro anterior. El modelo grafica en forma automática, la curva de retención de humedad para cada unidad de suelo, figura 5.41.

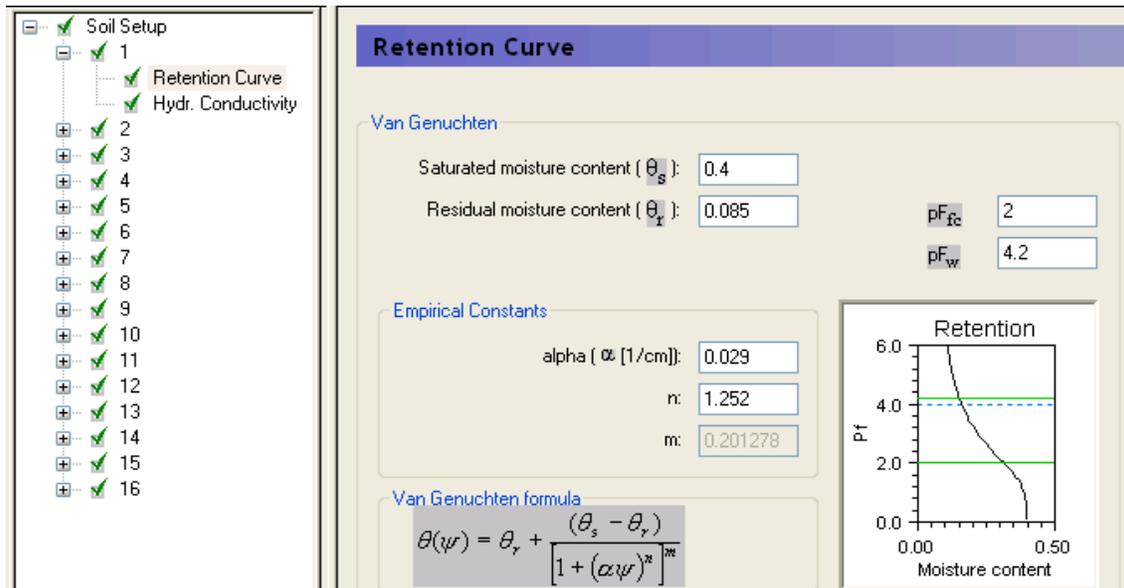


Figura 5.41. Curva de retención de humedad

De igual forma, para alimentar el modelo con los parámetros de conductividad hidráulica, se requiere de la introducción de los coeficientes teóricos, desarrollado por el servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos de América.

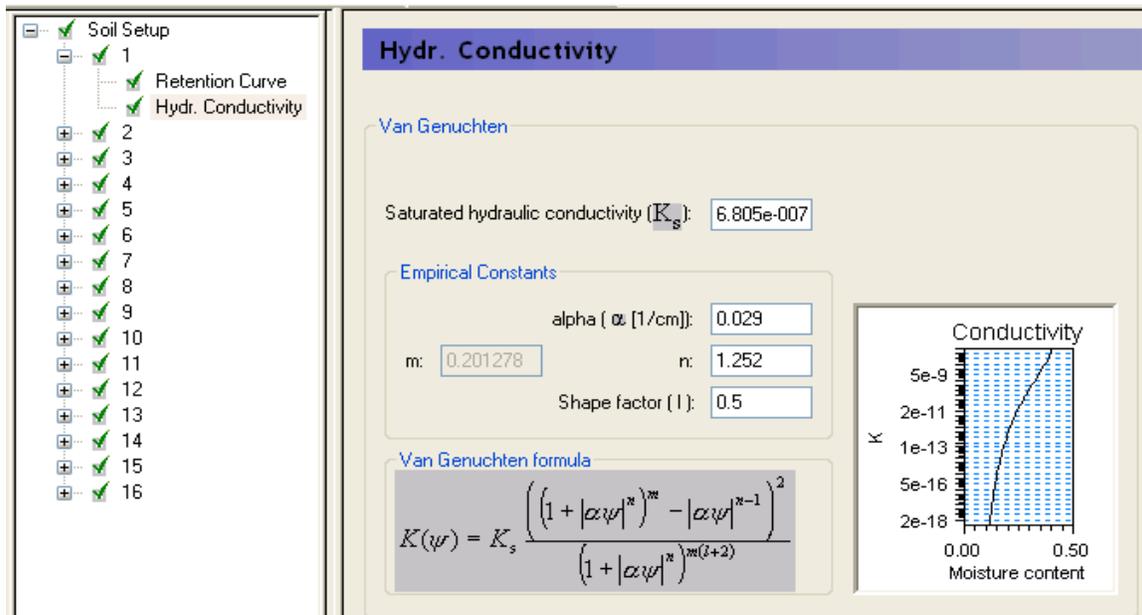


Figura 5.42. Modelo de conductividad hidráulica

Una vez que se tiene la base de datos para cada tipo de suelo, se tiene que asignar al archivo en formato *.shp, el identificador correspondiente, generando así el archivo *.dfs2, para el estudio aparecen los códigos para cada unidad de suelo, figura 5.43.

Uno de los conceptos que se deben de tener bien en cuenta, es la discretización horizontal de cada unidad de suelo; en esta se especifica la profundidad y el número de celdas que se desean formar, para tener el análisis por cada capa considerada. En todo el trabajo, se manejo una profundidad de 6 m, ya que se considera que el acuífero de la zona tiene una profundidad de hasta 5 m, de la superficie del terreno en las zonas bajas.

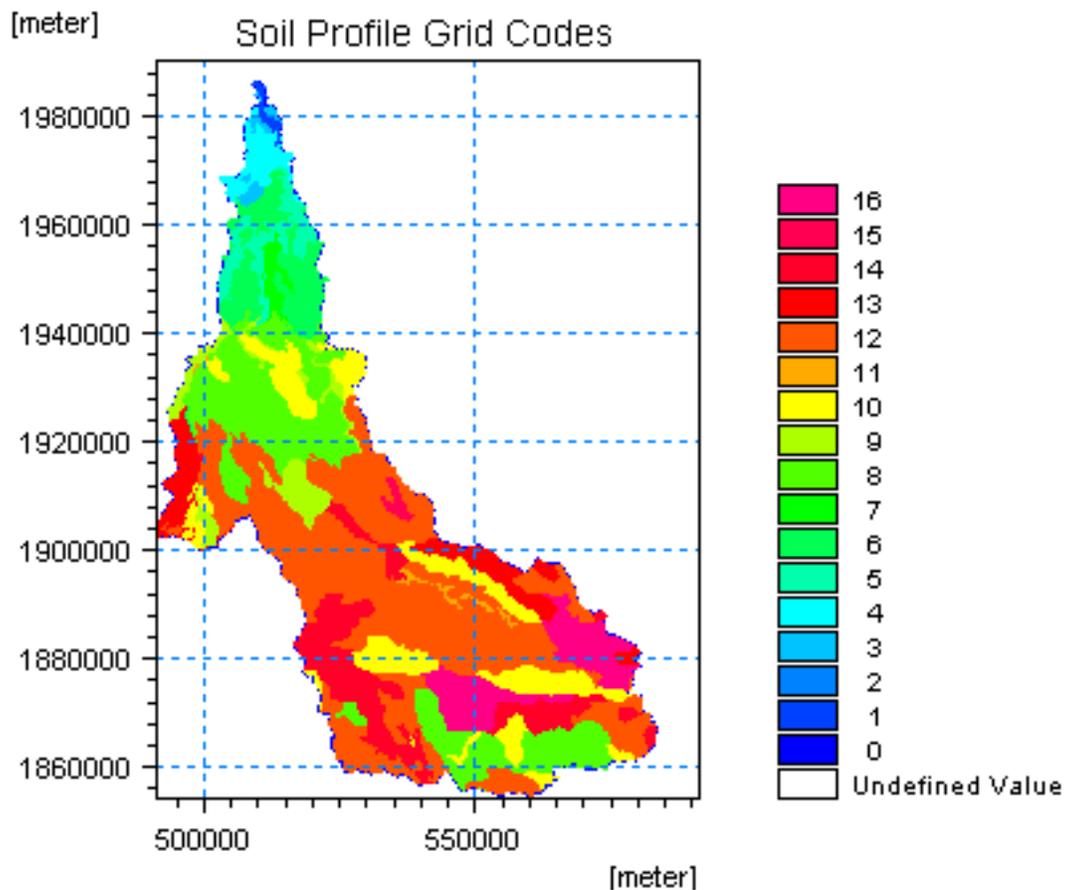


Figura 5.43. Unidades de suelo



5.2.5. Simulación del proceso lluvia-escurrimiento

La configuración del proceso de simulación, consiste en definir las características en que se realizará la simulación, definiendo la base de datos si fue introducida perfectamente.

A. Proceso de la configuración de simulación lluvia-escurrimiento. Se indica el direccionamiento de los resultados de la simulación, así como el reporte del balance de agua. El tiempo que se utilizó para realizar el proceso de simulación, fue de dos horas, con el objeto de que el balance hidrológico se pueda acoplar perfectamente al análisis hidráulico.

En detalles de la serie de tiempo, es necesario introducir el punto, con coordenadas X, Y donde se requieren los resultados, especificando el tipo de resultados entre los que se encuentran: Intercepción por el dosel del cultivo, profundidad del flujo superficial, escurrimiento en la dirección X, escurrimiento en la dirección Y, infiltración en la zona no saturada, evaporación real del agua estancada, contenido de agua en la zona de raíces, etc.

En detalles de la serie de tiempo del modelo hidráulico, se especifica en esta sección mediante el nombre y el cadenamamiento del río, los datos observados de nivel o de gasto. Se pueden exportar, los archivos en formato *.dfs2, que corresponde a mallas como salidas de datos, entre estos puntos se encuentra la precipitación, la transpiración actual, la evaporación del suelo, la evaporación de la intercepción, el escurrimiento superficial, el escurrimiento en X, en Y, las fuentes externas del escurrimiento, intercambio entre la zona saturada y no saturada, infiltración de macroporos, etc. Pero recordar que al seleccionar mayor cantidad de información, el tiempo de procesamiento se hace más tardado.

En el caso del estudio, es necesario conocer la proporción del balance que se utiliza para producir escurrimiento, ya que la forma de comprobar los datos, es mediante el escurrimiento medido en la estación hidrométrica.

B. Pre-procesamiento (PP). Antes de aplicar el preprocesador, es necesario actualizar la base de datos, para verificar que todos los elementos que se establecieron se carguen perfectamente, el indicador, será que todos los componentes del modelo aparezcan con un símbolo en color verde, figura 5.44.

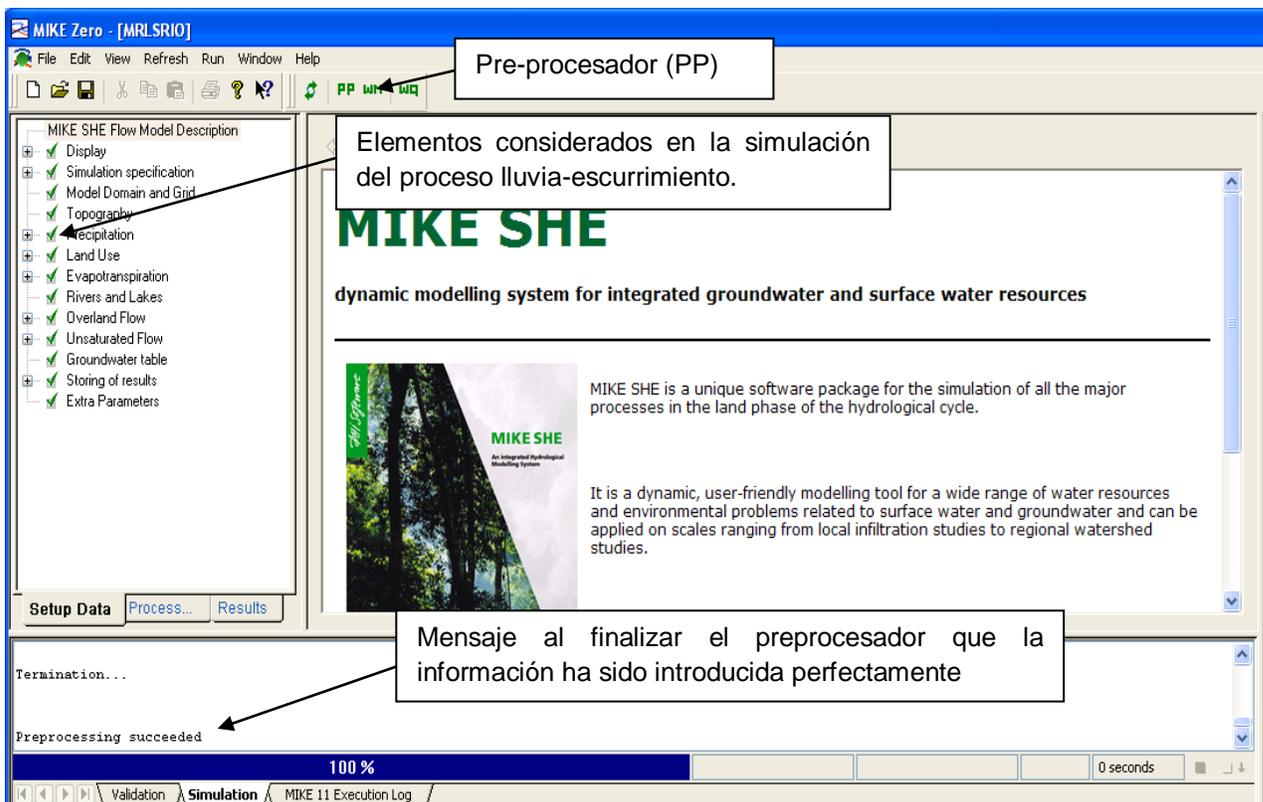


Figura 5.44. Elementos del modelo hidrológico

La función del pre-procesador consiste en verificar que los datos que se han introducido al modelo han sido cargados perfectamente, esto se realiza antes de realizar el proceso del movimiento del agua en el modelo. Al finalizar el preprocesador, se presenta un mensaje de que el pre-procesamiento se ha



realizado con éxito, de lo contrario, en el apartado de mensajes una advertencia indicará en qué lugar se produjo la inconsistencia.

C. Estimación del movimiento del agua (WM). Para estimar el movimiento del agua en la fase de inicialización del modelo MIKE SHE, se trabajó por grupos iniciando de acuerdo a sus especificaciones, como son: tamaño de celda, fecha de inicio del evento y hora de inicio. El modelo revisa, todos los elementos que participaran en el balance hídrico. El balance se realizó en intervalos de media hora, para que la simulación sea estable, considerando que el acoplamiento entre los modelos MIKE SHE y MIKE 11, requiere de intervalos cortos para que la simulación, se lleve a cabo. El proceso se llevó aproximadamente por 30 minutos en simular eventos de escurrimiento con los datos de precipitación del 18 al 23 de octubre (5 días) del 1989, el archivo que se procesa es de 680 filas por 500 columnas, lo que da una cuadrícula de 340,000 celdas, con un área total incluyendo los valores de 0 en el modelo con 13,600 km², figura 5.45.

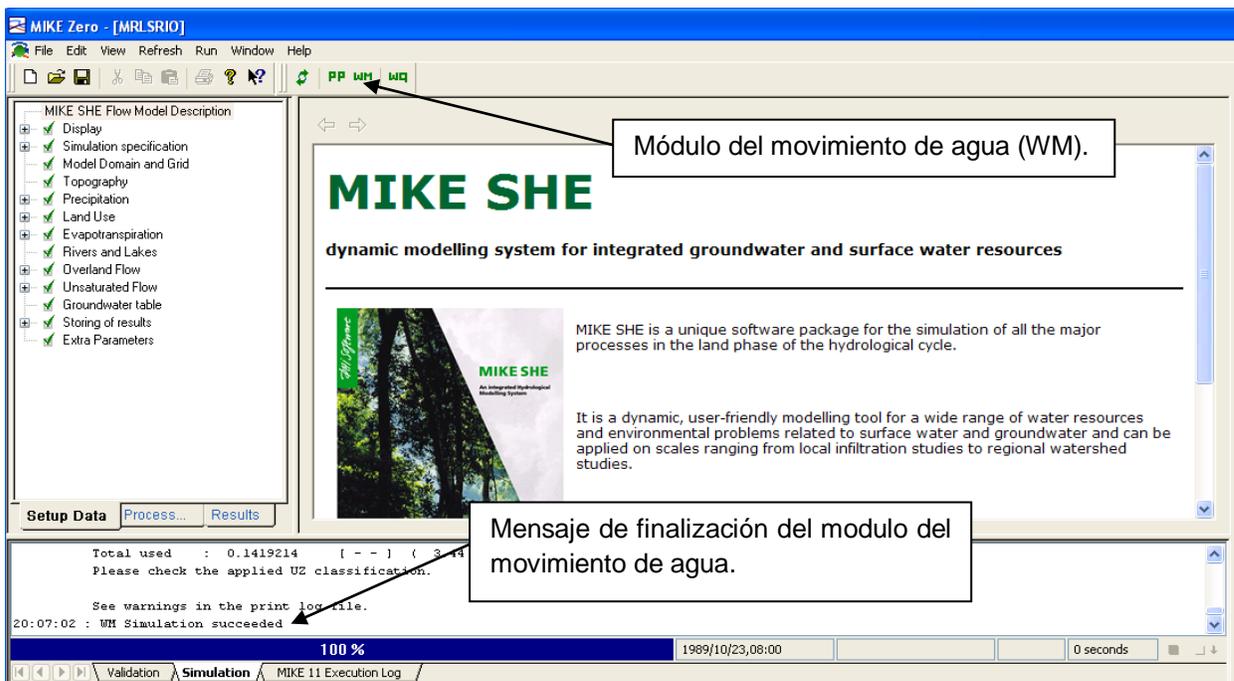


Figura 5.45. Estimación del movimiento de agua (WM)



5.2.6. Modelación hidráulica con el modelo MIKE 11

El modelo MIKE 11 incluye módulos básicos para: hidrología, hidrodinámica, advección-dispersión, transporte de sedimentos cohesivos y calidad de agua.

En este estudio, solo se modeló el flujo no permanente y del tipo hidrodinámico.

5.2.6.1. Datos de entrada. Para aplicar el modelo MIKE 11, es necesario tener un mínimo de datos para poder realizar la simulación. Estos datos en la mayoría de veces se obtienen experimentalmente, a continuación se presenta un listado con los datos de entrada que se necesitaron para hacer la simulación.

A. Características geométricas del cauce (Dimensiones del cauce y forma geométrica de las secciones transversales), en todo su desarrollo.

B. Características hidráulicas (Coeficiente de Rugosidad y el escurrimiento generado en el modelo hidrológico).

C. Características topográficas del flujo estudiado (distancias y alturas acotadas frente a un nivel de referencia del perfil de la superficie libre en las estaciones de aforo).

D. Generación de las características geométricas del río La Sierra. Para la generación de la geometría del cauce, se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones versión 2.0 (INEGI, 2012), en formato *.TIN, utilizando el programa Hec GeoRas, que es una extensión de Arc Gis 9.3, se requiere digitalizar, el eje centro del cauce y las márgenes del río.

El primer procedimiento es definir mediante los comandos de Hec GeoRAS, en crear el centro de línea, figura 5.46, designar el centro y las márgenes.

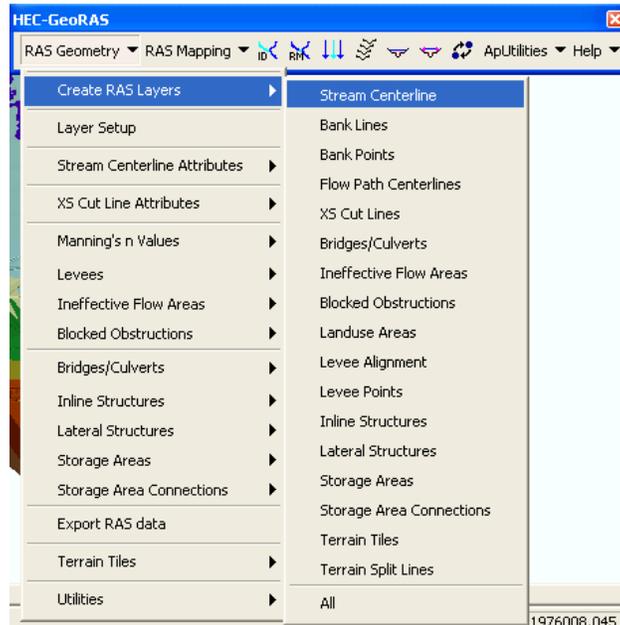


Figura 5.46. Comandos en Hec GeoRAS para la generación de las secciones transversales

En la ventana de salida de las secciones transversales (Layer setup), seleccionar secciones transvesales (XS Cut Lines), generando las secciones transversales con un separación de 1,000 metros, y un ancho de la sección de 450 metros, figura 5.47.

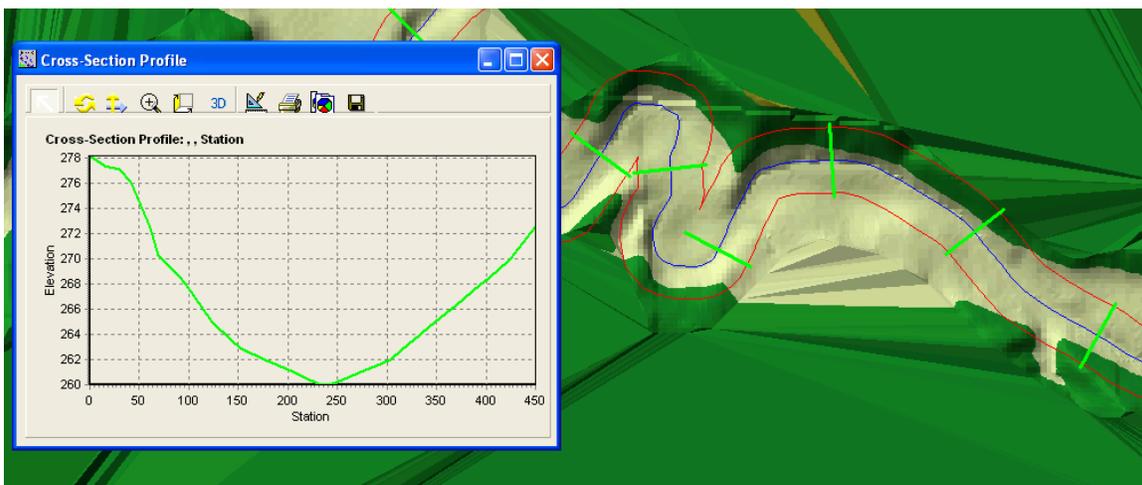


Figura 5.47. Características geométricas del río La Sierra



Para generar los archivos de datos geométricos, es necesario utilizar el programa Hec RAS, en la opción de importar datos geométricos al desplegar las secciones y el eje del cauce, se presenta el cadenamamiento correspondiente a cada sección transversal, figura 5.48.

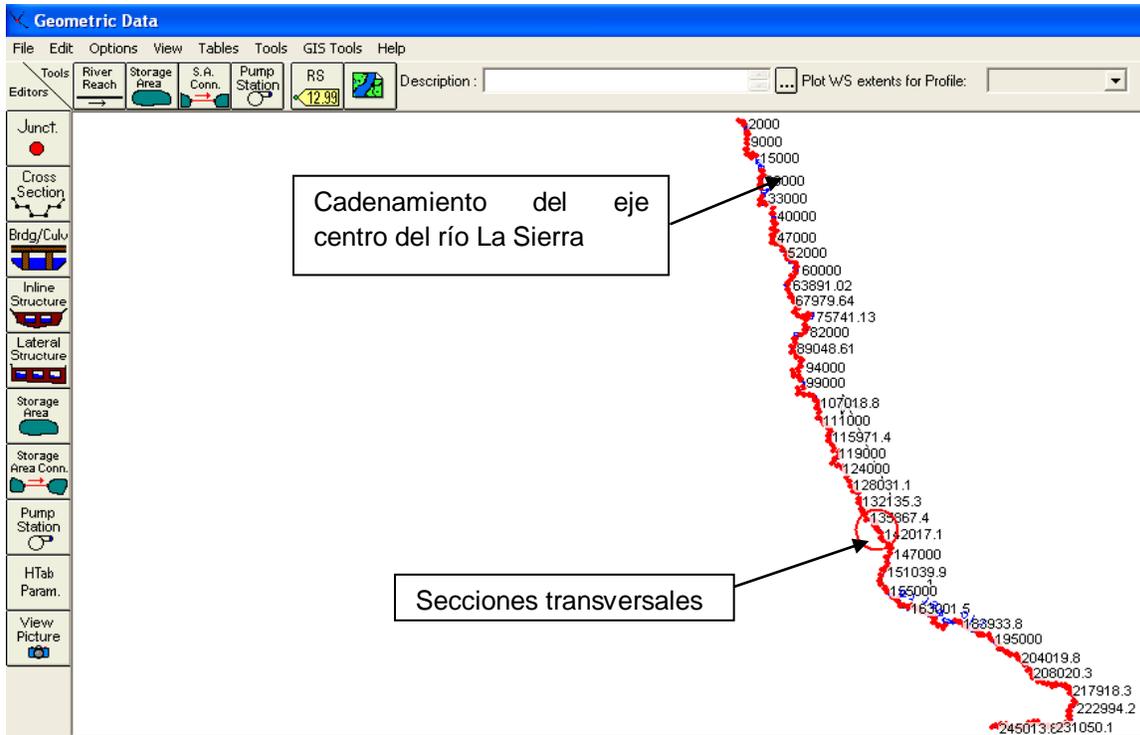


Figura 5.48. Seccionamiento del río La Sierra

Al desplegar una sección transversal, figura 5.49, la información que contiene es el nombre del río, el cadenamamiento para cada sección transversal y las coordenadas (X,Y) que configuran la estación en metros sobre el nivel del mar.

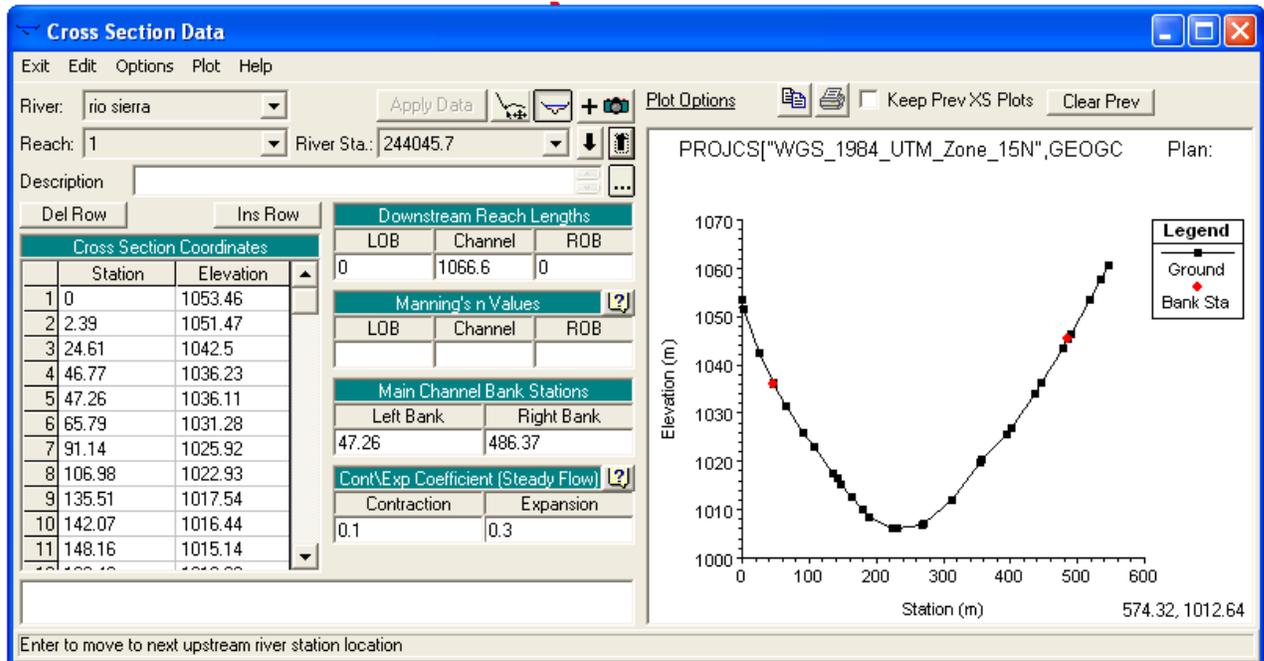


Figura 5.49. Sección transversal en el cadenamamiento 244+045

Con estos datos se pasan directamente a un archivo de texto, en el que es necesario preparar un archivo de entrada para que sea leído por el programa MIKE 11. En total se generaron 294 secciones transversales, cuadro 5.31.

Cuadro 5.31. Secciones transversales generadas, para cada río

No.	Río	Cave	Secciones
1	Amatán	AMAT	2
2	Huitiupan	HUIT	37
3	Puyacatengo	PUYA	2
4	La Sierra	RLS	208
5	San Pedro	RSP	40
6	Plátanos	SNP	2
7	Teapa	TEA	3
8	Total=		294

5.2.6.2. Preparación de la información. A continuación se presenta el procedimiento que sigue para preparar la información de la simulación. Se abre MIKE 11, aparece la ventana figura 5.50 que lleva el nombre de MIKE Zero en la



parte superior. Se crea una nueva aplicación, se selecciona la aplicación de simulación que es la que permite manejar todos los datos y la liga a un solo sistema.

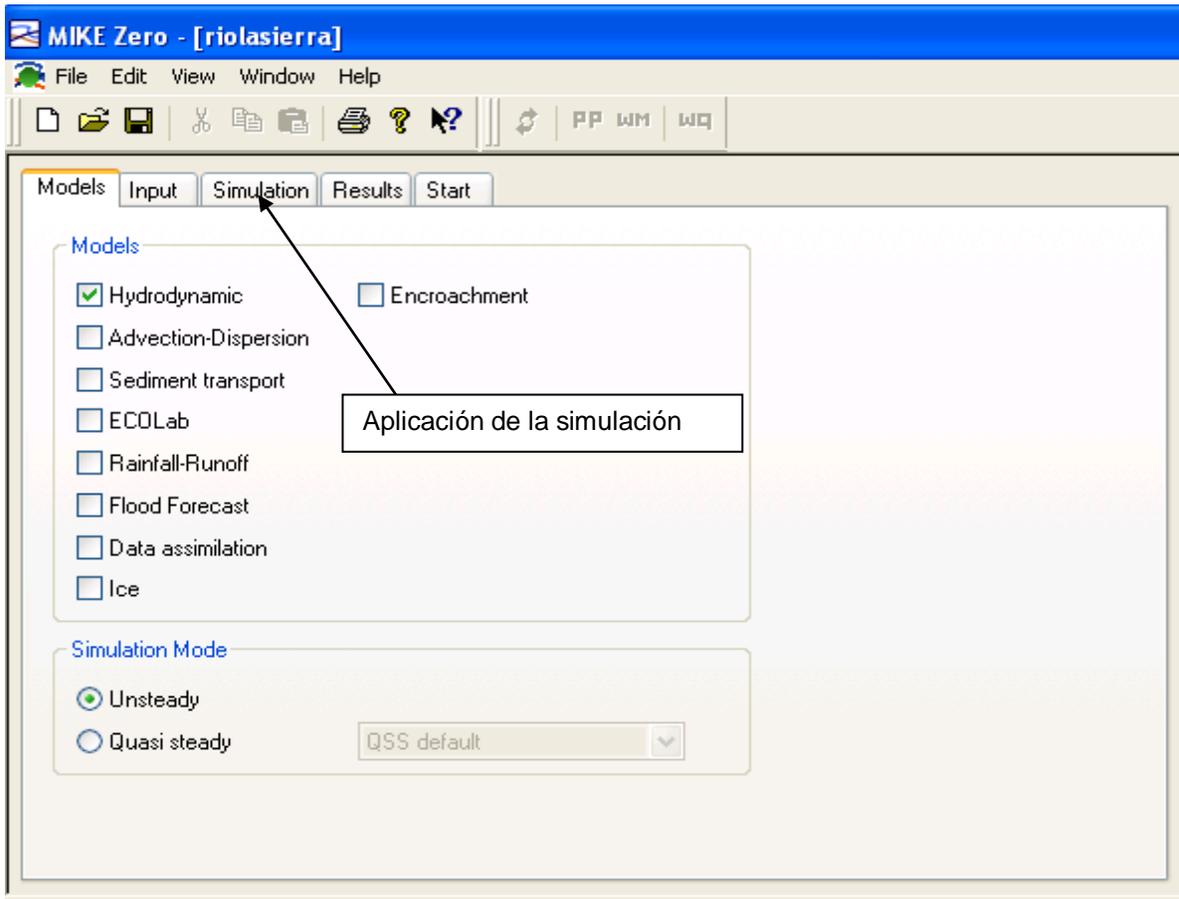


Figura 5.50. Interface inicial de MIKE 11

La interface guarda un archivo de riolasierra.sim, el cual vincula los diferentes componentes como son: red hidrográfica riolasierra.nwk11 que es un archivo para especificar la geometría del cauce, el archivo riolasierra.xns11, en donde se especifica: la información de la geometría de las secciones transversales de los cauces que se consideraron en el trabajo y los valores de Manning, para las condiciones de contorno riolasierra.bnd11; las condiciones de frontera de aguas arriba y aguas abajo del cauce. En modelos hidrodinámicos se requiere de

especificar los parámetros hidrodinámicos del cauce mediante el archivo riolasierra.hd11.

5.2.6.3. Configuración topográfica de la red hidrográfica. Con la aplicación de la red hidrográfica, figura 5.51, extensión *.nwk11, se dibuja el cauce y se ven en forma gráfica los puntos del cauce en el plano de ejes coordenados X, Y.

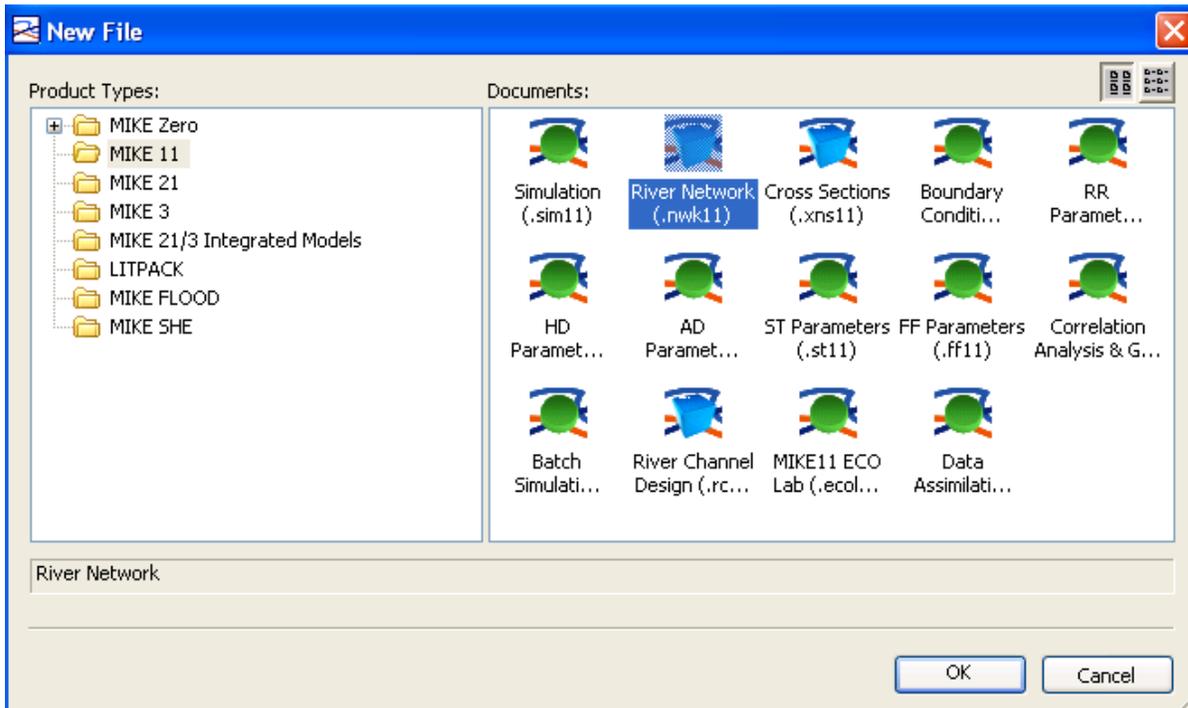


Figura 5.51. Aplicación para la configuración de la red hidrográfica

A. Red hidrográfica nueva. El cuadro de diálogo de la aplicación presenta la ventana para indicar las coordenadas extremas; aparece automáticamente cuando se crea una red hidrográfica nueva. Estas coordenadas se indican en unidades de proyección cartográfica que se utiliza es este estudio es Universal Transversa de Mercator (UTM) en la zona geográfica 15 Norte, figura 5.52.

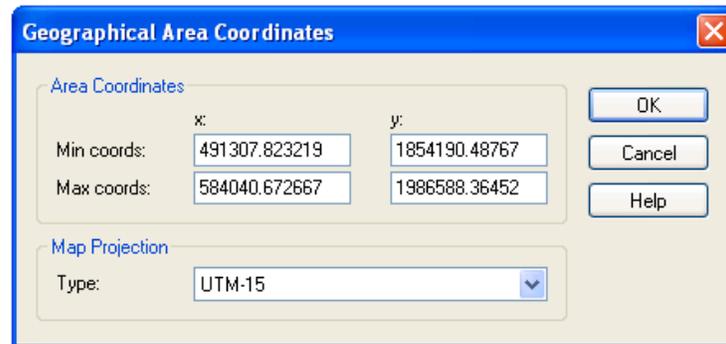


Figura 5.52. Coordenadas extremas y proyección del área de trabajo

Al seleccionar el área de trabajo, aparece un plano cartesiano, en metros, figura 5.53. al igual que en el paso anterior se guarda la aplicación en la carpeta de archivos creada.

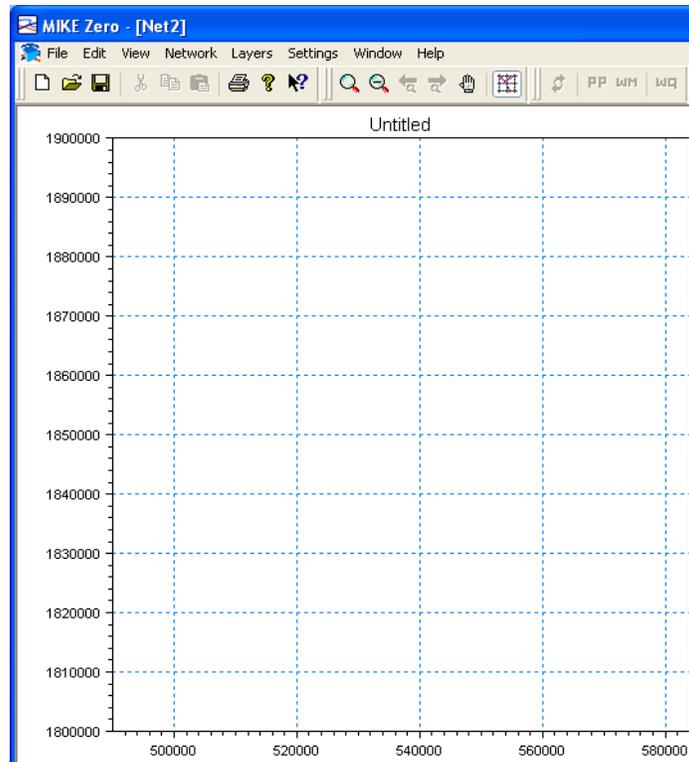


Figura 5.53. Plano cartesiano para la conformación de la red hidrográfica

Para iniciar la conformación de la red hidrográfica, se recomienda que se tenga el dibujo de la red hidrográfica en formato *.shp, para importar una capa *.shp a



MIKE 11, en el submenú adicionar o remover, seleccionar el archivo *.shp, que incluye el centro del cauce.

Una vez que se tiene el eje del cauce, se digitaliza utilizando el lápiz del programa para adicionar los puntos de la planta de los cauces. Para este estudio, para la configuración del cauce se utilizaron 1902 puntos. Una vez que se colocaron todos los puntos se definieron los tributarios de los extremos aguas arriba del río principal hacia aguas abajo, desembocadura del río. Así quedaron conectados todos los puntos a lo largo de la rama principal, con una línea de color negro. Esta operación se repitió para los afluentes, iniciando en el extremo aguas arriba del afluente y terminando en el último punto antes de unirse a la rama principal, en este caso se conformaron 7 ramas, figura 5.54.

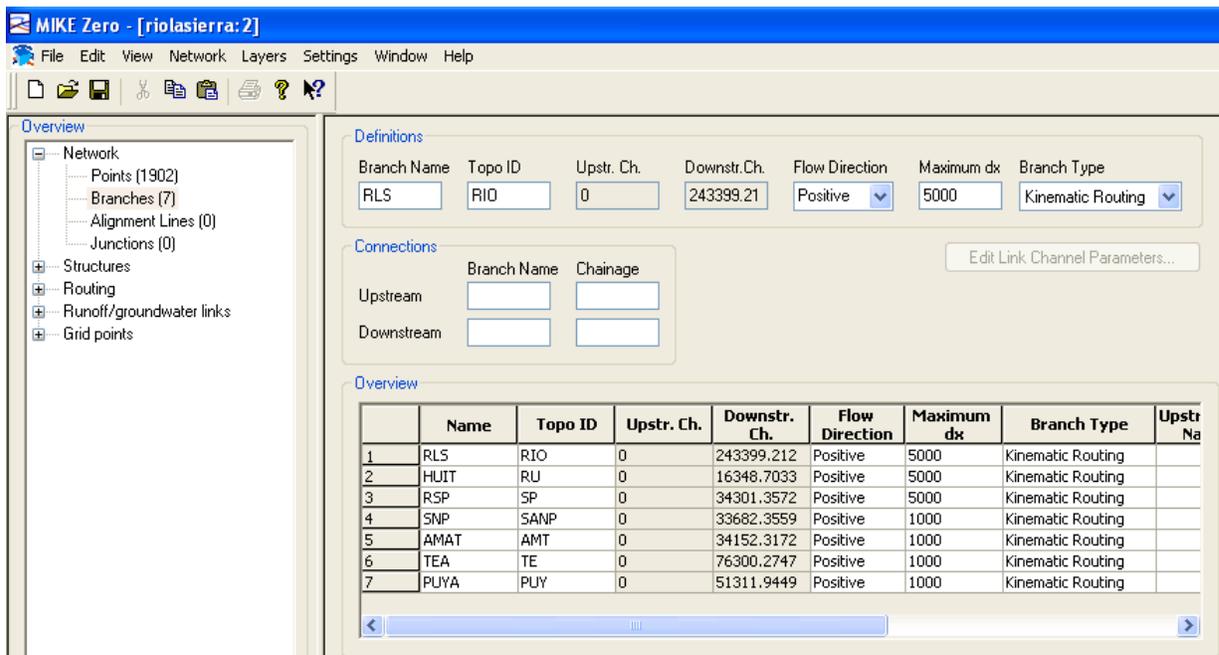


Figura 5.54. Propiedades de la red hidrográfica construida

Para definir las propiedades de la red hidrográfica, en la tabla de propiedades de la red, para cada rama, se especificó el nombre de el ID Topo, el ID de Topo se hace referencia a la base de datos de las secciones transversales. Si el ID de



Topo no coincide con el ID del topo en la base de datos de la sección transversal, entonces la referencia fallará.

Las ramas se conectaran entre sí, seleccionado el extremo de aguas abajo de la sección de conexión, al punto de confluencia en el cauce principal. El modelo MIKE 11 muestra una línea que indica que las ramas están conectadas, se repite el procedimiento para conectar otro afluente al cauce principal.

Una vez ingresada la información de la configuración de la red, se puede ver, la red hidrográfica con los identificadores para cada cauce: el nombre y la longitud del tramo, sobrepuestos en un sistema coordenado, figura 5.55.

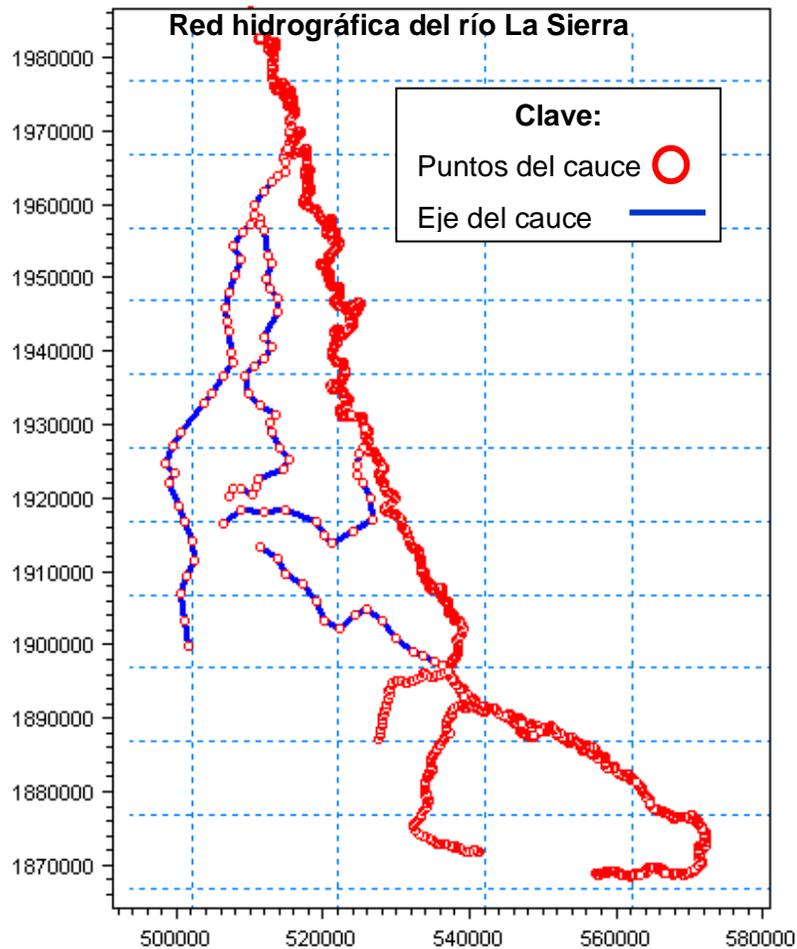


Figura 5.55. Red hidrográfica para simulación hidráulica



Cuando el archivo de la red se ha configurado, se añade a la aplicación de simulación. El documento simulación riolasierra.sim11, contiene los tipos de archivo válidos que forman parte del proyecto actual.

A. Configuración de las secciones transversales. Las secciones transversales previamente procesadas en el punto 5.4.1.1, con coordenadas X,Y en UTM y elevación en msnm, en formato *.txt, figura 5.56, que contiene, el ID Topo: identificación topográfica, nombre del río: RLS, El cadenamiento en el cauce, el número consecutivo de la sección transversal y las coordenadas X,Y de las secciones transversales en UTM, se introducen mediante el uso de un bloc de notas, debido a la cantidad de secciones procesadas, para este caso se trabajaron 294 secciones transversales, cuadro 5.31.

```
RLS - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
RIO
RLS
0.000
COORDINATES
0
FLOW DIRECTION
0
DATUM
0.00
RADIUS TYPE
0
DIVIDE X-Section
0
SECTION ID
1
INTERPOLATED
0
ANGLE
0.00 0
RESISTANCE NUMBERS
0 1 1.000 1.000 1.000 1.000 0.000
PROFILE
21
0.000 1020.450 1.000 <#1> 0 0.000 0
1.010 1020.380 1.000 <#0> 0 0.000 0
30.430 1018.270 1.000 <#0> 0 0.000 0
41.090 1017.500 1.000 <#0> 0 0.000 0
51.820 1017.000 1.000 <#0> 0 0.000 0
64.100 1017.000 1.000 <#0> 0 0.000 0
81.180 1016.630 1.000 <#0> 0 0.000 0
85.970 1016.520 1.000 <#0> 0 0.000 0
```

Figura 5.56. Estructura del archivo RLS.txt para secciones transversales



Cuadro 5.32. Número de puntos dibujado en planta

No.	Río	Coordenada X	Coordenada Y	Longitud en metros
1	RLS	555,160.00	1,872,040.00	0.00
2	RLS	555,200.00	1,872,020.00	44.72
...
1,659	RLS	509,190.00	1,985,910.00	243,399.21
1,660	HUIT	525,548.90	1,890,276.20	0.00
1,661	HUIT	525,604.01	1,890,764.00	490.90
...
1,696	HUIT	534,850.00	1,899,570.00	16,348.70
1,697	RSP	539,326.62	1,874,932.80	0.00
1,698	RSP	538,967.56	1,874,981.90	362.40
...
1,804	RSP	537,200.00	1,896,230.00	34,301.36
1,805	SNP	509,280.00	1,916,390.00	0.00
1,806	SNP	511,570.00	1,914,850.00	2,759.66
...
1,819	SNP	534,260.00	1,900,440.00	33,682.36
1,820	AMAT	504,320.00	1,919,770.00	0.00
1,821	AMAT	506,690.00	1,921,550.00	2,964.00
...
1,834	AMAT	523,420.00	1,930,030.00	34,152.32
1,835	TEA	499,500.00	1,902,900.00	0.00
1,836	TEA	498,950.00	1,906,410.00	3,552.83
...
1,873	TEA	512,950.00	1,970,660.00	76,300.28
1,874	PUYA	505,140.00	1,923,280.00	0.00
1,875	PUYA	505,520.00	1,924,430.00	1,211.16
...
1,902	PUYA	508,610.00	1,961,730.00	51,311.95

Para introducir la información de las secciones transversales del cauce, que se requieran para dividirlo, se agrega la misma estructura de la figura 5.56. En un mismo archivo de texto, se pueden presentar todas las secciones que conformen la red hidrográfica, el nombre y el identificador será el que direcciona a que rama le pertenece la sección y el cadenamiento.

Una vez que se tiene todo el archivo de las secciones transversales, es necesario dirigirse a la plataforma de MIKE Zero, se selecciona archivo, nuevo, y se elige el archivo de secciones transversales con extensión riolasierra.xns11, el cual se presenta inicialmente una pantalla en blanco, a la derecha, se encuentra la zona del gráfico de la sección transversal, la izquierda, las propiedades de la sección, nombre del cauce, identificador, cadenamiento, entre otros. Se importa el archivo secciones.txt, figura 5.57.

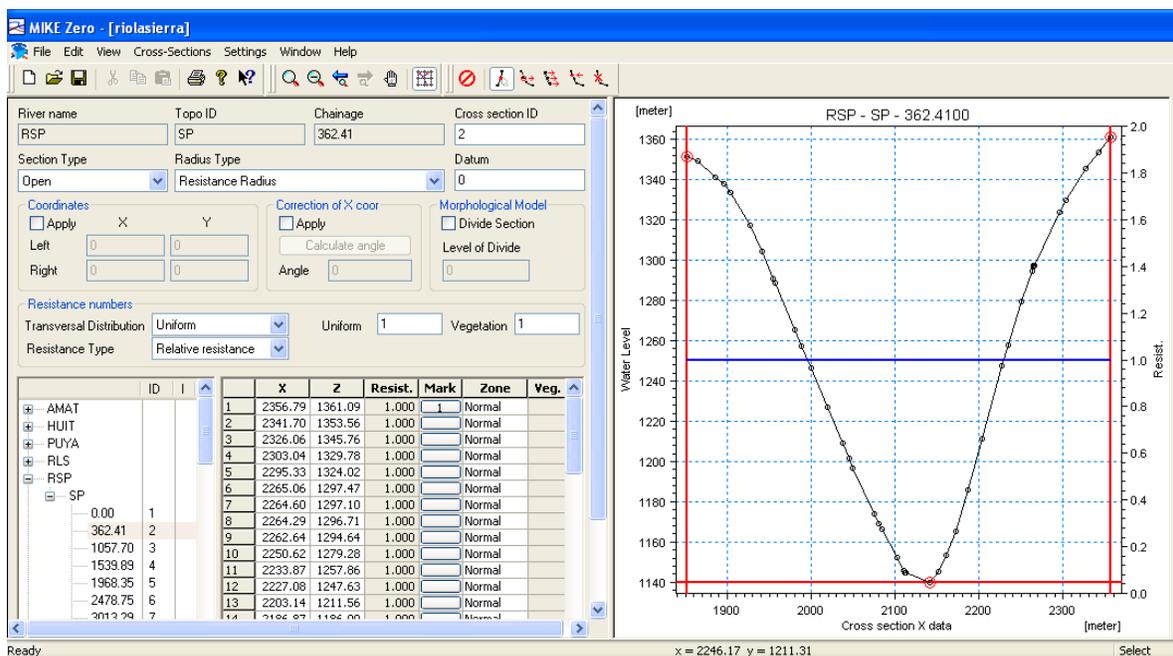


Figura 5.57. Ejemplo de presentación de una sección transversal del rio San Pedro, Km 0+362.41

En la gráfica de la sección transversal al cauce, figura 5.49, se presentan marcadas las elevaciones, máximas en las márgenes, la rasante, en el centro del cauce, el nivel del agua y la resistencia hidráulica.

Para verificar la introducción de las secciones, por cada rama, se presenta la ruta completa de donde se están tomando los datos, del archivo de las secciones transversales, esto garantiza que la información ha sido introducida



correctamente. Para asegurar que las secciones transversales se identifican en cada cadenamiento de la red, se presenta en planta los puntos de localización de las secciones transversales consideras el cauce principal y cada uno de sus afluentes considerados.

B. Condiciones de frontera. Para indicar las condiciones de frontera de cada cauce, es necesario que al nodo inicial del cauce y a la salida en la rama principal, se le aplique un tipo de condición de frontera del nivel de agua, esto se realiza para cada inicio y final de la red. Una vez que se han establecido las fronteras, se guardan en el archivo correspondiente a *.bnd11 en donde se establecen las condiciones de frontera (riolasierra.bnd11), se introducen los niveles constantes que se esperan tener en la salida del cauce y el flujo base del río, Figura 5.58.

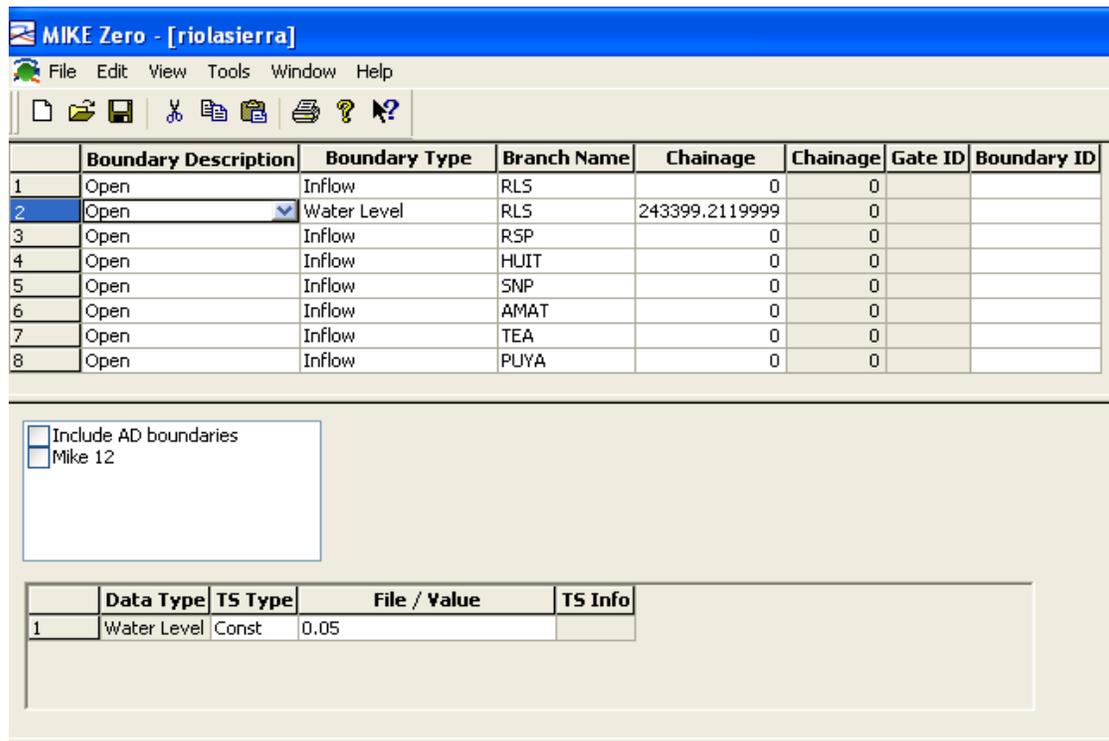


Figura 5.58. Condiciones de frontera archivo riolasierra.bnd11

C. Parámetros del modelo hidrodinámico. Se configuran los parámetros hidráulicos como: el coeficiente de rugosidad, el caudal base, el nivel de agua al inicio de realizar la simulación, además se deben colocar las cotas de la superficie libre en $t = 0$ al inicio de la simulación, se podrá elegir el tipo de ola que se simulará (cinemática, dinámica, o totalmente dinámico).

Para este estudio, se utilizó como 0, el nivel inicial y final, debido a que estos datos serán colocados por el modelo hidrológico, 1 al factor de topografía, la fricción en el cauce fue el coeficiente de Manning con 0.024, valor para ríos con una pedregosidad alta, utilizado en la ecuación de Manning, para la resistencia, ya que es un modelo totalmente dinámico.

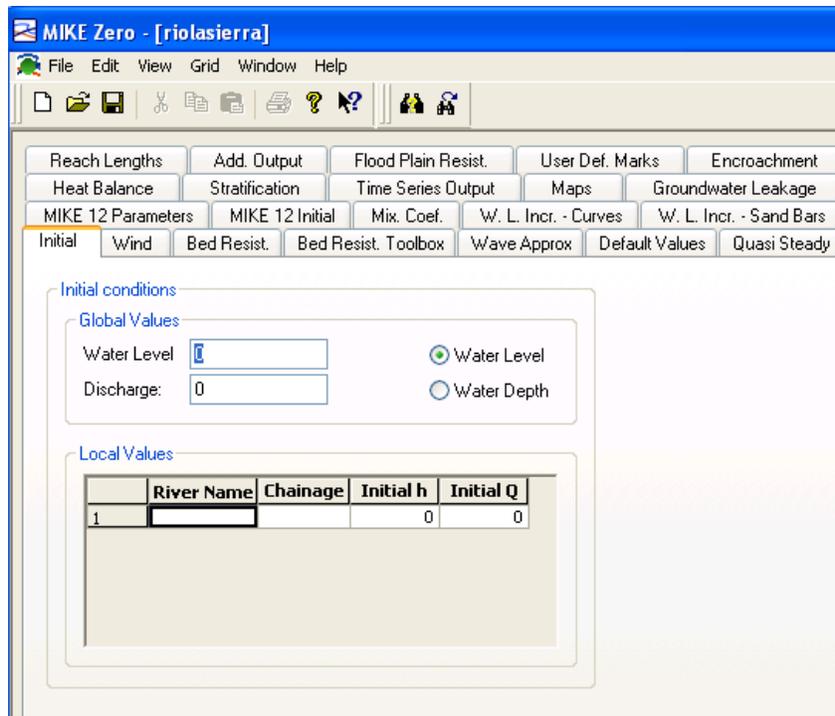


Figura 5.59. Parámetros del modelo hidrodinámico riolasierra.hd11

D. Acoplamiento del modelo MIKE 11 con MIKE SHE. Para que el modelo hidrológico MIKE SHE pueda transmitir la información para realizar el tránsito de la avenida en MIKE 11, se necesita que en el cuadro de propiedades, de la red

hidrográfica de MIKE SHE, en el apartado de unir la escorrentía superficial con el flujo subterráneo, se incluyan todas las ramas. El tipo de escurrimiento que se estableció para el estudio, fue que se incluyera, tanto lo que escurre superficialmente, como lo subterráneo, ya que existe una relación entre lo que se infiltra en los ríos y las propiedades de la zona no saturada. Y el coeficiente de permeabilidad fue de 0.00001 m/s, Figura 5.60.

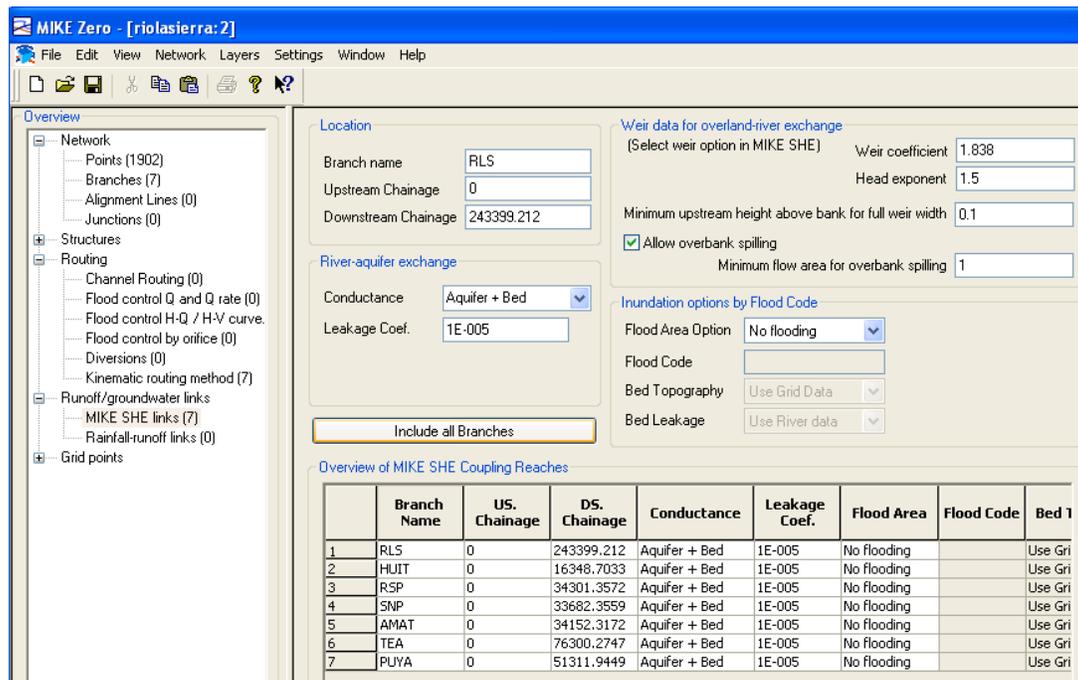


Figura 5.60. Acoplamiento del modelo hidrológico con el hidráulico

D. Consideraciones finales para la simulación. En la interface general de MIKE 11, se especificó como periodo de simulación para obtener los hidrogramas, de las 8:00:00 am del día 18/10/1989 a las 8:00:00 am del día 23/10/1989 (5 días, 120 horas), con un paso de tiempo constante, de 15 minutos, lo que resulto en 480 pasos de 15 minutos.

Finalmente para ver si la simulación esta lista y el estatus de validación deberá ser indicado por un semáforo en color verde, Figura 5.61, si aparecen los semáforos en rojo o amarillo quiere decir que el programa no está listo para ejecutar la



compilación. Después de ser revisado todo y que el semáforo esté en verde se inicia y se tendrá un mensaje que la simulación se ha completado, en caso contrario de que se presente alguna advertencia, cerciorarse de donde se produjo y cuál ha sido el acuse y proceder a una corrección.

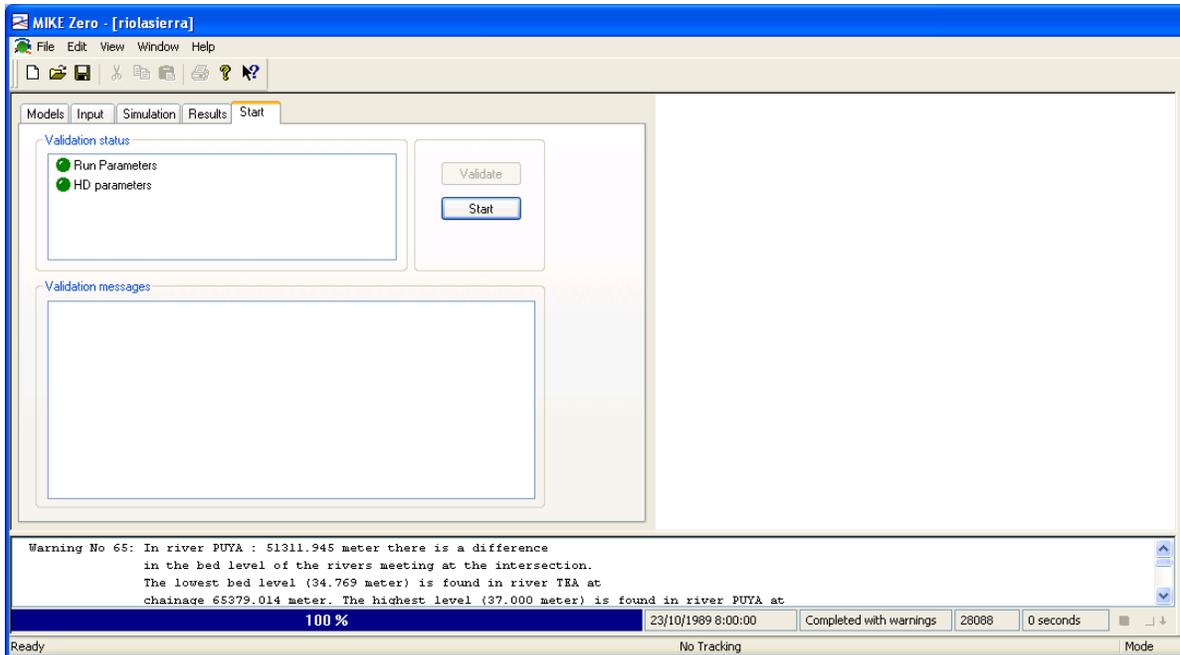


Figura 5.61. Proceso de simulación

E. Simulación hidráulica con MIKE 11. Una vez que el modelo tiene los datos necesarios e introducidos adecuadamente, se realizó la simulación. Los resultados obtenidos de la simulación se abren en el programa MIKE VIEW. Figura 5.62

Sin embargo es importante mencionar que al primer intento de realizar la simulación del modelo, con los valores inicialmente considerados, los hidrogramas que se generaron en las estaciones de aforos, no presentan un buen ajuste con los datos medidos, para obtener los hidrogramas de las figuras 5.64-5.68., se hicieron variar las variables sensibles del modelos descritas en el punto F.

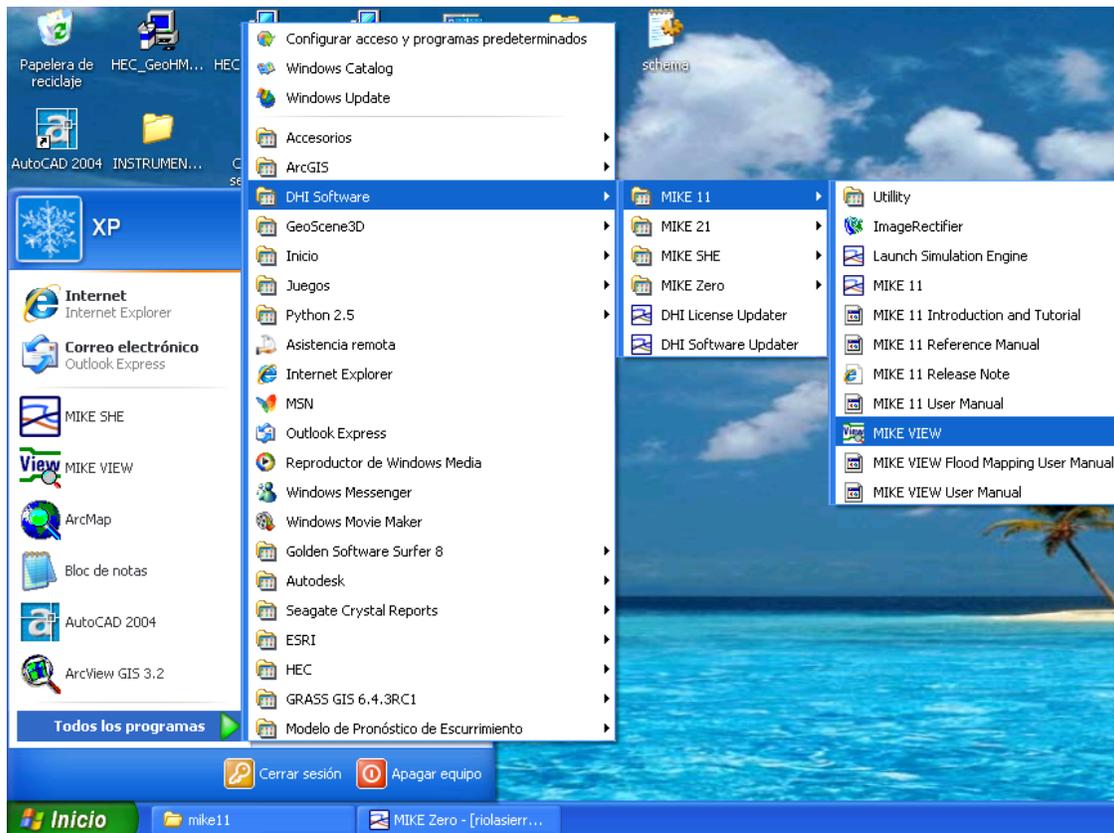


Figura 5.62. Ruta de acceso al visualizador de resultados MIKE VIEW

En carpeta de resultados de la simulación, riolasierra.res11, donde se tiene un informe sobre los datos de niveles y gastos, al aceptar se presenta la red hidrográfica simulada, Figura 5.63.

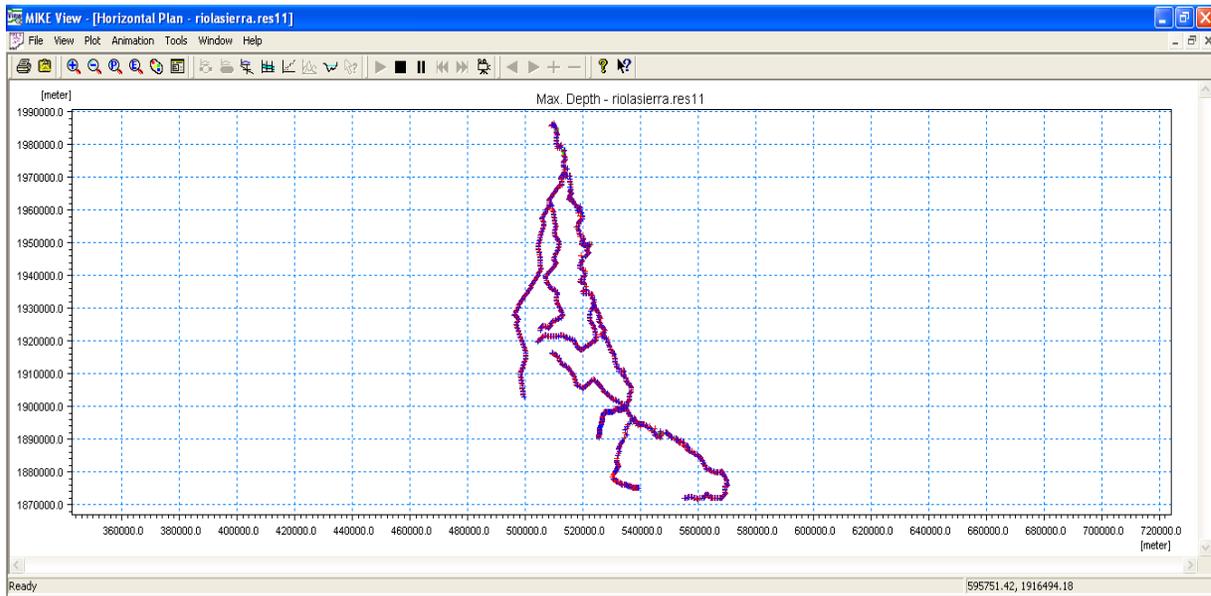


Figura 5.63. Vista de la red hidrográfica en MIKE VIEW

F. Variables sensibles del modelo. Es importante mencionar que las variables sensibles en el modelo son: El número de Manning, la detención superficial y la evapotranspiración. Debido a que en todo proceso de la obtención de los hidrogramas simulados, se realiza la calibración de los hidrogramas simulados con los medidos, para el evento 18 al 23 de octubre de 1989, se obtienen los hidrogramas simulados.

G. Flujo en secciones transversales. Los resultados que produce el sistema son: niveles alcanzados en cada sección transversal, gasto que pasa en la sección y los niveles que alcanza la avenida como resultado del tránsito de la avenida, y el tiempo en el que se presentó el máximo nivel, Figuras 5.64 a la 5.68.

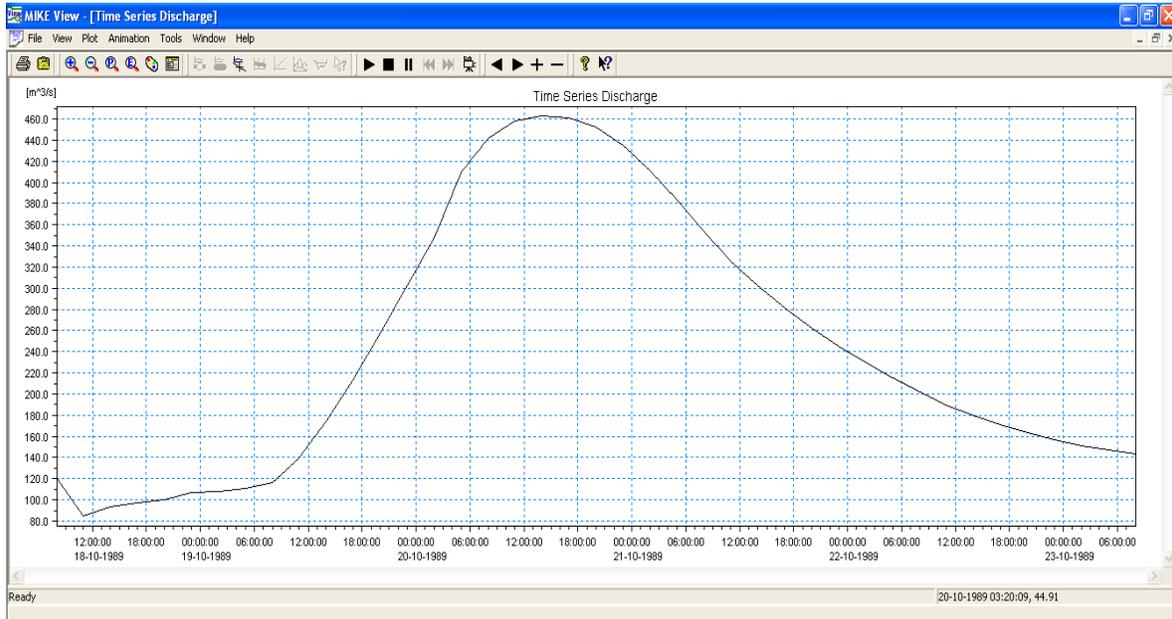


Figura 5.64. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Aljandro cadenamiento Km 91+233.549

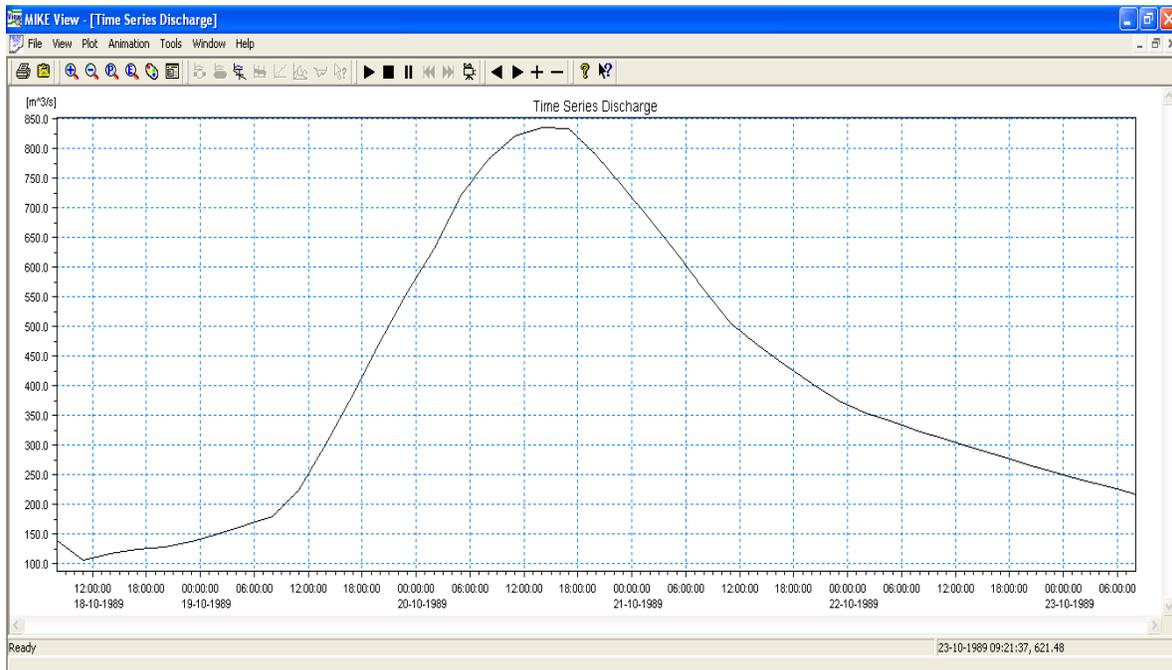


Figura 5.65. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Oxolotán cadenamiento Km 121+496.810

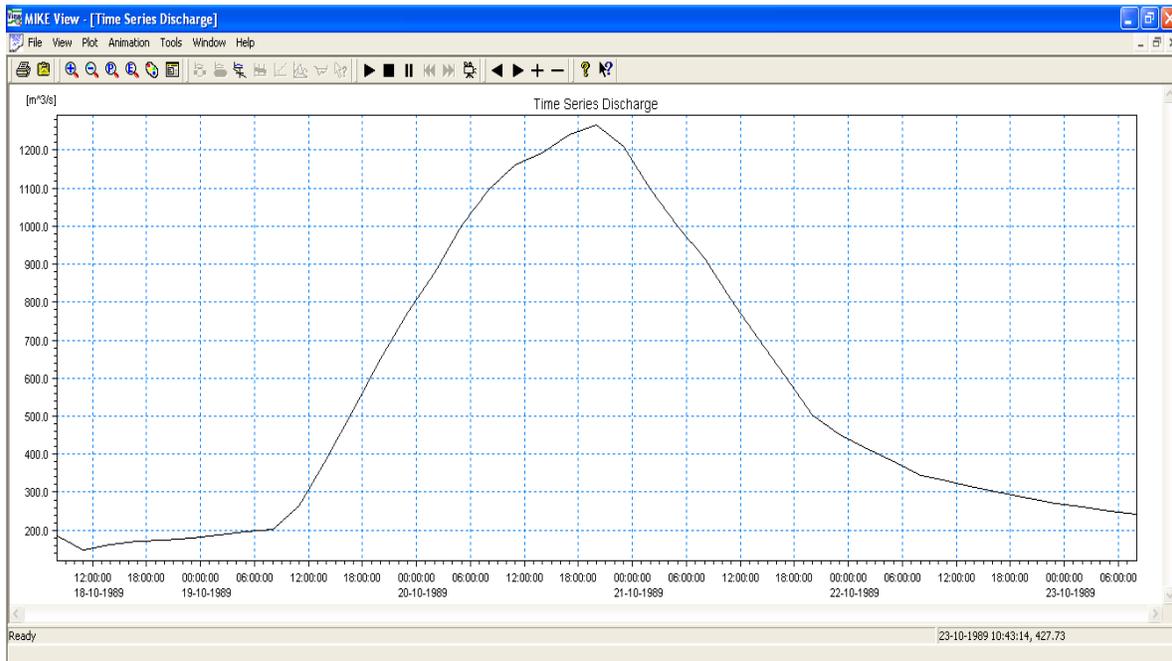


Figura 5.66. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Tapijulapa cadenamiento Km 13+3518.224

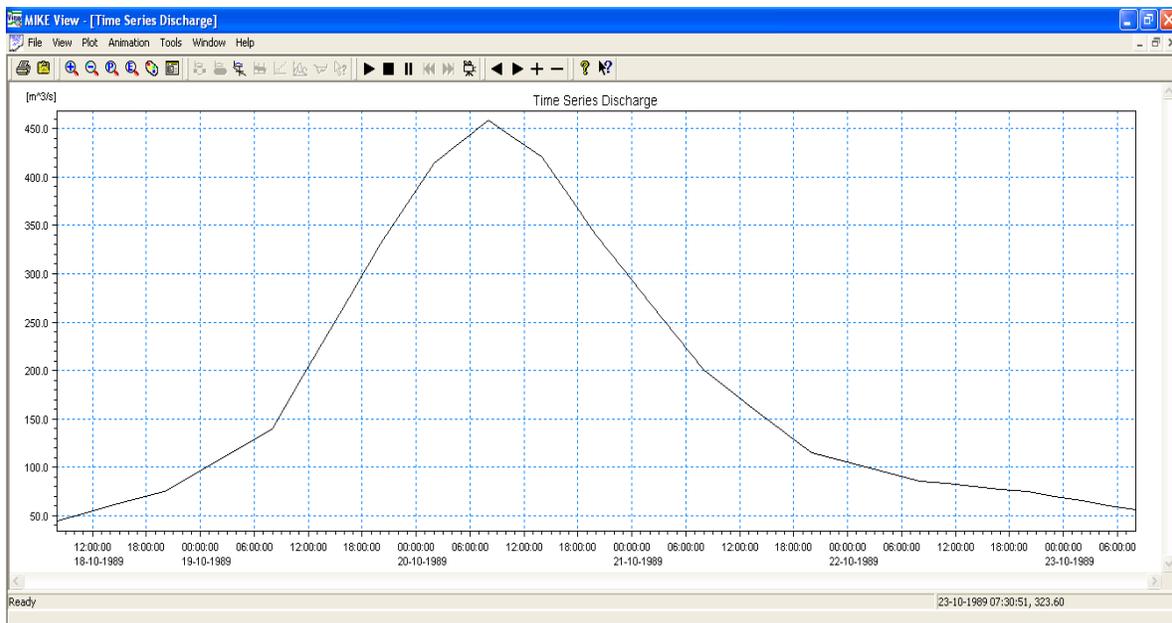


Figura 5.67. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Teapa cadenamiento Km 43+646.559

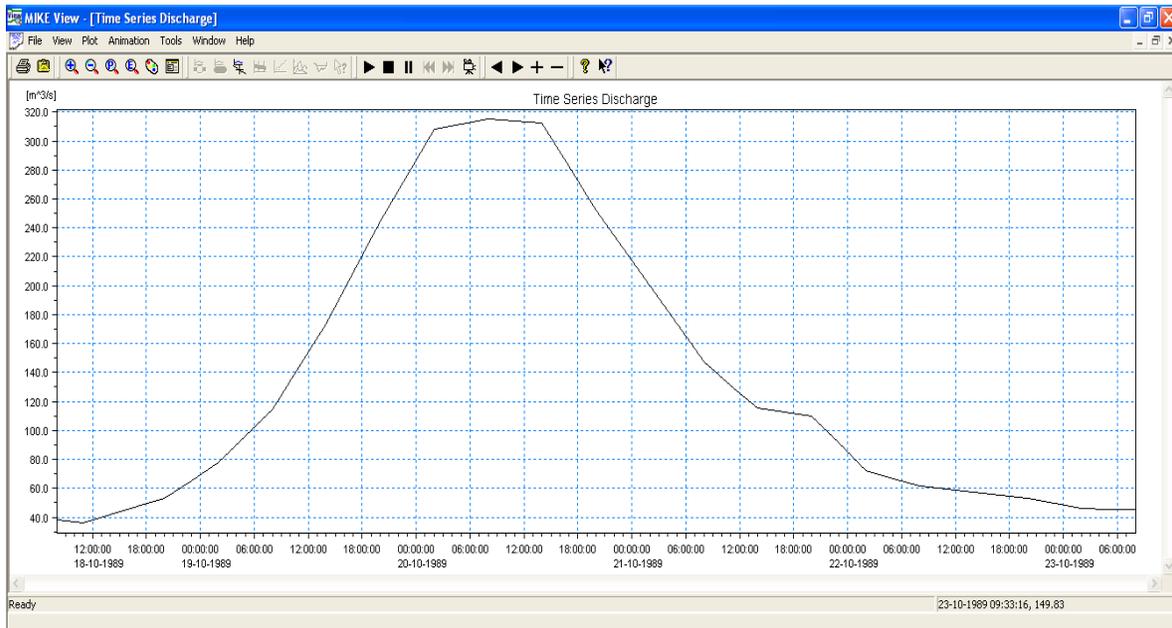


Figura 5.68. Resultados de la simulación en la sección transversal de la estación hidrométrica Puyacatengo cadenamiento Km 29+211.526

H. Perfil de flujo resultante de la simulación. Otro de los resultados que se producen es la información del perfil, de cada uno de los tramos, Figura 5.69, en el perfil, se presentan las márgenes del cauce, de color con líneas punteadas la margen izquierda y con línea continua la margen derecha, se presenta la rasante del cauce y la parte sombreada de color azul es el nivel de aguas máximos registrado en la simulación, en el que se aprecian las zonas de desborde del río identificando los cadenamientos donde se producen.

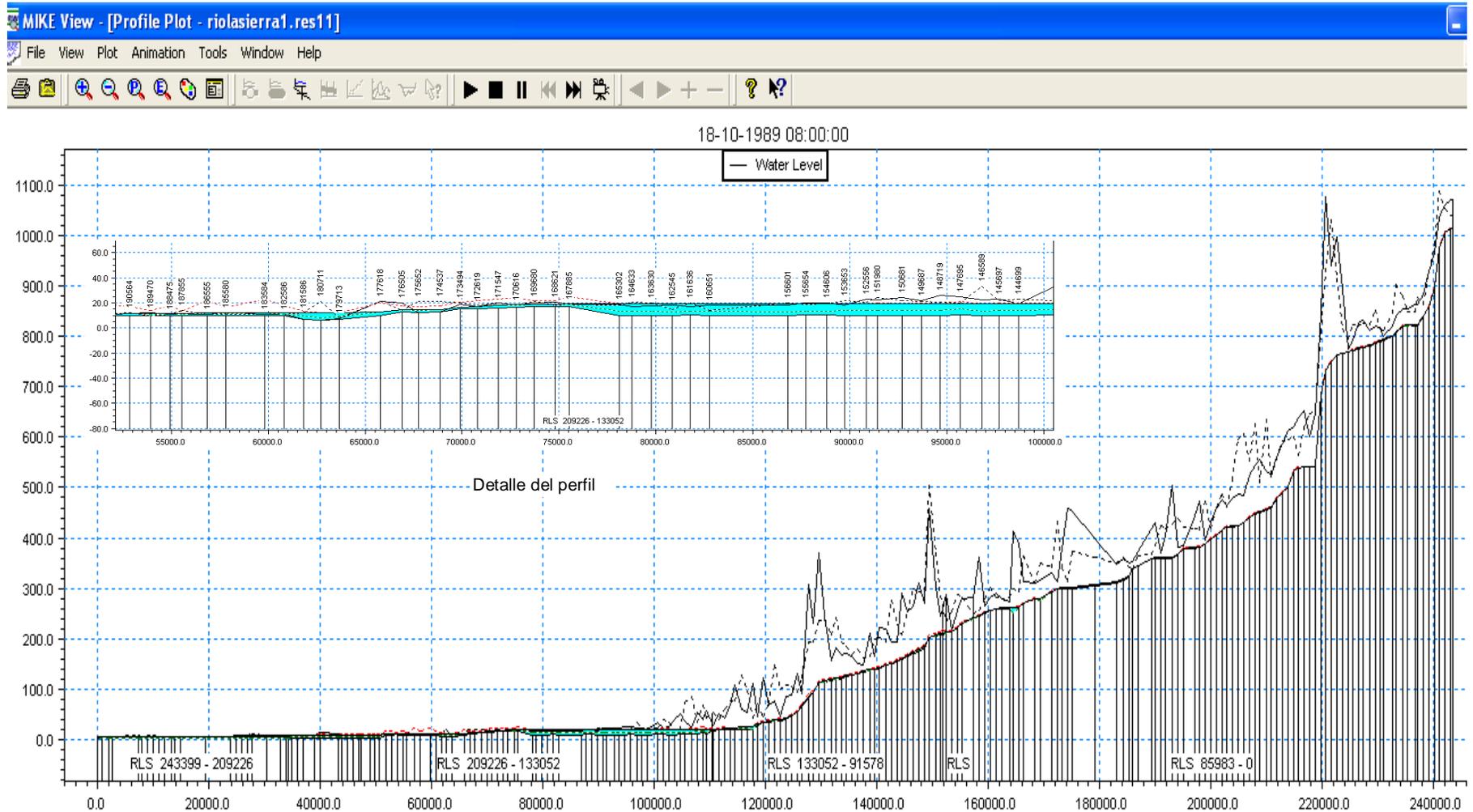


Figura 5.69. Perfil del cauce simulado



CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Los resultados que se presentan, consisten en la calibración y validación del modelo, la estimación de zonas de riesgos de inundación y las propuestas de solución.

Para la calibración del modelo se eligió el evento de avenida ocurrido del día 18/10/1989 al 23/10/1989.

Para la validación del modelo se eligió el evento de la avenida del día 29/11/1990 al 03/12/1990.

Se generó para el evento con mayor gasto en la avenida, las zonas de riesgo de inundación y finalmente las propuestas de solución.

6.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo se consideró el hidrograma observado del evento de avenida y el resultado de la simulación realizado en el periodo de las 8:00:00 am del día 18/10/1989 a las 8:00:00 am del día 23/10/1989 (5 días, 120 horas de simulación).

Con la modelación hidrológica e hidráulica descrita, se obtuvieron hidrogramas a intervalos de 3 horas, se indicó el proceso de simulación en 12 pasos de 15 minutos cada c/u ; lo que resulta en 480 intervalos de 15 minutos y 120 horas con 4 intervalos por hora.

Los resultados se simularon en la misma ubicación de cada estación hidrométrica que cierran las unidades de respuesta hidrológica, con el objetivo de que el gasto simulado sea el correspondiente al medido en cada estación hidrométrica en el



mismo tiempo del evento. Las estaciones que se consideraron de acuerdo a la información de sus datos fueron: 30125 Almandro, 30111 Oxolotán, 30093 Tapijulapa y 30092 Teapa, Cuadro 6.1.

Cuadro 6.1. Gasto simulado en el análisis de los sistemas hidrometeorológicos del análisis en el río La Sierra

Estación hidrométrica	30125 Almandro	30111 Oxolotán	30093 Tapijulapa	30092 Teapa
Día/mes/año/hora	Simulado (m ³ /s)			
18/10/1989 08:00	119.85	139.00	184.00	45.00
18/10/1989 11:00	85.07	106.57	149.09	52.50
18/10/1989 14:00	92.97	117.33	162.23	60.00
18/10/1989 17:00	96.79	124.18	169.59	67.50
18/10/1989 20:00	100.33	128.93	174.62	75.00
18/10/1989 23:00	106.36	136.71	179.72	91.25
19/10/1989 02:00	107.45	150.50	186.81	107.50
19/10/1989 05:00	110.51	165.53	195.07	123.75
19/10/1989 08:00	116.39	179.36	202.01	140.00
19/10/1989 11:00	139.37	223.87	264.39	187.50
19/10/1989 14:00	174.10	301.30	387.04	235.00
19/10/1989 17:00	213.63	385.05	515.98	282.50
19/10/1989 20:00	257.98	474.35	650.27	330.00
19/10/1989 23:00	302.49	557.83	772.09	372.50
20/10/1989 02:00	347.54	631.38	878.99	415.00
20/10/1989 05:00	410.07	721.81	1,002.76	436.63
20/10/1989 08:00	441.44	781.05	1,095.37	458.26
20/10/1989 11:00	458.02	820.70	1,160.66	439.63
20/10/1989 14:00	462.65	834.66	1,193.33	421.00
20/10/1989 17:00	461.12	833.50	1,240.14	380.50
20/10/1989 20:00	451.95	788.65	1,265.54	340.00
20/10/1989 23:00	434.80	734.78	1,210.82	305.00
21/10/1989 02:00	411.01	679.93	1,095.43	270.00
21/10/1989 05:00	383.29	621.68	1,000.44	235.00
21/10/1989 08:00	353.36	561.33	914.99	200.00
21/10/1989 11:00	325.83	506.30	807.29	178.75
21/10/1989 14:00	302.67	468.84	704.49	157.50
21/10/1989 17:00	281.96	435.59	604.16	136.25
21/10/1989 20:00	262.66	404.03	503.05	115.00
21/10/1989 23:00	245.18	374.46	451.59	107.73
22/10/1989 02:00	229.59	354.91	414.85	100.46
22/10/1989 05:00	215.15	338.33	380.20	93.19



22/10/1989 08:00	201.40	322.92	345.17	85.91
22/10/1989 11:00	189.38	309.84	328.88	83.19
22/10/1989 14:00	179.52	295.21	313.23	80.46
22/10/1989 17:00	170.93	280.98	298.00	77.73
22/10/1989 20:00	163.04	267.27	283.27	75.00
22/10/1989 23:00	156.43	254.90	270.46	70.23
23/10/1989 02:00	151.15	241.92	260.70	65.45
23/10/1989 05:00	146.75	229.33	251.64	60.67
23/10/1989 08:00	142.92	217.23	243.09	55.89
Parámetros estadísticos				
Máximo	462.65	834.66	1,265.54	458.26
Mínimo	85.07	106.57	149.09	45.00
Media	243.98	402.49	553.94	185.72
Desviación estándar	124.96	231.95	375.81	133.17
Número	41.00	41.00	41.00	41.00

Los gastos medidos en las estaciones hidrométricas que cierran cada sistema de respuesta hidrometeorológica que se consideraron para el evento del 18 al 23 de octubre de 1989, se presentan en el cuadro 6.2, son medidos normalmente los datos a las ocho de la mañana y a las seis de la tarde.

Cuadro 6.2. Gasto medio diario medido en estaciones hidrométricas del río La Sierra

Estación hidrométrica	30125 Almandro	30111 Oxolotán	30093 Tapijulapa	30092 Teapa
Día/mes/año	Medido (m³/s)	Medido (m³/s)	Medido (m³/s)	Medido (m³/s)
18/10/1989	134.00	179.00	206.36	50.27
19/10/1989	118.00	190.00	252.44	130.74
20/10/1989	472.00	900.00	1,182.32	464.10
21/10/1989	299.00	448.00	596.46	167.97
22/10/1989	182.00	274.00	323.76	92.56
23/10/1989	142.00	202.00	237.63	65.89
Parámetros estadísticos				
Máximo	472.00	900.00	1,182.32	464.10
Mínimo	118.00	179.00	206.36	50.27
Media	224.50	365.50	466.50	161.92
Desviación estándar	137.81	280.42	378.30	154.16
Número	6.00	6.00	6.00	6.00

La comparación gráfica de los gastos medidos vs los obtenidos en la simulación, para el periodo considerado se presenta en las Figuras 6.1 a la 6.4 para cada sistema hidrológico. Como se observa, son similares, solo que la información que produce el modelo es más detallada.

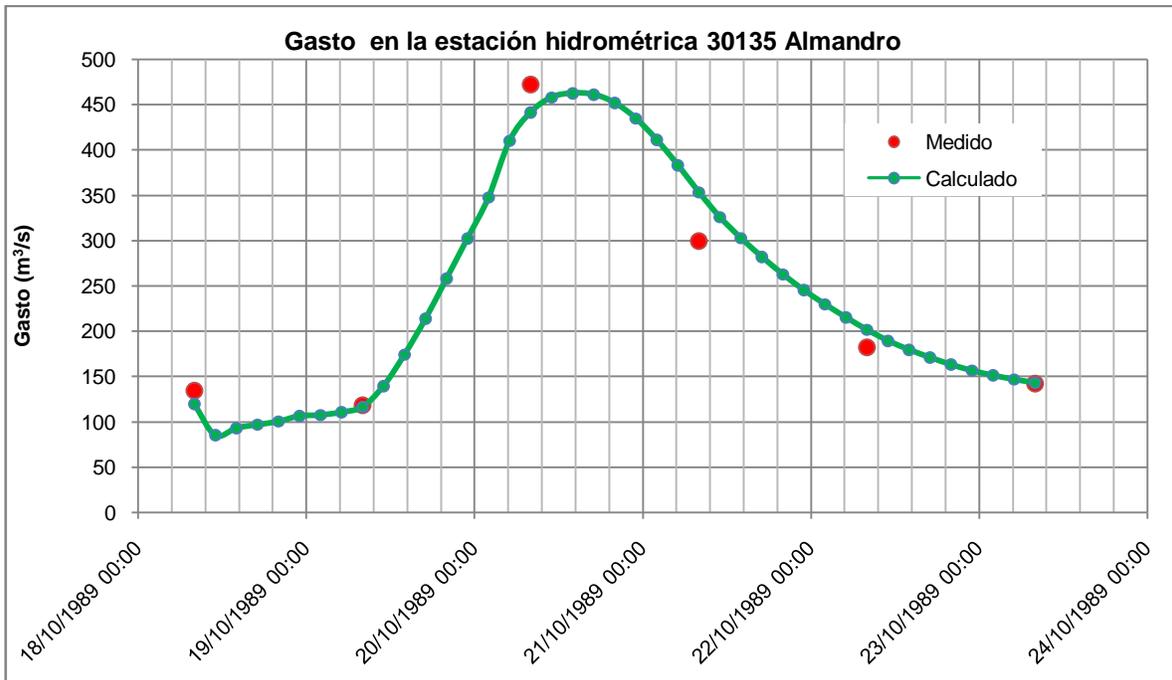


Figura 6.1. Gasto medido vs simulado en la estación hidrométrica 30135 Almandro.

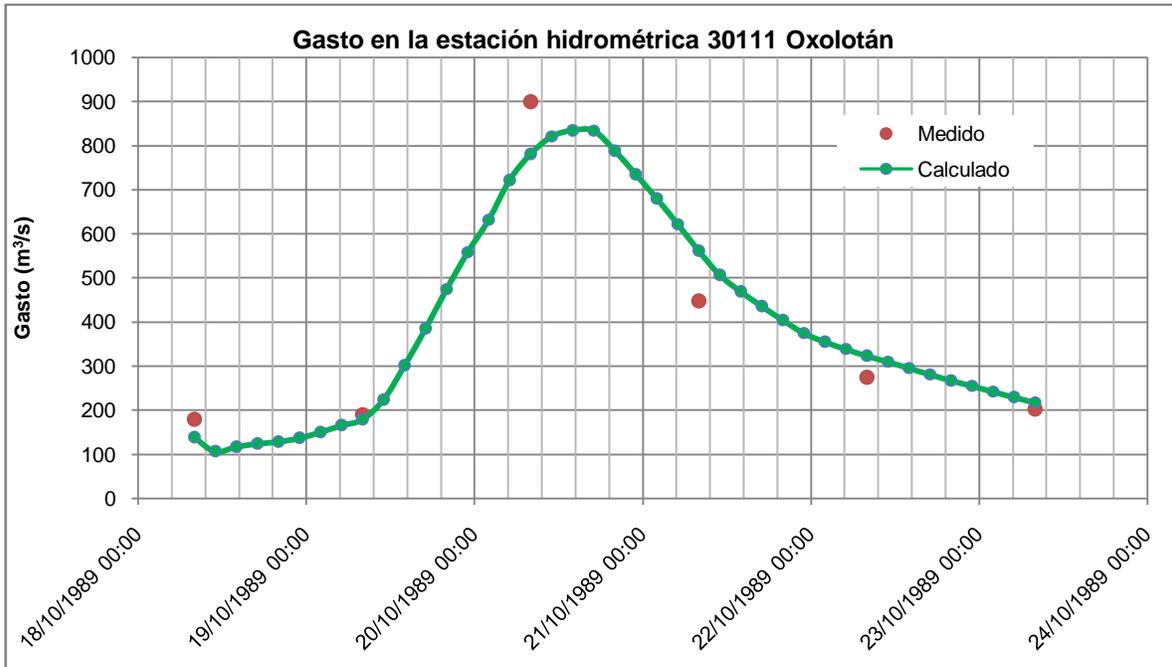


Figura 6.2. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30111 Oxolotán

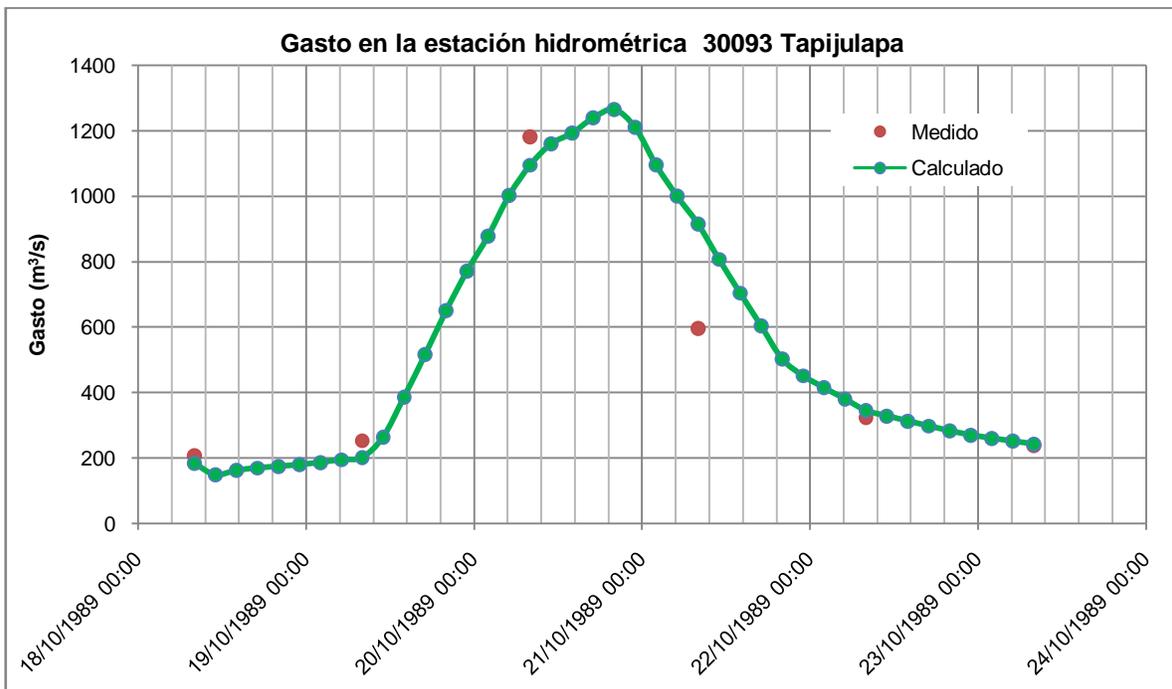


Figura 6.3. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30093 Tapijulapa

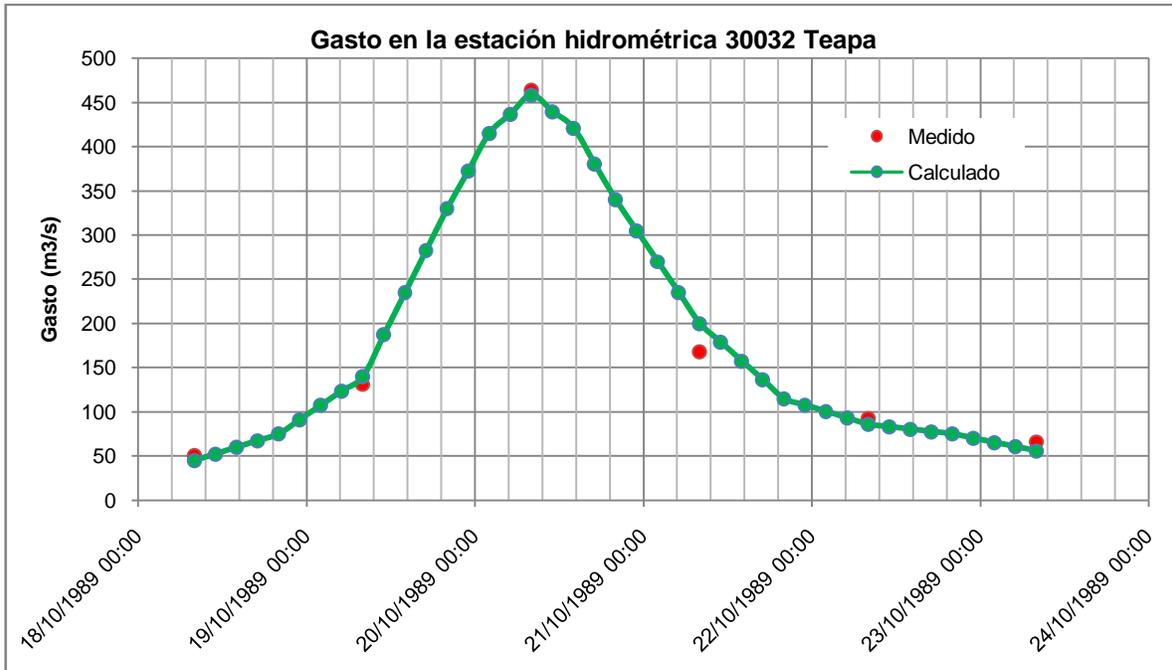


Figura 6.4. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30032 Teapa

Los hidrogramas generados inicialmente por el modelo, no presentaron la forma del hidrograma medido en las estaciones hidrométricas convencionales correspondientes. Por lo tanto, se trató de ajustar alguno de los parámetros del modelo de las variables sensibles, como: el número de Manning, la detención superficial y la evapotranspiración, principalmente, hasta que se obtuvo un ajuste aceptable entre los hidrogramas simulados con los medidos, para el evento del 18 al 23 de octubre de 1989. Se realizaron pruebas de bondad de ajuste, entre los hidrogramas simulados y observados utilizando las pruebas: coeficiente de Nash (0.84 a 0.99), coeficiente de determinación (0.87 a 0.99) y coeficiente de variación de la raíz cuadrada media del error (0.12 a 0.29), hasta obtener resultados dentro de los rangos de aceptación.



6.2. VALIDACIÓN

El proceso de validación del modelo desarrollado, consistió en aplicarlo a un evento lluvia-escurrimiento diferente al que se utilizó para la calibración; para verificar que los resultados del modelo son aplicables a otros eventos simulados.

Para realizar la validación del modelo, se eligió el evento del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990, iniciando a las 8:00:00 am. De los datos que resultaron de la modelación hidrológica e hidráulica, se obtuvieron los hidrogramas en intervalos de 3 horas, como se habían planteado en la validación del modelo.

Las estaciones hidrométricas que se consideraron de acuerdo a su información también fueron: 30125 Almandro, 30111 Oxolotán y 30093 Tapijulapa, que son las que cierran las Unidades de Respuesta Hidrológica correspondiente. La URH Teapa no se considera porque no se registraron datos en el periodo de simulación. En el cuadro 6.8, se presentan los gastos o caudales simulados para las estaciones hidrométricas que representan las salidas del cauce en los tres sistemas de unidades de respuesta hidrológica para cada tres horas en el periodo registrado del evento.

Los datos medidos en las estaciones hidrométricas, para el mismo evento del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990, se presentan en el cuadro 6.3.

Cuadro 6.3. Gasto simulado en el análisis de validación del modelo hidrometeorológico del río La Sierra

Estación hidrométrica	30125 Aljandro	30111 Oxolotán	30093 Tapijulapa
Día/mes/año/hora	Simulado (m ³ /s)	Simulado (m ³ /s)	Simulado (m ³ /s)
29/11/1990 08:00	0.00	0.00	0.00
29/11/1990 11:00	46.75	55.09	64.79
29/11/1990 14:00	71.65	102.02	128.61
29/11/1990 17:00	125.60	171.95	204.54
29/11/1990 20:00	148.59	207.82	260.15
29/11/1990 23:00	181.88	252.36	328.56
30/11/1990 02:00	221.91	299.42	395.48
30/11/1990 05:00	266.07	357.41	472.25
30/11/1990 08:00	313.39	426.01	560.60
30/11/1990 11:00	374.02	518.19	671.65
30/11/1990 14:00	446.31	635.30	789.29
30/11/1990 17:00	529.64	781.34	932.38
30/11/1990 20:00	629.28	965.98	1108.73
30/11/1990 23:00	700.57	1101.63	1236.25
01/12/1990 02:00	770.48	1197.56	1380.51
01/12/1990 05:00	815.96	1264.11	1498.88
01/12/1990 08:00	847.34	1308.64	1569.73
01/12/1990 11:00	859.53	1328.49	1610.06
01/12/1990 14:00	857.34	1303.49	1595.17
01/12/1990 17:00	839.40	1253.05	1544.34
01/12/1990 20:00	803.30	1168.05	1411.74
01/12/1990 23:00	754.40	1066.83	1257.97
02/12/1990 02:00	697.09	952.92	1117.52
02/12/1990 05:00	636.30	839.87	982.37
02/12/1990 08:00	574.46	730.34	855.48
02/12/1990 11:00	518.41	645.02	753.99
02/12/1990 14:00	470.86	586.96	679.94
02/12/1990 17:00	432.47	529.35	604.21
02/12/1990 20:00	402.34	470.76	535.67
02/12/1990 23:00	374.34	444.00	500.27
03/12/1990 02:00	345.67	425.14	473.16
03/12/1990 05:00	319.56	388.41	424.21
03/12/1990 08:00	297.35	351.97	396.14
Parámetros estadísticos			
Máximo	859.53	1328.49	1610.06
Mínimo	0.00	0.00	0.00
Promedio	413.96	590.88	697.41
Desviación estándar	267.90	405.07	486.92
Número	41.00	41.00	41.00

Los datos medidos en las estaciones hidrométricas, para el mismo evento del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990, se presentan en el cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Gasto medio diario, medido en las estaciones hidrométricas convencionales del río La Sierra

Estación hidrométrica	30125 Almandro	30111 Oxolotán	30093 Tapijulapa
Día/mes/año	Medido (m ³ /s)	Medido (m ³ /s)	Medido (m ³ /s)
29/11/1990 08:00	54.40	62.78	88.75
30/11/1990 08:00	361.00	513.20	666.44
01/12/1990 08:00	877.00	1345.60	1645.53
02/12/1990 08:00	444.00	577.67	667.91
03/12/1990 08:00	222.00	273.61	343.64
Parámetros estadísticos			
Máximo	877.00	1345.60	1645.53
Mínimo	54.40	62.78	88.75
Promedio	391.68	554.57	682.45
Desviación estándar	308.93	487.02	590.61
Número	5.00	5.00	5.00

En las figuras de la 6.5 a la 6.7, se presenta la información medida Vs simulada del evento de precipitaciones y su correspondiente hidrograma simulado y validado, del evento presentado del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990.

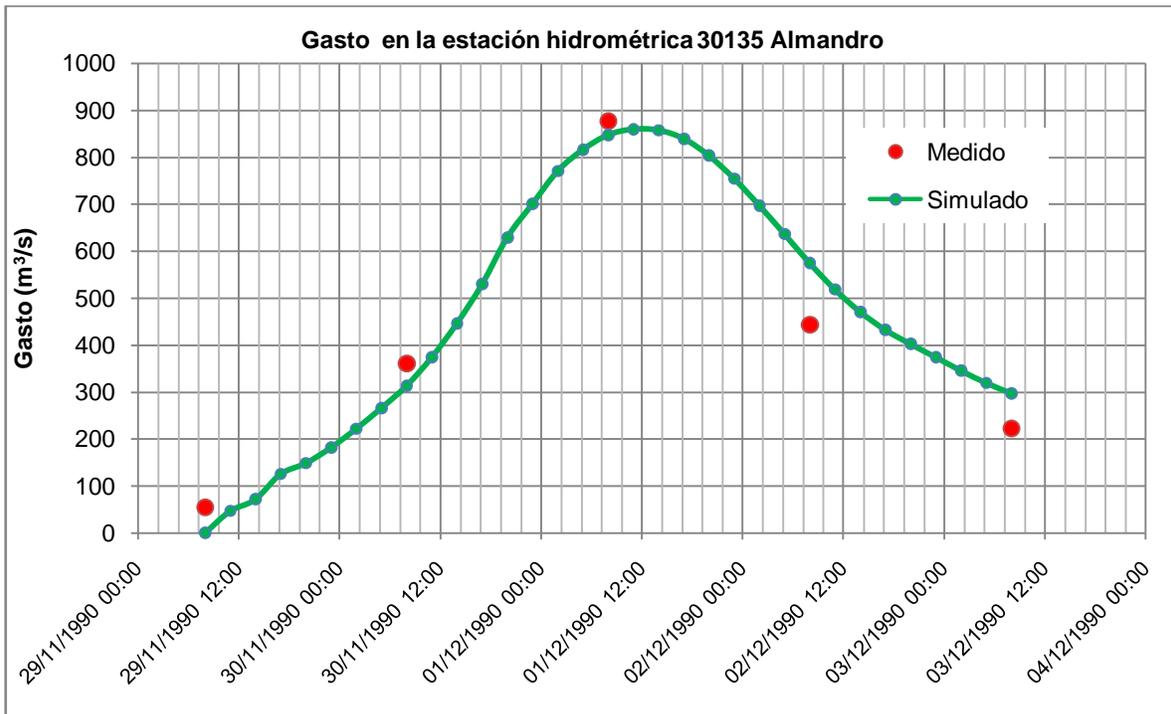


Figura 6.5. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30135 Almandro

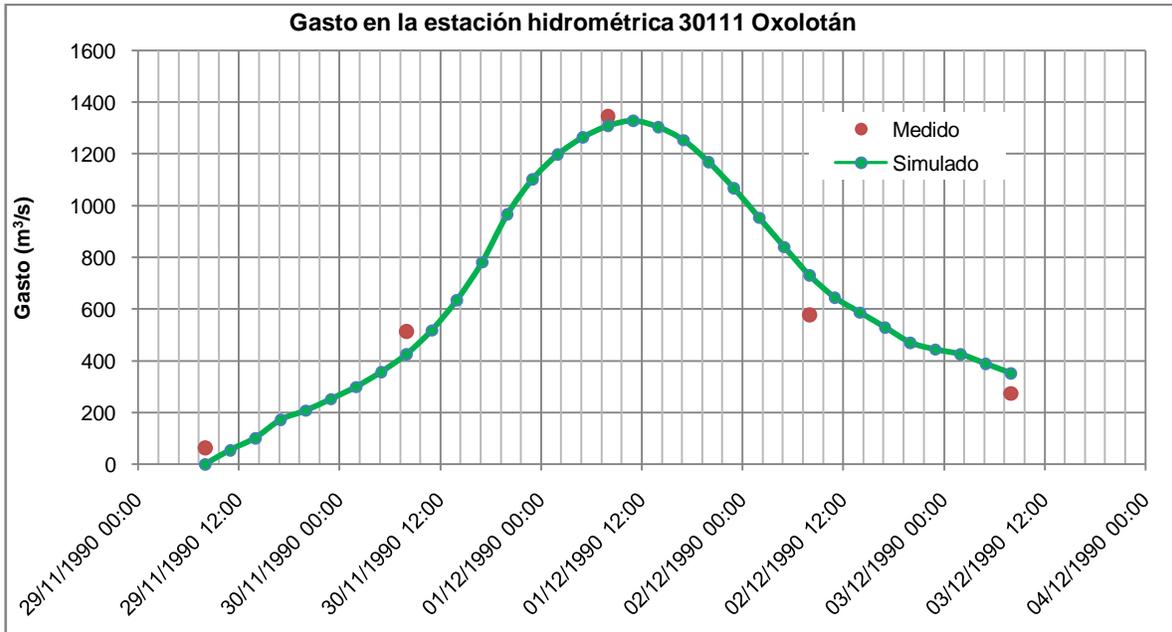


Figura 6.6. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30111 Oxolotán

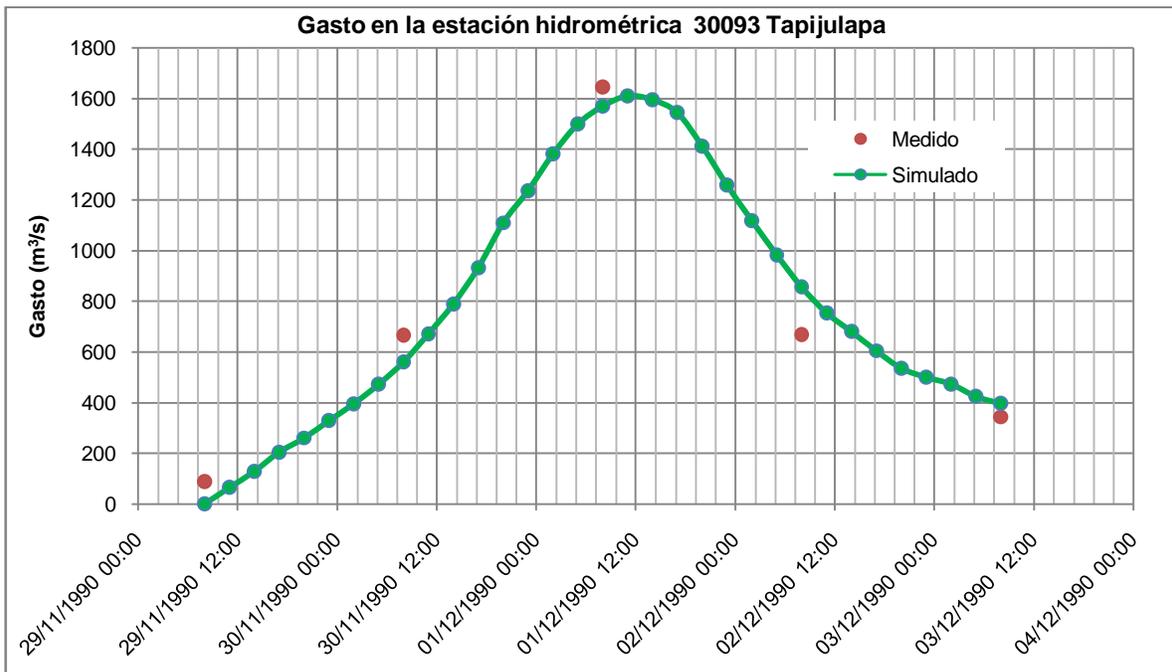


Figura 6.7. Gasto medido Vs simulado en la estación hidrométrica 30093 Tapijulapa



Para realizar la prueba de bondad de ajuste del hidrograma simulado Vs el medido, se utilizó la prueba de Nash.

Cuadro 6.5. Coeficiente de NASH para la estación 30135 Almandro

Día/mes/año/hora	Simulado (m ³ /s)	Medido (m ³ /s)	(Y _{obs} -Y _{med}) ²	(Y _{obs} -Y _{med}) ²
29/11/1990 08:00	0.00	54.40	2,959.36	113,757.80
30/11/1990 08:00	313.39	361.00	2,266.52	941.26
01/12/1990 08:00	847.34	877.00	879.54	235,535.50
02/12/1990 08:00	574.46	444.00	17,019.55	2,737.38
03/12/1990 08:00	297.35	222.00	5,677.47	28,791.30
Media	406.51	391.68	5,760.49	76,352.65
Suma	2,032.54	1,958.40	28,802.44	381,763.25
Coeficiente de NASH	0.92	Prueba= aceptable		

Cuadro 6.6. Coeficiente de NASH para la estación 30111 Oxolotán

Día/mes/año/hora	Simulado (m ³ /s)	Medido (m ³ /s)	(Y _{obs} -Y _{med}) ²	(Y _{obs} -Y _{med}) ²
29/11/1990 08:00	0.00	62.78	3,941.33	241,859.37
30/11/1990 08:00	426.01	513.20	7,601.92	1,711.64
01/12/1990 08:00	1,308.64	1,345.60	1,365.89	625,725.30
02/12/1990 08:00	730.34	577.67	23,309.35	533.52
03/12/1990 08:00	351.97	273.61	6,140.29	78,939.65
Media	563.39	554.57	8,471.76	189,753.89
Suma	2,816.97	2,772.86	42,358.78	948,769.47
Coeficiente de NASH	0.96	Prueba= aceptable		

Cuadro 6.7. Coeficiente de NASH para la estación 30093 Tapijulapa

Día/mes/año/hora	Simulado (m ³ /s)	Medido (m ³ /s)	(Y _{obs} -Y _{med}) ²	(Y _{obs} -Y _{med}) ²
29/11/1990 08:00	0.00	88.75	7,876.56	352,484.44
30/11/1990 08:00	560.60	666.44	11,201.26	256.45
01/12/1990 08:00	1,569.73	1,645.53	5,745.49	927,515.38
02/12/1990 08:00	855.48	667.91	35,183.63	211.53
03/12/1990 08:00	396.14	343.64	2,755.83	114,794.93
Media	676.39	682.45	12,552.55	279,052.54
Suma	3,381.95	3,412.27	62,762.77	1,395,262.72
Coeficiente de NASH	0.96	Prueba= aceptable		



Los datos simulados, presentan un ajuste aceptable; con los medidos ya que el coeficiente de NASH, varía entre 0.92 a 0.96.

Se calculó el coeficiente de determinación, la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME) y el coeficiente de variación de la RCCME cuadro 6.8.

Cuadro 6.8. Coeficientes de NASH, coeficiente de determinación, la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME) y el coeficiente de variación de la RCCME

Unidad de respuesta hidrológica	Coeficiente de NASH	Coeficiente de determinación (R^2)	Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error(RCCME)	Coeficiente de Variación de RCCME
30135 Almandro	0.92	0.93	75.90	0.19
30111 Oxolotán	0.96	0.96	92.04	0.17
30093 Tapijulapa	0.96	0.96	112.04	0.16
Parámetros estadísticos				
Máximo	0.96	0.96	112.04	0.19
Medio	0.95	0.95	93.33	0.17
Mínimo	0.92	0.93	75.90	0.16

En comparación con la fase de observación de los resultados la validación de los datos, son congruentes con los simulados para el periodo 18 al 23 de octubre de 1989. Sin embargo el evento de 1990 es de mayor impacto que el de 1989. Por lo que en las alternativas de solución, se utilizará ambos eventos.

6.3. ESTIMACIÓN DE ZONAS DE RIESGO

El procedimiento que se describe para estimar el riesgo de vulnerabilidad a inundaciones a partir de la determinación de las características fisiográficas de la cuenca y del cauce, que se encuentra cercano o cruza una población rural, se realizó con ayuda de mapas topográficos escala 1:50,000, así como también de la capacidad hidráulica de los arroyos, simulados con la serie de modelos MIKE.

Para elaborar un mapa de vulnerabilidad por inundación, se identificaron primeramente las áreas potenciales a inundarse en las localidades rurales de



interés, mediante el perfil del cauce presentado en la figura 5.69, que incluye todo el desarrollo del cauce principal del río La Sierra con las zonas bajas, que se inician en el cadenamiento Km 137+919 al cadenamiento Km 242+612, este localizado en la confluencia del río La Sierra al viejo Mezcalapa.

La cota media arriba del cual se desborda el río es de 6 m, y la cota del nivel de aguas máximo extraordinario es de 8 m; por lo que se presenta un riesgo potencial de desborde cuando el nivel del agua en el cauce del río sobrepasa la cota de 6 m, por lo que la profundidad media de inundación puede ser de 2 m, donde será necesario evaluar como zonas potenciales a lo largo del cauce principal y en las zonas bajas de la cuenca.

El procedimiento para generar el mapa de riesgo se realizó mediante interpolación en el modelo de elevaciones para que al modelo se le realice una reclasificación en los rangos de elevación, que corresponde a asignarle los rangos de colores, que se manejan en la guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgo, por fenómenos hidrometeorológicos CENAPRED, 2004. Para este caso, la escala que se manejó fue de los 0 hasta los 8 metros sobre el nivel del mar, al calcular áreas que le corresponden a los intervalos, presentados en el cuadro 6.9, el intervalo de 0-5 metros, es el que mayor superficie ocupa arriba del 50%, mapa 15 de anexos, correspondiente a las zonas vulnerables por inundaciones.

Los criterios bajo los que se realizó la zonificación de las áreas vulnerables, se presentan en el cuadro 6.9.



Cuadro 6.9. Índice de vulnerabilidad en función de la topografía de la cuenca baja

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Rangos de profundidad	Color de alarma	Observación
I	Alto	0.0-5.5	Rojo	Es zona de alta vulnerabilidad, se inundan casa de doble piso
II	Medio-Alto	5.5-6.5	Naranja	Es zona de media alta vulnerabilidad, ya que la profundidad del agua alcanza el techo de una casa normal
III	Medio	6.5-7.0	Amarillo	En estas zonas las personas pueden caminar, solo para resguardo a lugares seguros, el nivel puede llegarles hasta el cuello.
IV	Medio-Bajo	7.0-7.5	Verde oscuro	Se pueden proteger algunos artículos domésticos, la construcción de las casas debe de ser sobreelevadas
V	Bajo	7.5-7.8	Verde claro	Se pueden proteger algunos artículos, sobreelevando las pertenencias al segundo nivel de la casa
VI	Muy Bajo	7.8-8.0	Blanco	En esta zona la protección en las casas puede realizarse colocando una barrera de costales rellenos de arena y tierra para proteger la entrada del agua a la casa

En la zona cercana a Villahermosa Tabasco, la pendiente se desarrolla de sur a norte, pero dentro de la ciudad, la zona más afectada es el noreste, con profundidades hasta de los 4 metros. Hacia la zona cercana al centro se presentan inundaciones de aproximadamente 1.5 metros, valor que se corrobora con las observaciones que se reportaron en el evento de 1990.

6.4. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Con la finalidad de proponer algunas medidas que pudieran evitar la parte con que contribuye el río La Sierra de las inundaciones en las zonas bajas y cercana a la zona de Villahermosa, con el modelo se evaluó el comportamiento del gasto del río La Sierra, al proponer en forma preliminar dos acciones estructurales: La construcción de una presa de almacenamiento y trabajo de desazolve de algunos tramos del cauce.

La propuesta de alternativa de solución, se realizó utilizando el modelo hidráulico de la zona, calibrado, las acciones que se establecieron para simular las condiciones de flujo en el río La Sierra, consistió en proponer una presa de almacenamiento en el cadenamiento 93+970, del cauce principal, a la altura de la comunidad de Huitiupán, en el estado de Chiapas, identificado ese sitio como un lugar propicio, para la construcción de una presa de almacenamiento.



Figura 6.8. Cañón de Itzantún, como propuesta para la construcción de una presa de almacenamiento

En el modelo, para indicarle que considere una obra de regulación y almacenamiento, en el cuadro de propiedades de la red hidrográfica, en la sección de estructuras, se seleccionó presas, para indicársela, fue necesario, establecer las características de la estructura, en localización se requiere del identificador del río y el cadenamiento donde será colocada; en este paso se asignó el cadenamiento 93+970 y el nombre ó identificador de la presa. Con un ancho de vertedor de 60 m, así como la cota del nivel de la cresta del vertedor en msnm, figura 6.9.

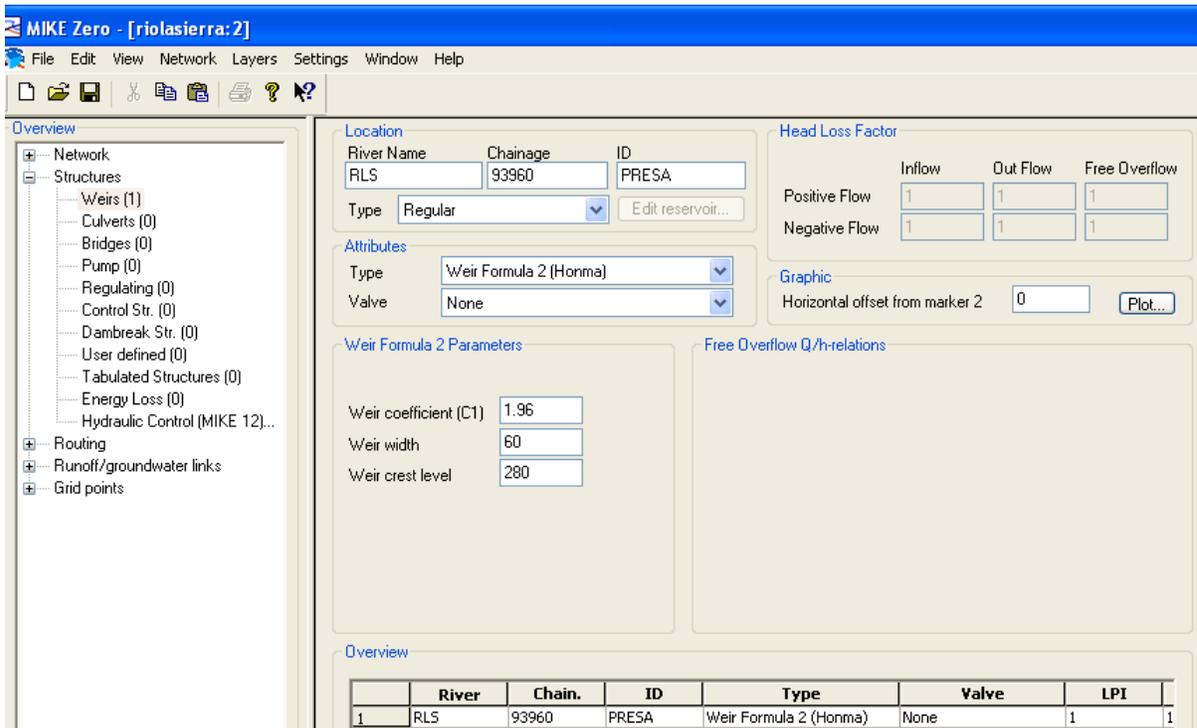


Figura 6.9. Propuesta de emplazamiento de un estructura tipo presa

Como segunda propuesta, se propone que en la parte baja, del río La Sierra, se realice un desazolve y conformación de los bordos de protección marginal, figura 6.10, el que se iniciará en el cadenamiento Km 137+919 hasta el Km 242+612, con una pendiente del 0.008%.

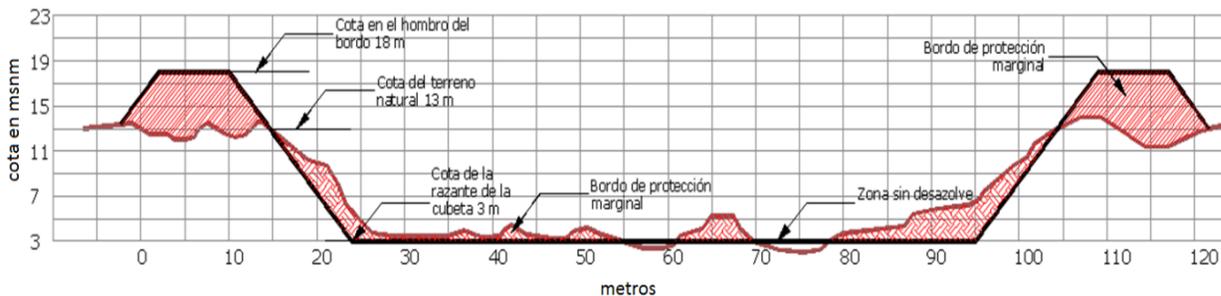


Figura 6.10. Propuesta de sección tipo media para el desazolve y conformación de los bordo de protección marginal del Km 137+919 al Km 242+612

Una vez que se definen las condiciones, que se modificarán en el sistema hidráulico, se acopla al modelo, esas características.

En el modelo las secciones transversales, para el cadenamiento 137+919, inicio de desazolve, se propone una sección tipo, figura 6.11. Con una cota en la plantilla de 11 metros sobre el nivel del mar, y una altura hasta de 30 metros, ya que en esta parte, como es el final de la cuenca media, el cauce es profundo, por lo que permite realizar la sección y la conformación de las márgenes del río.

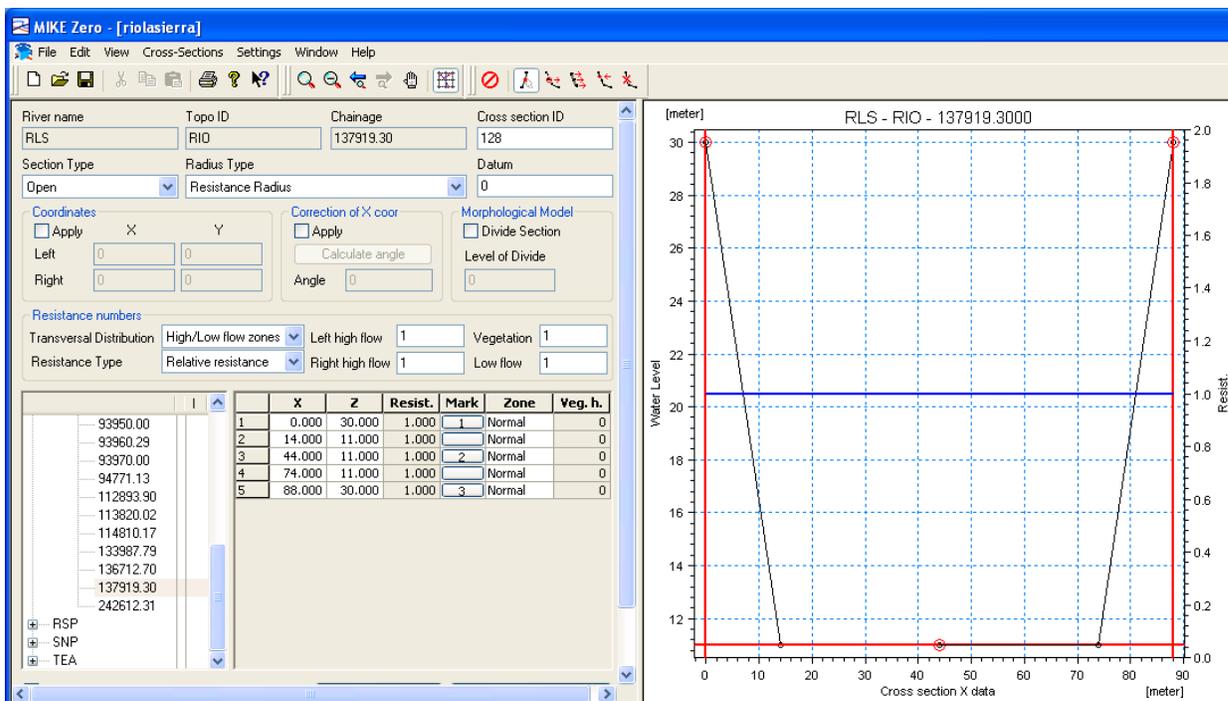


Figura 6.11. Sección propuesta en la estación 137+919

Para la sección final, en el cadenamiento 242+612, figura 6.12, la rasante del cauce, presenta una altura de 3 metros sobre el nivel del mar, y una altura de 18 metros en los hombros del bordo.

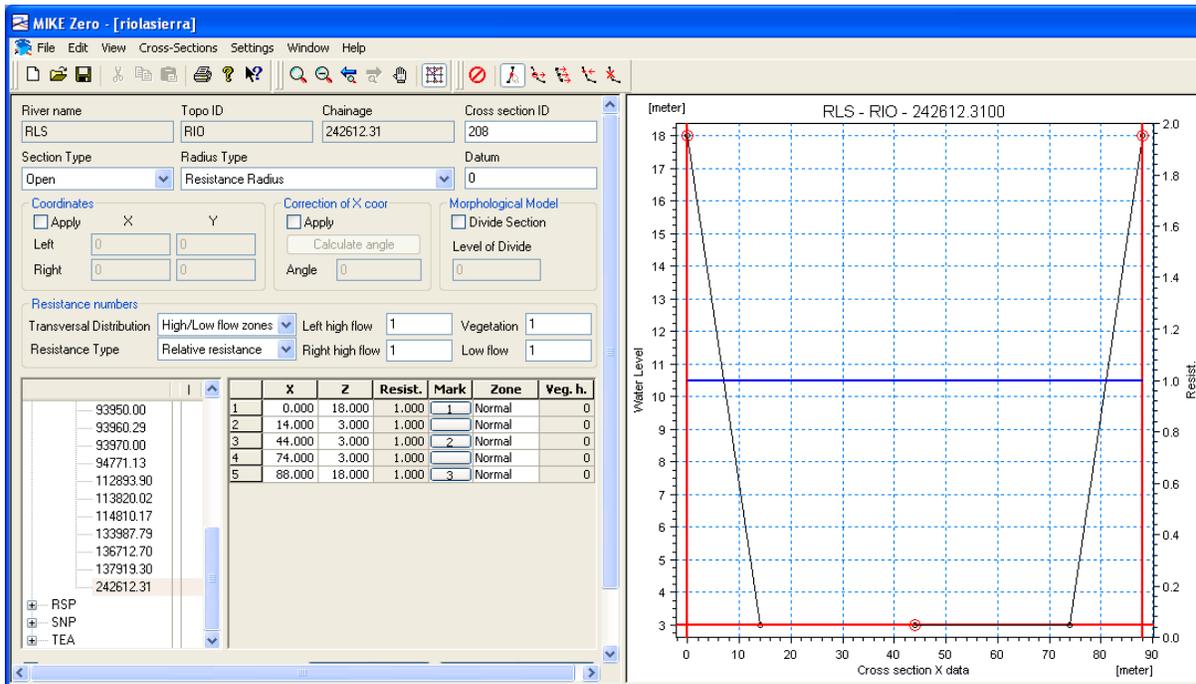


Figura 6.12. Sección propuesta en la estación 242+612

Se propone que también, en la parte baja se realicen correcciones en el cauce, principalmente en los meandros, ya que estos dificultan el tiempo de descarga en los ríos.

Con ver los resultados de la modelación, en este caso al visualizar el perfil, se presenta el proceso y las condiciones que modificó la propuesta de la presa en el sistema, que permite el desfase y retención del flujo en la parte alta de aproximadamente 25 horas con 30 minutos, en este tiempo en relación con el caudal de descarga el río Teapa, a evacuado un gasto de $320 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponden a sus cuencas media y baja, figura 6.14.

Eso permite que el gasto máximo de $2200 \text{ m}^3/\text{s}$, se presente a las 3:30 am, el 21 de octubre de 1989, con 25 horas 30 minutos de desfase para que empiece el derrame de la presa.

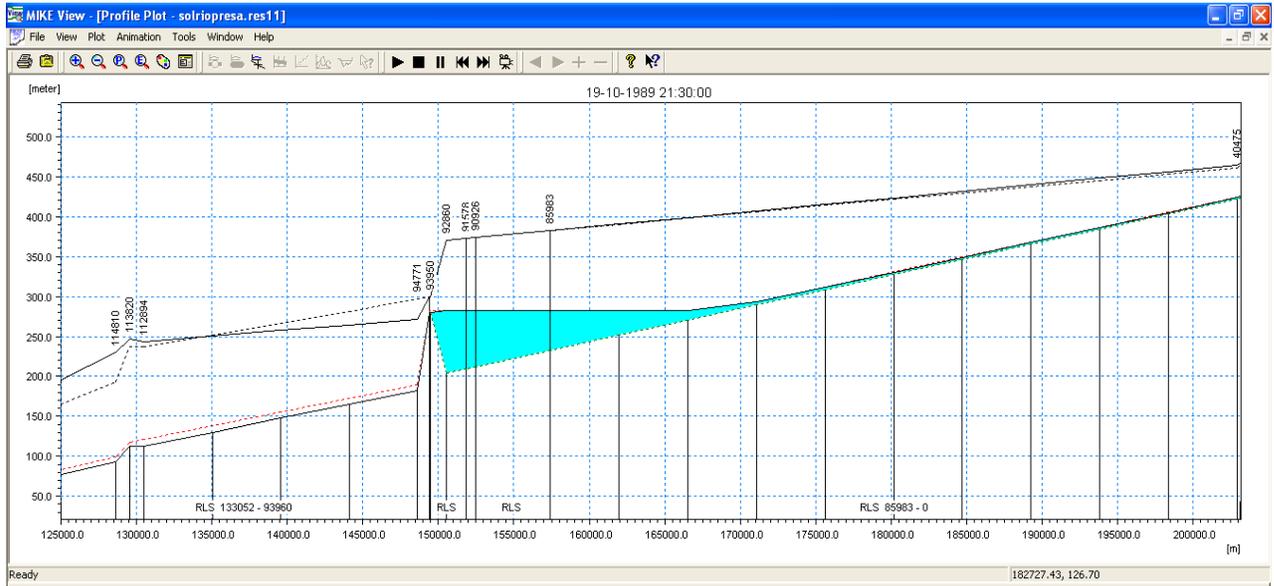


Figura 6.13. Función de la presa de almacenamiento en el cañón Itzantún

Otro de los factores que se modifican en la zona baja, al proponer el desazolve y los bordos de protección marginal, en los niveles que alcanza el gasto de 2200 m³/s, en esta zona se observa que no hay derrames, Figura 6.14.

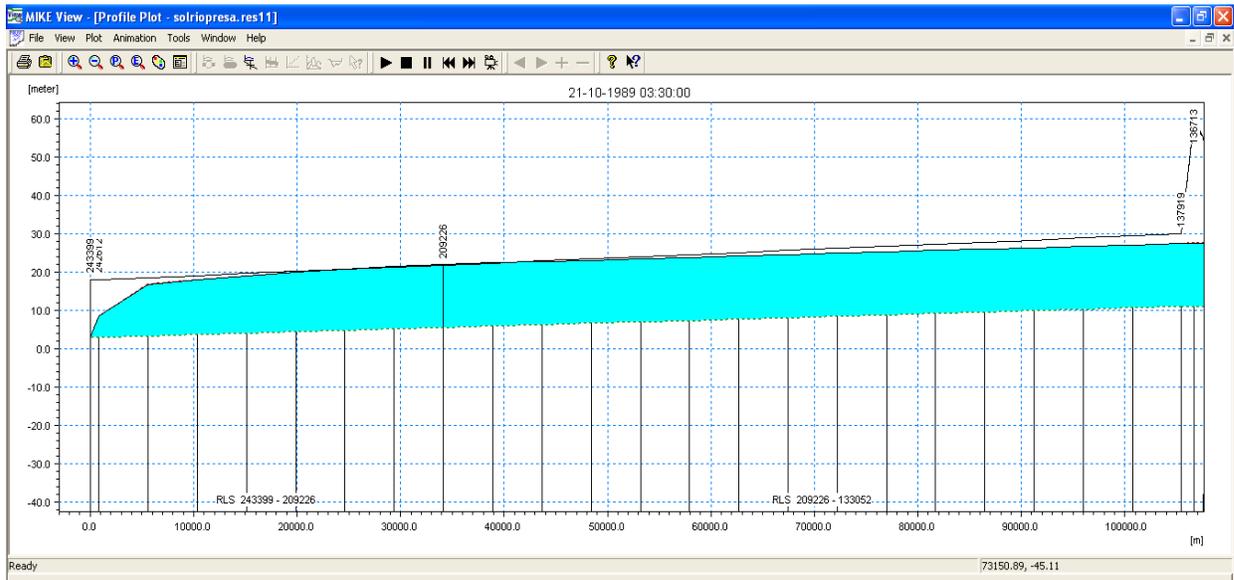


Figura 6.14. Nivel de aguas máximo alcanzado por la avenida de 1989

Sin embargo, si estas condiciones se aplican para el evento del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990, las características de los bordos, no es suficiente, ya que existe un incremento del gasto de 37% en 1990, lo que propicia el desborde e inundaciones en la zonas bajas.

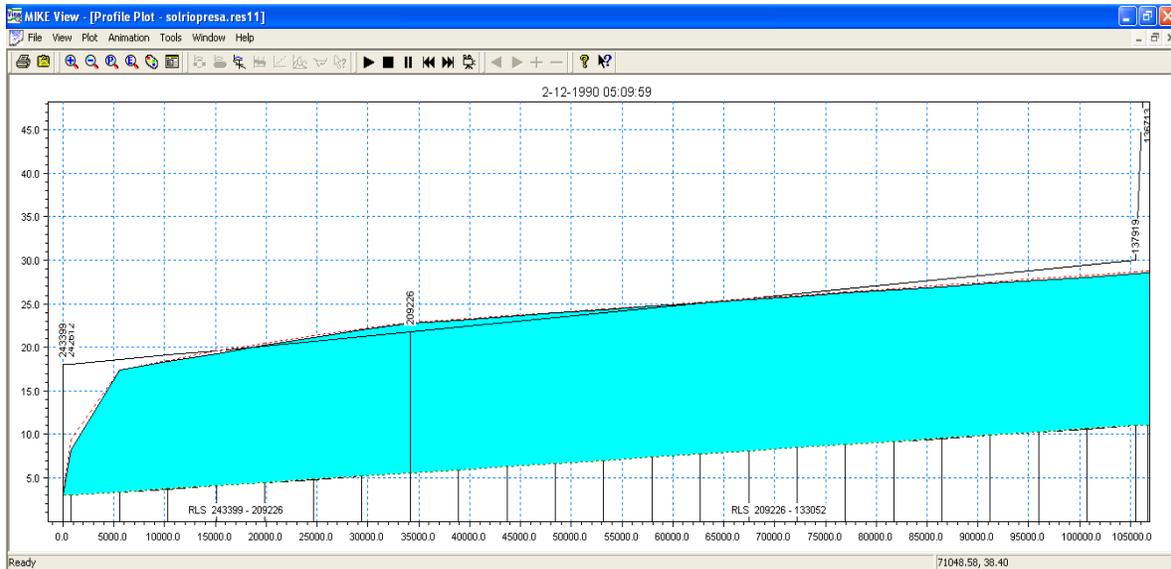


Figura 6.15. Simulación para las condiciones del evento del 9 de noviembre al 3 de diciembre de 1990.

Se puede ver que en el cadenamamiento 209+226, se tiene un desborde en el cauce con un nivel máximo de 23.7 metros, por lo que el bordo necesita ser de mayor altura; para ello, se propuso que los bordos de protección marginal en la salida del río se tenga la cota de 20 msnm en sus hombros, con lo que se garantiza que el bordo no sea rebasado.

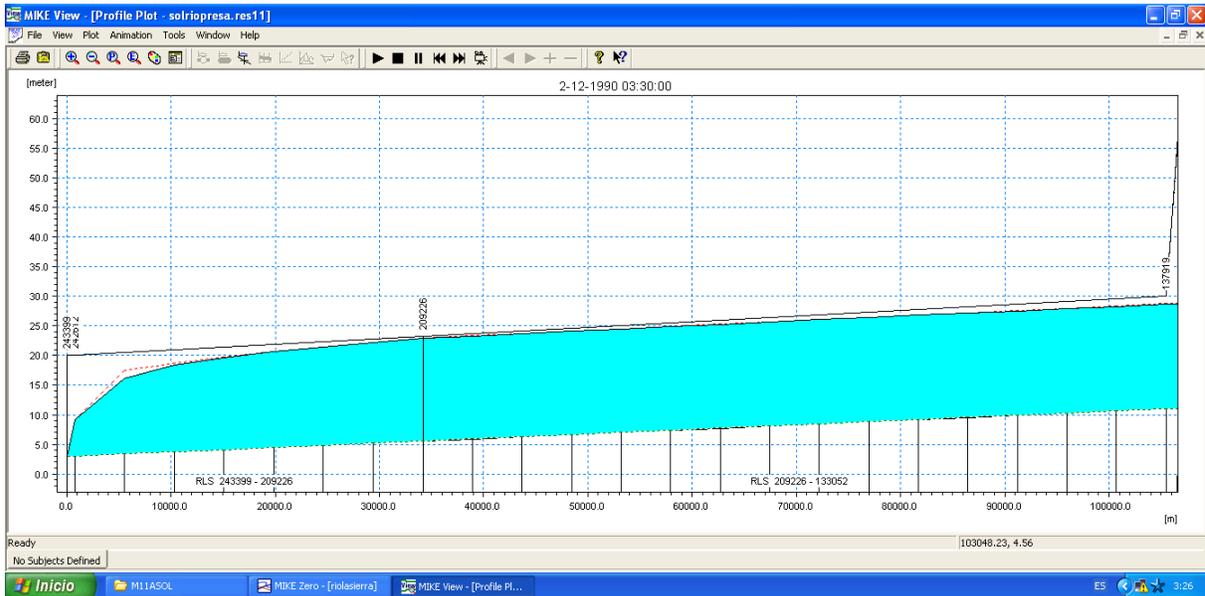


Figura 6.16. Nivel de aguas máximo alcanzado por la avenida de 1990, con la altura del bordo final de 20 msnm en la corona de los bordos

Por lo tanto la altura definitiva de los bordos de protección marginal debe ser de 20 msnm en el cadenamiento 242+612, para que no sea rebasado, figura 6.17.

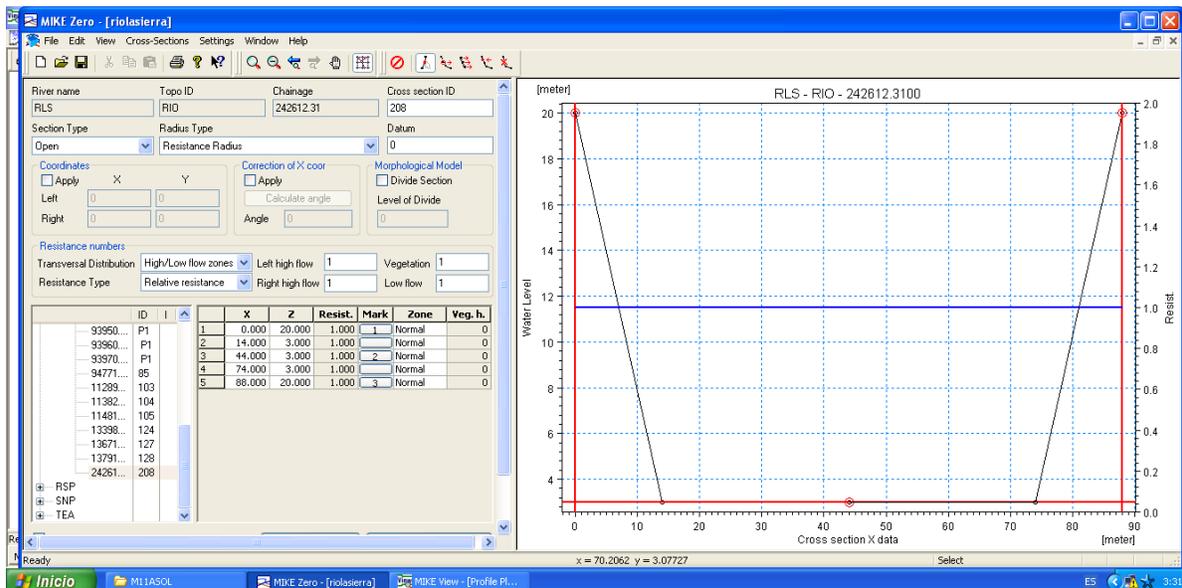


Figura 6.17. Sección en el cadenamiento 242+612, para el evento de 1990



La altura de la presa de almacenamiento de 80 metros, tiene un buen control sobre las avenidas, estructura que actualmente no se tiene en el río La sierra y es una alternativa que permite reducir las inundaciones provocadas por el escurrimiento y comportamiento de este río. Las propuestas de obras y acciones, se presentan en el mapa 16.

En resumen, los resultados del trabajo se pueden establecer como sigue:

Ubicación de la Sierra, se localiza en la región hidrológica número 30.

Se elaboró un Plano base de la cuenca con modelos digitales de elevaciones y fotografías satelitales, en ArcGis 9.3, como plataforma del Sistemas de Informacion Geográfica.

La cuenca comprende un área de 4,424.66 km², con su cauce principal que se desarrolla por 245 km, con una pendiente media del 40% y una elevación media de 300 metros; presenta cauces del cuarto orden, con una densidad de drenaje de 0.29 km/km².

La cuenca se caracterizó por su fisiografía, geología, edafología, de uso del suelo y climatológicamente.

La geología predominante es caliza sedimentaria, con el 25.61% de la superficie.

El clima predominante en la zona es cálido húmedo, con una precipitación media anual que va desde 1550 a 5200 mm al año, con una temperatura anual que oscila de 11°C hasta los 26°C, una evaporación anual en la zona que va desde los 700 hasta los 2200 mm y una evapotranspiración anual que va desde 1000 a 1700 mm.



El tipo de suelo predominante en la zona es Luvisol Crómico (Lc) con el 34.6% de la superficie total, siendo suelos ácidos y con alto contenido de arcilla, presentes en las zonas llanas.

La cobertura vegetal predominante en la zona es del tipo pastizal, con el 30.47% de la superficie total, presente en las zonas bajas y cercanas a las los cauces principales.

Se definieron áreas de influencia para las estaciones meteorológicas, ubicando las estaciones meteorológicas, en el plano base, a los cuales se les agregaron la capa de oscilación térmica, temperatura media, precipitación, evaporación, topografía, subcuencas de acuerdo a la hidrografía y uso de suelo de la zona, mediante un polígono, se digitalizando las áreas con características semejantes, la estación meteorológica 7160 Simojovel, es la que presenta el mayor área de influencia con un área de 558.88 km², que representa el 12.63% de total.

Se realizó la sincronización de los registros históricos de 8 estaciones hidrométrica y 26 estaciones meteorológicas, con datos diarios.

Se eligieron los eventos del 18 al 23 de octubre de 1989 y del 29 de noviembre al 3 de diciembre de 1990, para definir las zonas de desborde, principalmente en las zonas bajas, haciendo uso del modelo hidrológico MIKE SHE acoplado al modelo hidráulico MIKE 11, generando los hidrogramas simulados, los cuales fueron comparados con los hidrogramas medidos, evaluados mediante la prueba de ajuste del método de Nash, con un valor que oscila entre 0.84 y 0.98. El tiempo de concentración de la cuenca es de aproximadamente 11 horas, desde que se presenta el caudal máximo en la estación Almandro, hasta que se presenta en la estación Tapijulapa.



Una vez calibrado y validado el modelo, se determinaron las zonas vulnerables a inundación, determinándose las zonas más afectadas por los eventos hidrometeorológicos, encontrando zonas con alta vulnerabilidad a inundaciones que van desde los 20 cm hasta los 5 metros de profundidad, de agua en la superficie.

Se presenta una propuesta preliminar para paliar los riesgos de inundaciones, que consistió en proponer una presa de almacenamiento en el cañón Itzantún que se localiza en el cadenamiento 93+970 y la conformación de los bordos en la margen y desazolve, empezando en el cadenamiento 137+919 al 242+612, para controlar los desbordes en la zona baja.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

- Los estudios hidrometeorológicos, permiten analizar, los fenómenos de lluvia escurrimiento, con miras al establecimiento de sistemas de monitoreo en tiempo real, para establecer niveles de alerta en las zonas de desborde.
- El modelo MIKE SHE, tiene la capacidad de representar las fases del ciclo hidrológico en una cuenca, sin embargo el modelo requiere de mucha información puntual, la que no se dispone en México, en su totalidad.
- El modelo MIKE 11, tiene la capacidad de realizar la modelación hidráulica y el tránsito de avenidas, sin embargo, requiere de mucha información, sobre los datos necesarios para caracterizar a un cauce como: rugosidad, geometría de la red hidrográfica principal, secciones transversales y perfiles del cauce precisas, datos que para la magnitud del trabajo, son difíciles de conseguir.
- Sin embargo, el sistema MIKE es una alternativa, para auxiliar en la toma de decisiones en el ámbito del manejo de los recursos hidráulicos de la zona de estudio.
- Los hidrogramas de avenidas generados mediante esta metodología, permiten tener una resolución hasta de minutos, que pueden ser utilizados en el diseño de obras como: puentes, bordos de protección marginal, bordos de almacenamiento, presas, espigones, etc.
- El tiempo de concentración estimado mediante los hidrogramas es de 11 horas aproximadamente, tiempo con que contaría, para alertar a la ciudad de Villahermosa Tabasco y zonas aledañas ante un evento extraordinario.



- Mediante el estudio, se determinó las zonas vulnerables a inundaciones, considerando zonas de inundación que puede variar desde los 0.2 metros hasta 5 metros de profundidad.
- Como una propuesta preliminar para paliar los efectos de escurrimientos extraordinarios, se analiza la construcción de una presa de almacenamiento en el cañón Itzantún y la conformación de los bordos y el desazolve de un tramo del cauce, se pudieran controlar los desbordes en la zona baja; sin embargo, el problema más grave, se debe al drenaje de la zona de la llanura de inundación aledaña a Villahermosa, principalmente después de que el río la Sierra se conecta al Grijalva, provocando incrementos en los niveles del agua en las zonas de encuentro entre los ríos, dificultando su descarga.
- Sin embargo, los modelos hidrológicos e hidráulicos, como la serie MIKE, permiten generar escenarios, que auxilian en la toma de decisiones, para prevenir y disminuir los riesgos por inundaciones.



CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES

- Para estudios posteriores, se recomienda utilizar una descripción más detallada de la superficie, utilizando un modelo de elevación, con mayor resolución, como el modelo Lidar, INEGI (2000) que presenta una resolución de 5 metros ó si las condiciones y el recurso lo permiten, realizar un levantamiento detallado de las secciones transversales del cauce, mínimo a cada 500 metros, por lo menos en las zonas bajas, abarcando hasta el nivel de aguas máximos extraordinario (NAME).
- Realizar investigación en cuanto a los parámetros de rugosidad, en el dosel de los cultivos y la cobertura vegetal de los diferentes tipos de vegetación que se presentan en la zona de estudio y para los parámetros de rugosidad en el cauce, utilizar metodologías que permitan obtener un valor más preciso de n , considerando el diámetro de las rocas que conforman al cauce, tanto en el fondo como en los taludes del mismo.
- Para las pruebas de infiltración, realizarla para cada estrato dentro de un perfil de suelo con profundidad mínima de 1.8 metros.
- Tener estudios sobre el coeficiente de cultivo, índice de área foliar y el desarrollo de la zona de raíces, a nivel de cada tipo de cultivo que se tenga en la zona.
- Generar mapas de vulnerabilidad, utilizando índices donde se incluya, la calidad de vida en las diferentes comunidades, según lo establece el CENAPRED, 2004, en la guía para realizar atlas de riesgo por fenómenos hidrometeorológicos.



CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, M. B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986a. An introduction to the European Hydrological System. Systéme hydrologique Europeen SHE 1: History and philosophy of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- Abbott, M. B., J.C. Bathurst, J. A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986b. An introduction to the European Hydrological System. Systéme hydrologique Europeen SHE 2: Structure of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology* 87, 61-77.
- Ahuja, L. R., and D. Swartzendruber. 1972. An improved form of soil-water diffusivity function. *Soil Sci. Soc. Am.* Pág. 9-14.
- Allen G. Richard, Pereira S. Luis, Raes Dirk y Smith Martin. 2006. Food and Agriculture Organization. Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Boletín 56. Roma, Italia.
- Aparicio Mijares, Francisco J. 1999. Fundamentos de hidrología de superficie. 7ª Edición. Editorial Limusa. México, D.F.
- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.* 119(3): 429-442.
- Benavides S., J.D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría del Colegio de Postgraduados. Montecillo, México 261 p.
- Campos Aranda, D. F., (1992), "Procesos del ciclo hidrológico", Segunda Reimpresión, Universidad Autónoma de San Luis Potosi.
- Carsel, R. y Parrish, R. 1988. Developing joint probability of soil water retention characteristics. *Water Resource. Res.*, 24(5), 755-769
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de riesgos de la República Mexicana. México D.F.



- Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2004. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Atlas Nacional de riesgos de la República Mexicana. México D.F.
- Chávez M. J. 2007. Hidrología superficial. Apuntes del curso. Notas de Clase. Depto. de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, México.
- Chow V. T. 1994. Hidrología aplicada. 1994. Mc. Graw Hill Inc. EUA.
- Chow, V. T., D.R. Maidment and L.W. Mays. 1988. "Applied Hydrology". McGraw Hill Co. First Edition.
- Chow, Ven Te, 1994. Hidráulica de canales abiertos. Editorial McGraw-Hill interamericana. Santa fé de Bogotá, Colombia.
- Chow, Ven Te, Editor in Chief. 1964. Handbook of Applied Hydrology A compendium of Water Resources Technology. Mc. Graw Hill Book Company. U.S.A
- Camp Dresser & McKee Inc. 2001. Evaluation of Integrated Surface Water and Groundwater Modeling Tools. Inglaterra.
- De Weist Roger J. M. 1965. Geohydrology. John Wiley and Sons, Inc. New York, U.S.A.
- Díaz Padilla, Gabriel., Sánchez Cohen, Ignacio., Quiroz, Roberto., Garatuza Payán, Jaime., Watts Thorp, Christopher y Cruz Medina, Isidro R. 2008. Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. Agricultura técnica en México. México.
- DHI Water & Environment. 2005. MIKE SHE- Basic Exercises. Denmark Hydrologic Institute. Denmark. 162 p.
- Donigian, A.S. Jr., Baker, D.A. Haith and M.F. Walter. 1983. HSPF Parameter Adjustments to Evaluate the Effects of Agricultural Best Management Practices, EPA Contract No. 68-03-2895, U.S. EPA Environmental Research Laboratory, Athens, GA, (PB-83-247171).
- Kristensen, K. J., Jensen, S. E., 1975. A model of estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. Nordic Hydrol. 6, 170-188.



- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.
- Linsley, Jr. Ray K., Kohler Max A. y Paulhus, Joseph L. H., 1977. “Hidrología para Ingenieros”, Editorial Mc Graw-Hill, México, D. F., pp. 350.
- Llamas, J. 1993. *Hidrología general. Principios y aplicaciones.* Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Quebec, Canadá.
- Maza A., J. A. y V. Franco. 1990. Obras de protección para control de inundaciones. Manual de ingeniería de Ríos. Capítulo 15. Universidad Nacional Autónoma de México, México. D.F. pp: 85-89.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290
- Rawls W. J., Brakensiek D. L., Saxton K. E. 1982. Estimation of Soil Water Properties. ASAE. Michigan EUA.
- Refsgaard, J. C., S. M. Seth, J. C. Bathurst, M. Erlich, B. Storm, G. H. Jorgensen and S. Chandra. 1992. Application of the SHE to catchment in India- Part 1: General results. *Journal of Hydrology*, 140, 1-23.
- Schaap, M. G , y F. J. Leij. 2000. Mejorar la predicción de la conductividad hidráulica no saturada con el modelo de Mualem-van Genuchten, *Soil Sci.. Soc. Soy. J. ,* 64:843-851. EUA.
- Sevat, E., and A. Dezetter. 1991. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sci. J.* 36(4): 307-330.
- Subdirección de Hidrología. 1980. Boletín Hidrológico. Región Hidrológica Núm. 30, Cuenca del La Sierra y Teapa. Direccione General de Estudios, Subsecretaría de Planeación. Secretaria de Recursos Hidráulicos. México.
- Tetumo García, Jorge. 1993. *Apuntes De Hidrología Superficial.* Universidad autónoma Chapingo. Departamento de irrigación. Chapingo, México.



- Van Genuchten M. T. 1980. A closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Reprinted from the Soil Science Society of American Journal. Volume 44, no. 5. EUA.
- Verwey A. 1995. Introducción a los modelos. Curso Nacional De Drenaje Agrícola y Control de Inundaciones al nivel Postgrado. Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Viessman, Jr. Warren and Lewis, Gary L., (1995), "Introduction to Hydrology", Fourt Edition, HarperCollins College Publishers, Unites States of America, pp. 759.
- Vijay P., Singh. 1995. Computer models of watershed Hydrology. Water Resources Publications, Colorado EUA. 733-781 p.
- Viramontes O, Escoboza L, Pinedo C, Pinedo A, Reyes V, Roman J, Pérez A. 2008. Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua.



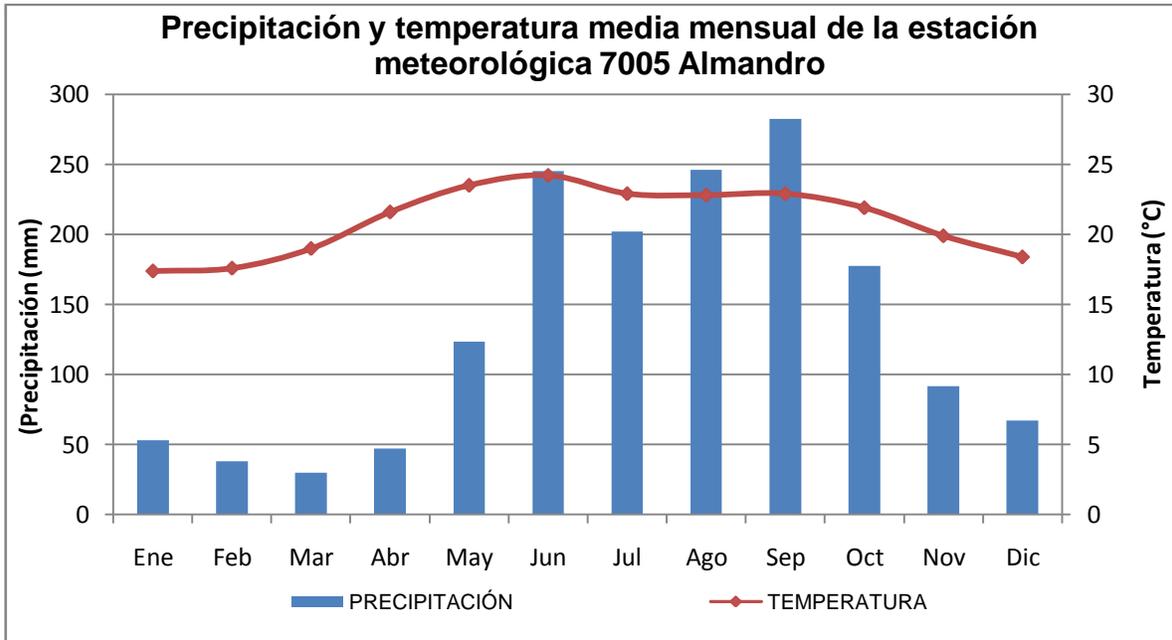
ANEXOS

A1. Graficas de Precipitación y temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas convencionales consideradas.

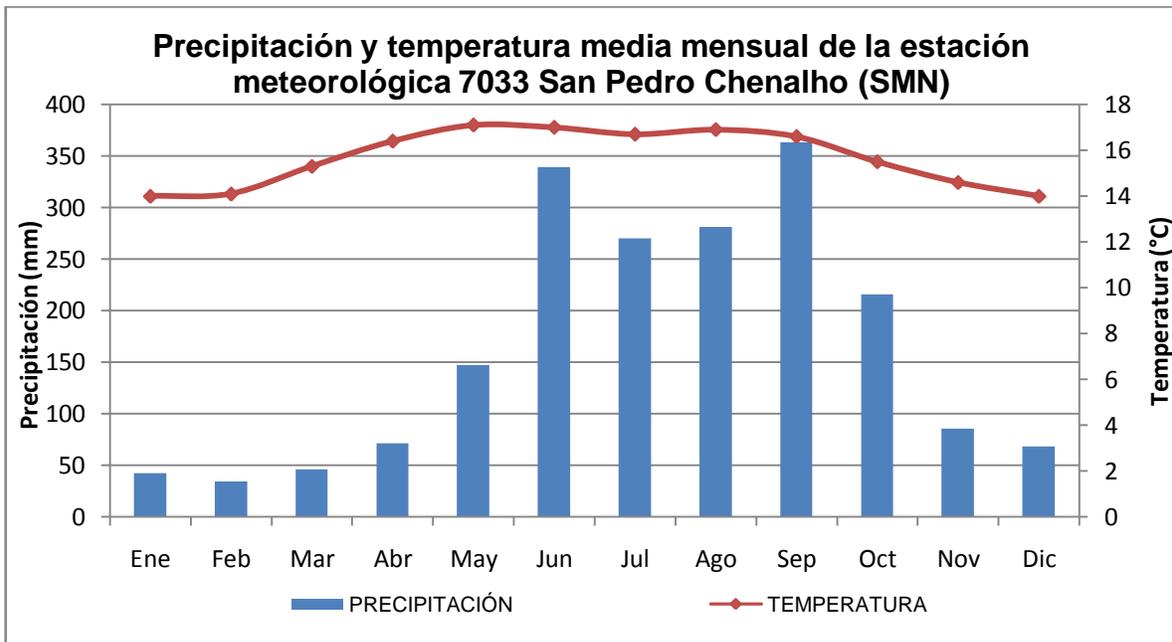
A2. Mapas



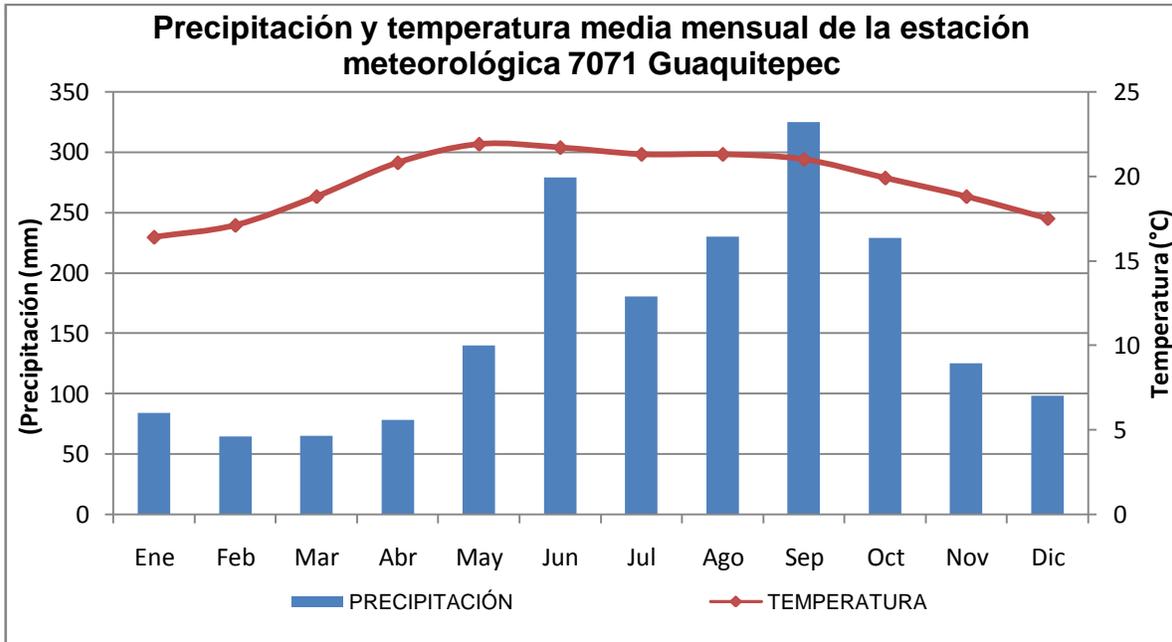
Anexo A.1. Graficas de Precipitación y temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas convencionales.



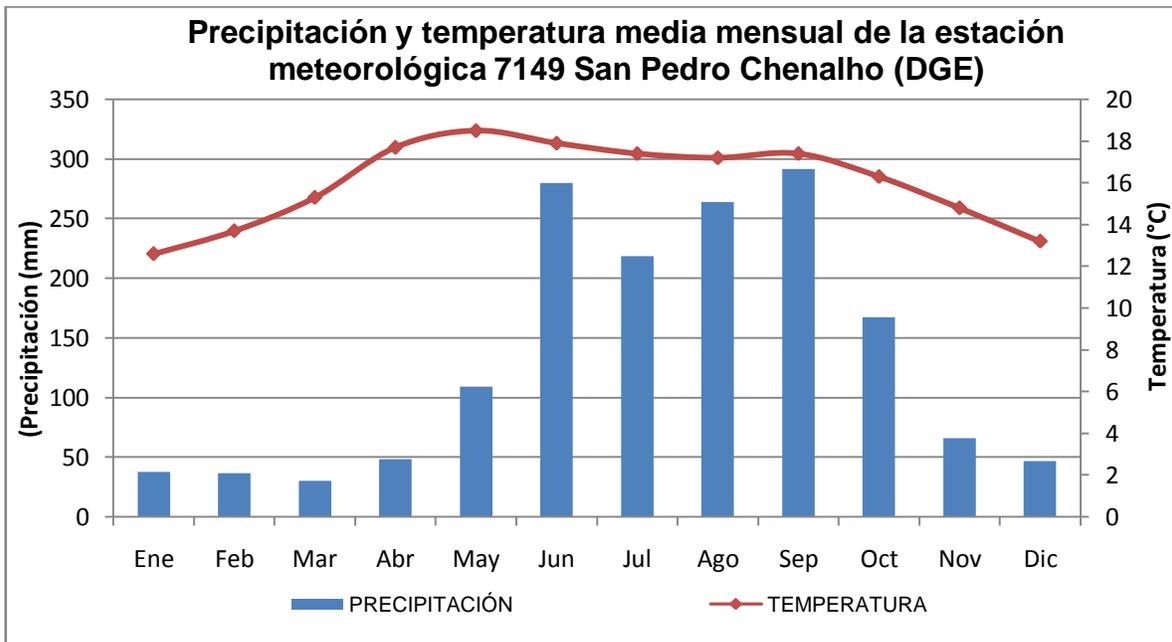
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7005 Aljandro



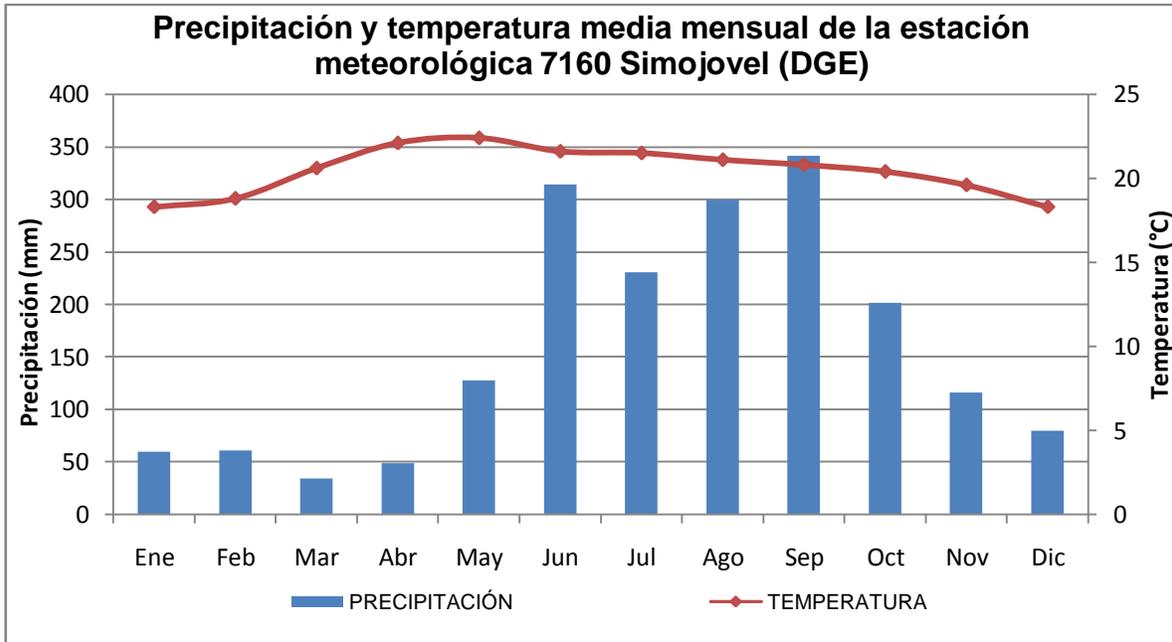
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7033 San Pedro Chenalho (SMN)



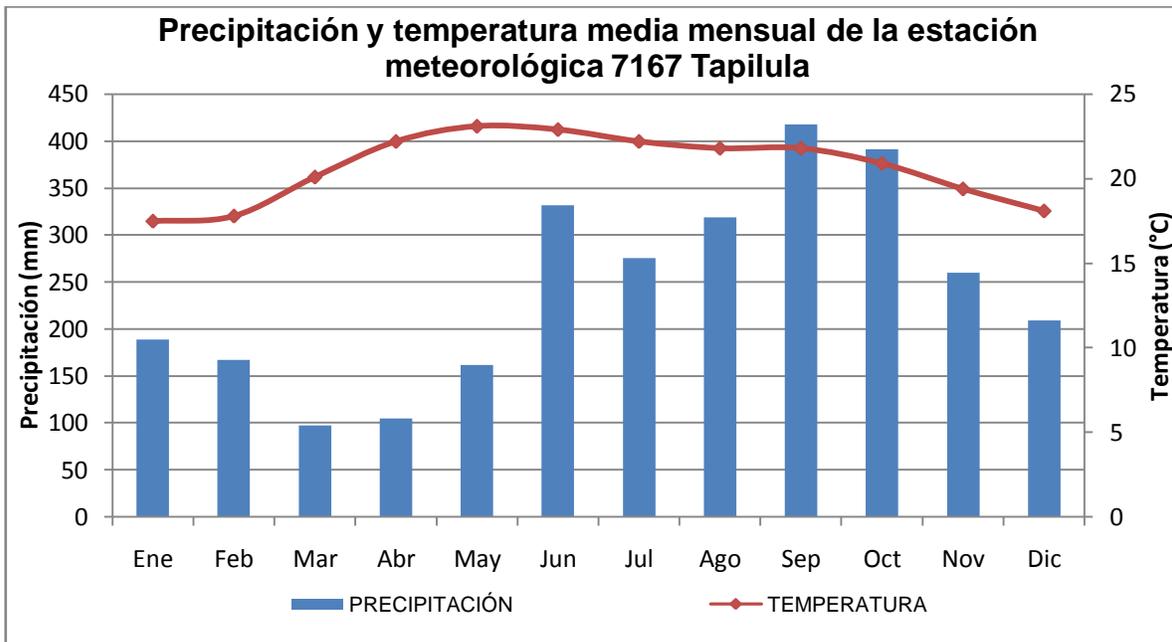
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7071 Guaquitepec



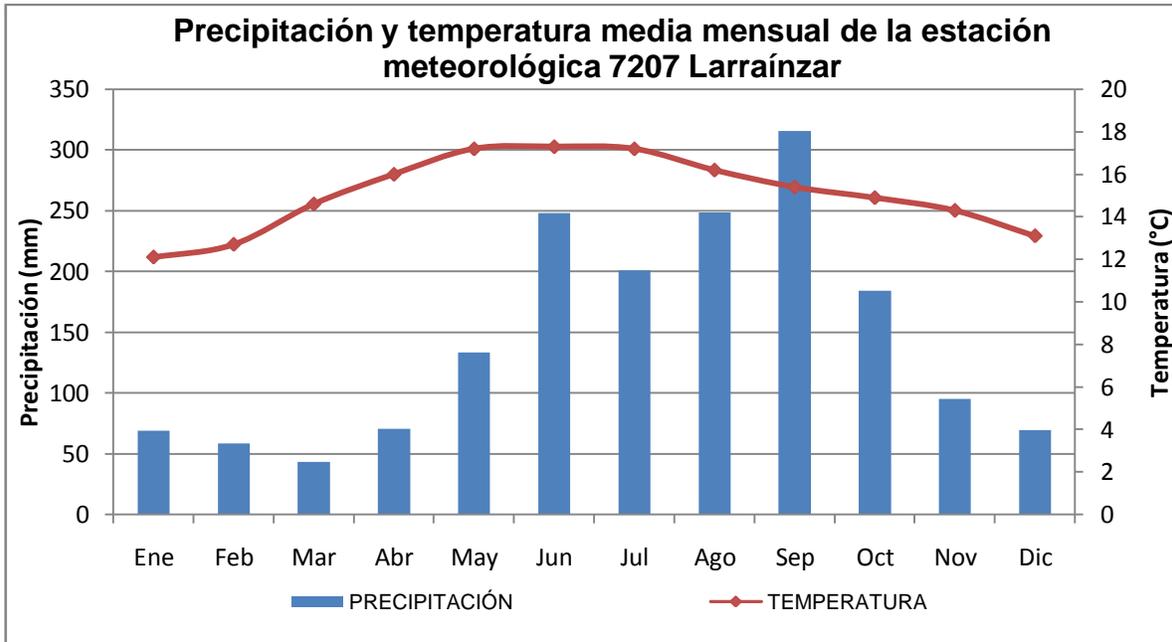
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7149 San Pedro Chenalho (DGE)



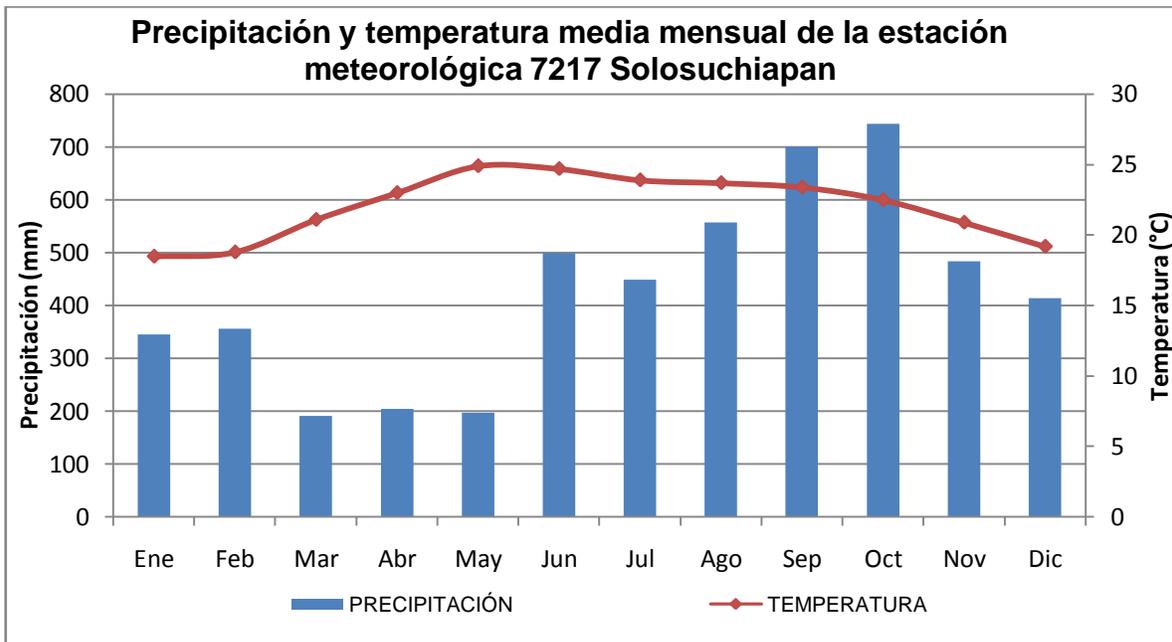
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7160 Simojovel (DGE)



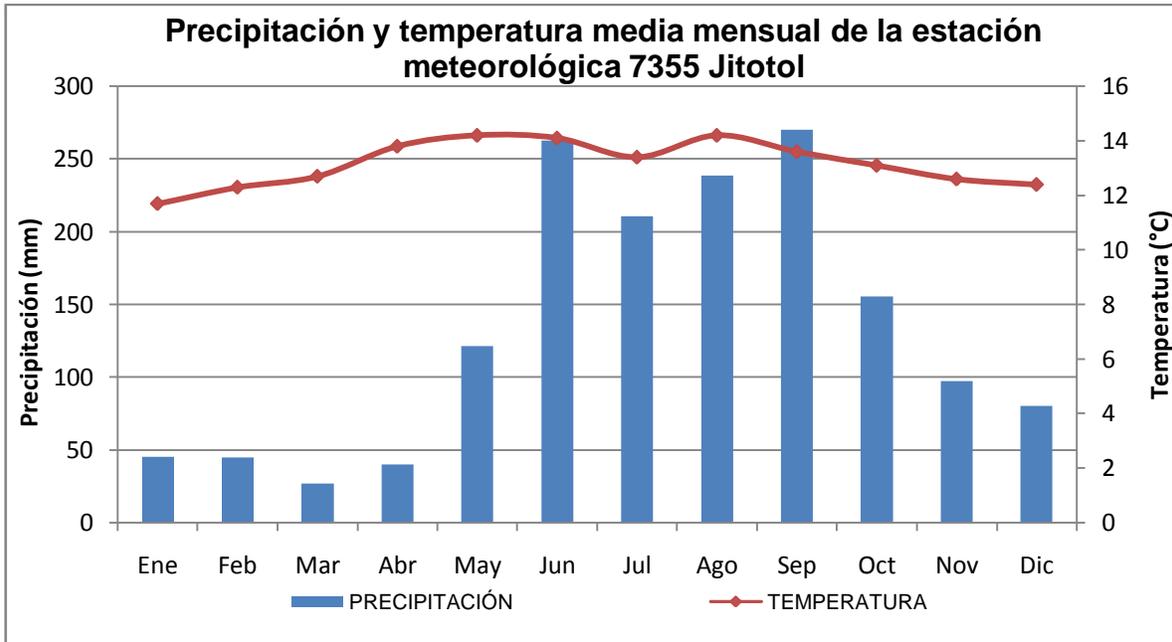
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7167 Tapilula



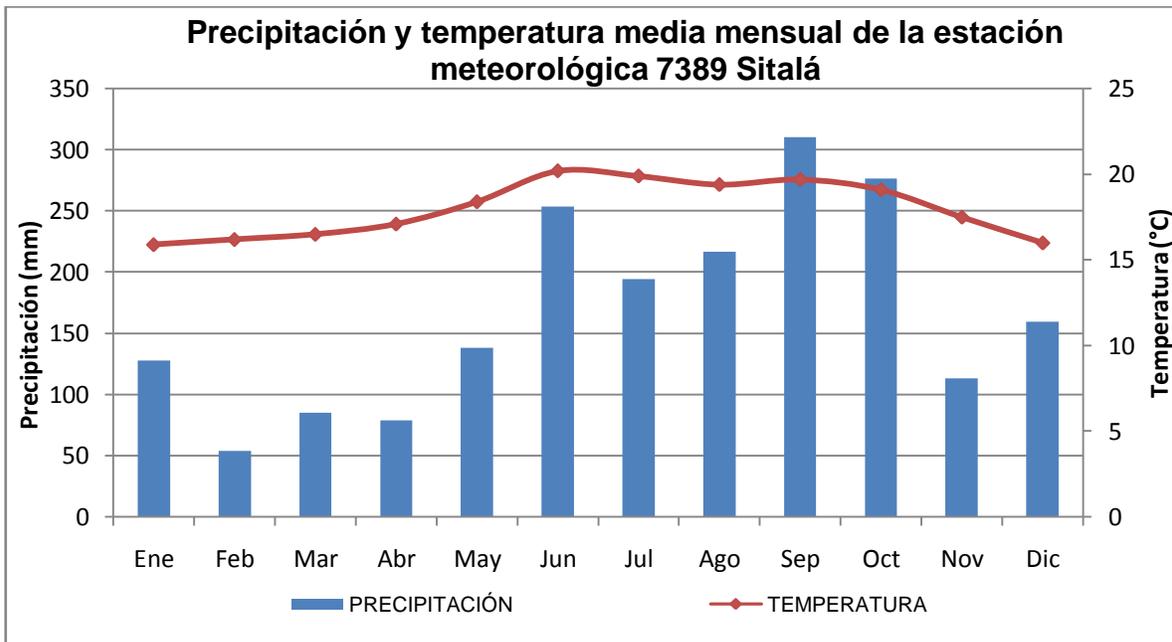
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7207 Larrainzar



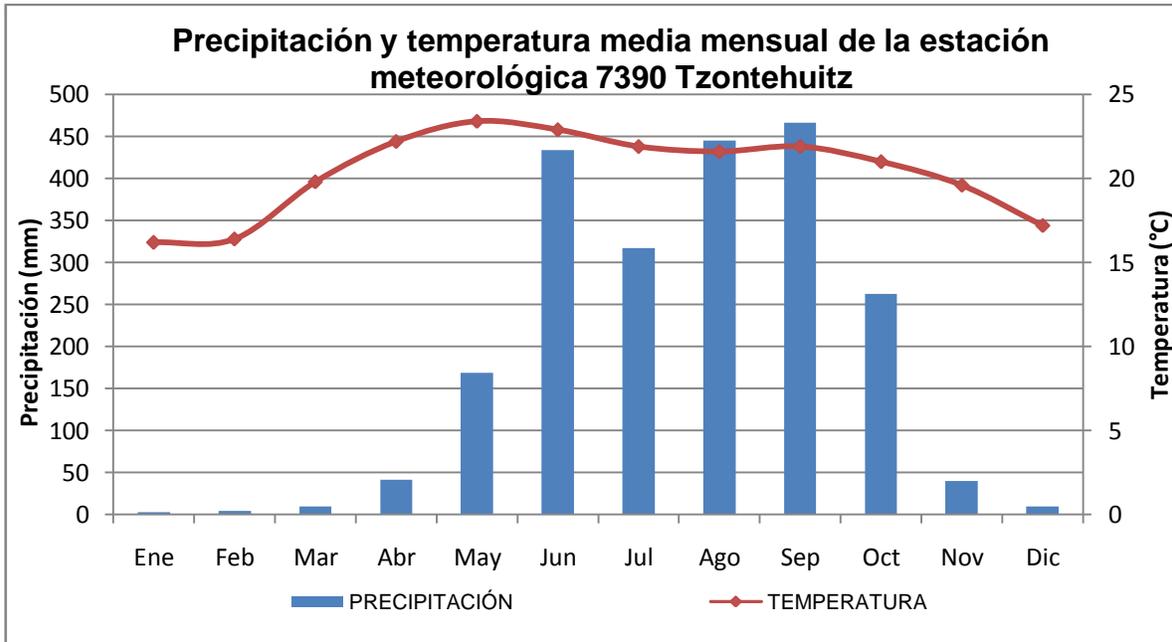
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7217 Solosuchiapan



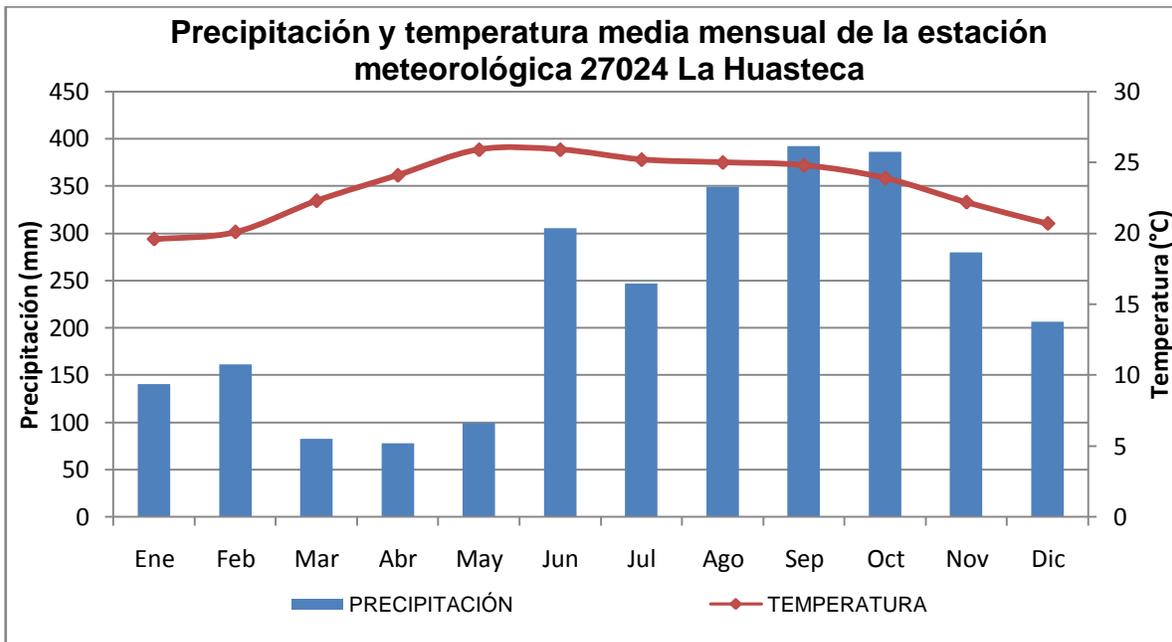
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7355 Jitotol



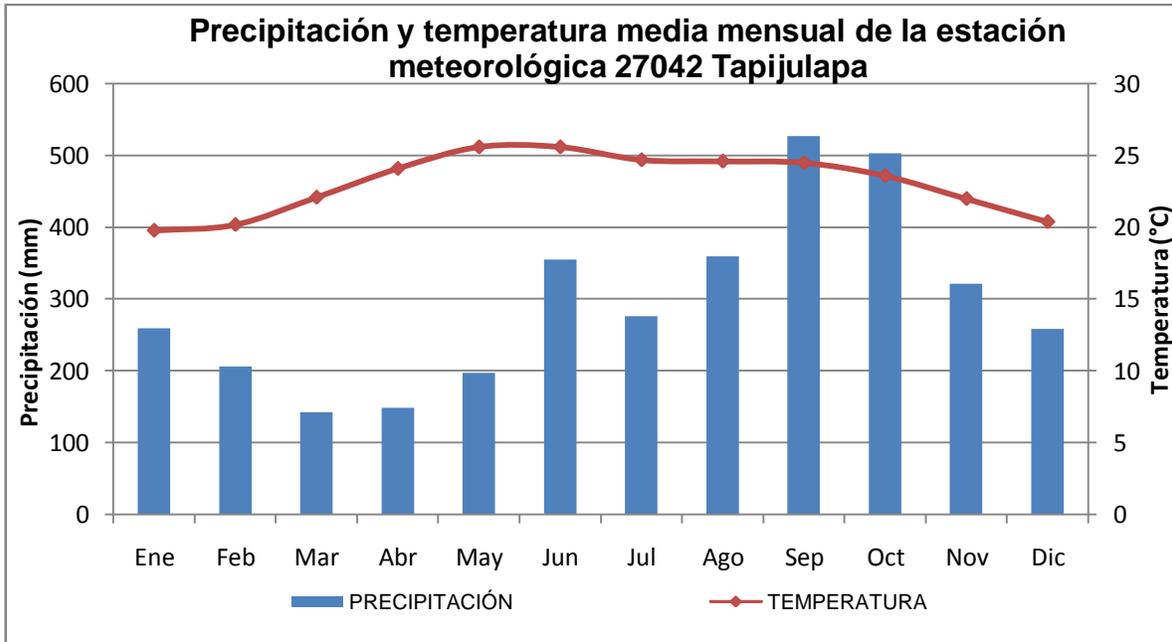
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7389 Sitalá



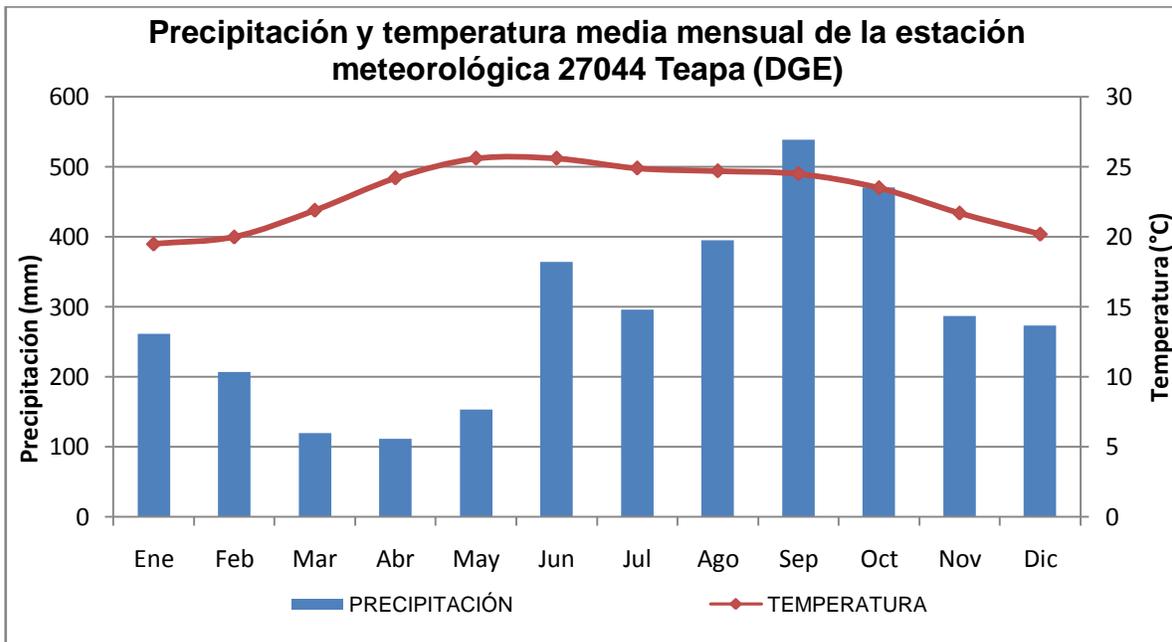
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 7390 Tzontehuitz



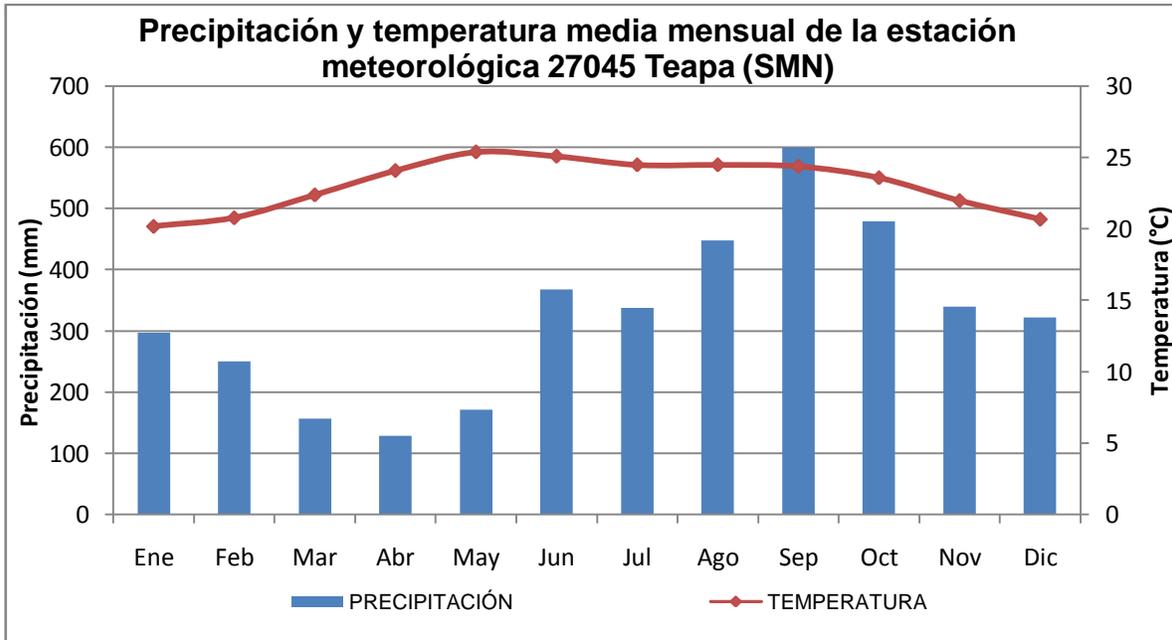
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27024 La Huasteca



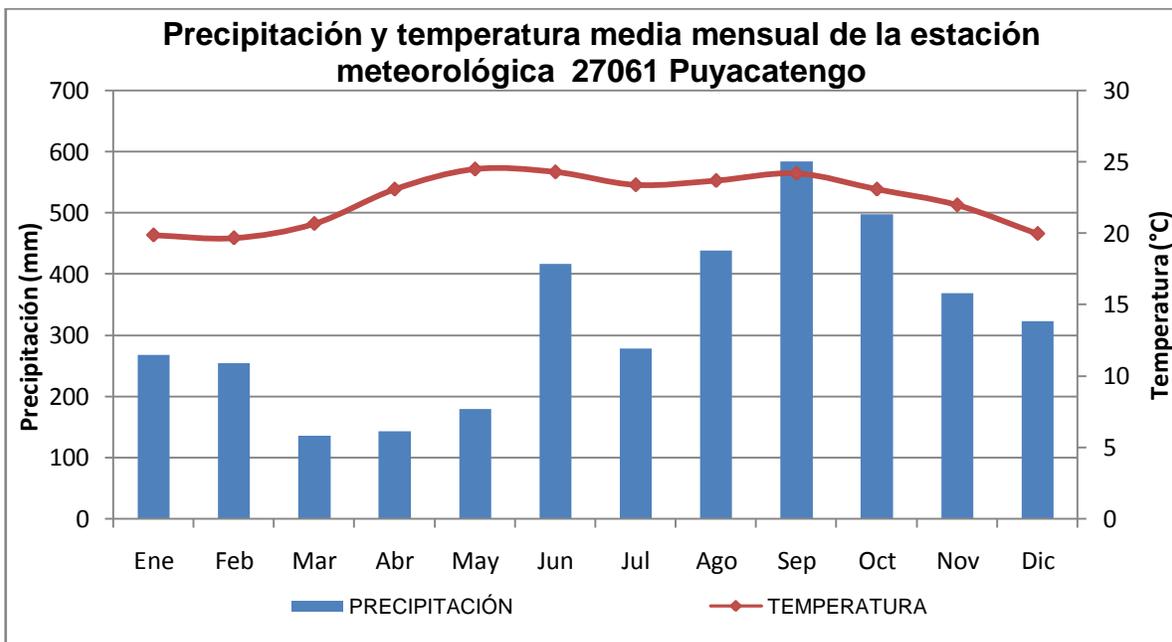
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27042 Tapijulapa



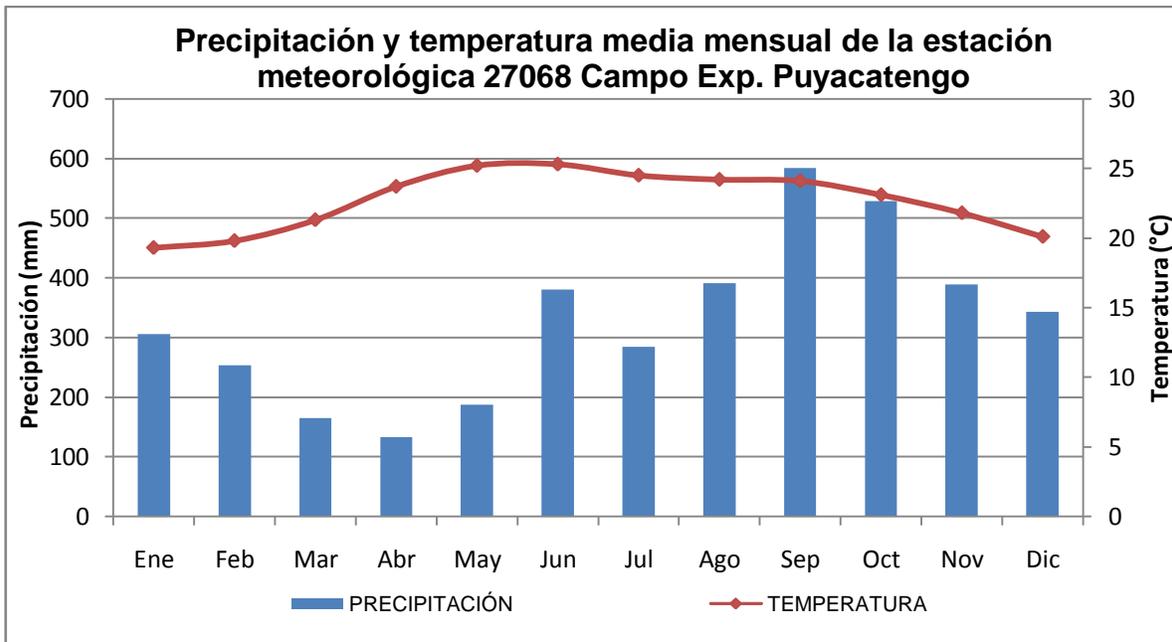
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27044 Teapa (DGE)



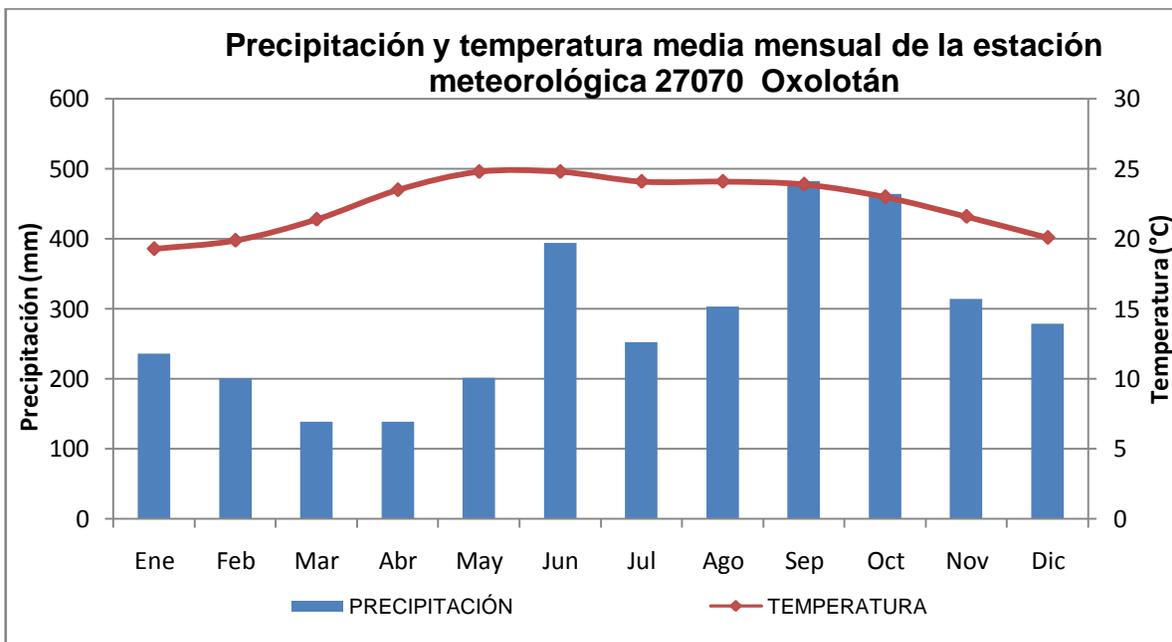
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27045 Teapa (SMN)



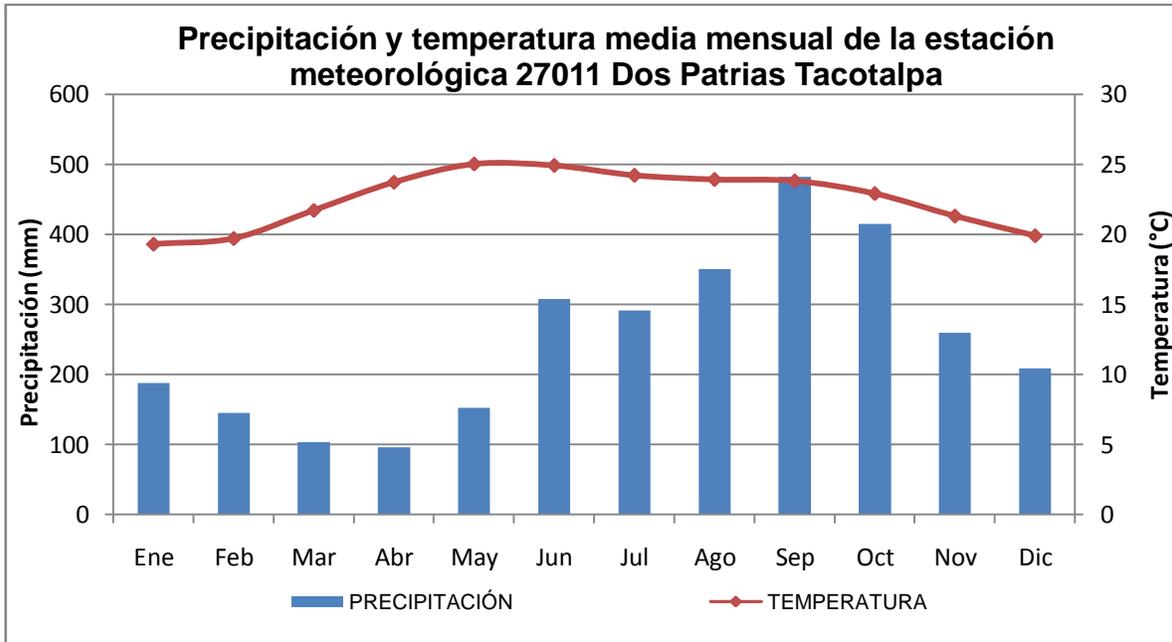
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27061 Puyacatengo



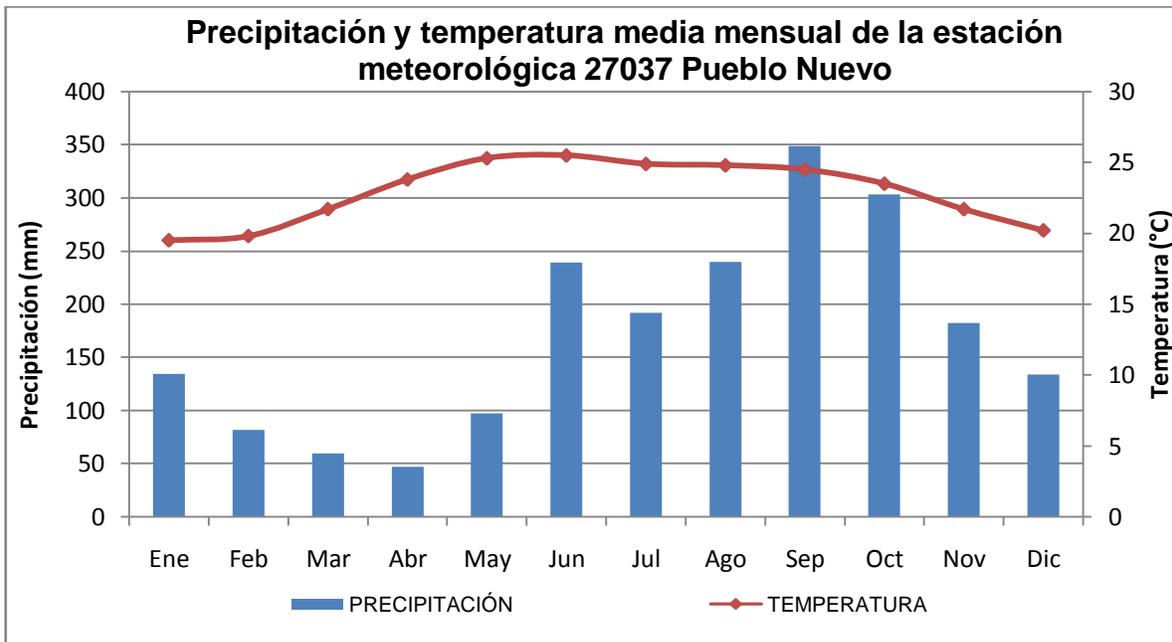
Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27068 Campo Exp. Puyacatengo



Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27070 Oxolotán



Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27011 Dos Patrias Tacotalpa



Precipitación y temperatura media mensual de la estación meteorológica 27037 Pueblo Nuevo



Anexo A2. Mapas

Mapa 1. Topografía

Mapa 2. Delimitación de las cuencas

Mapa 3. Hidrografía

Mapa 3. Fisiografía

Mapa 4. Unidades geológicas y elementos estructurales

Mapa 5. Topoformas, provincias y subprovincias

Mapa 6. Edafología

Mapa 7. Uso de suelo y vegetación

Mapa 8. Clima

Mapa 9. Temperatura media anual

Mapa 10. Evaporación media anual

Mapa 11. Precipitación máxima en 24 horas

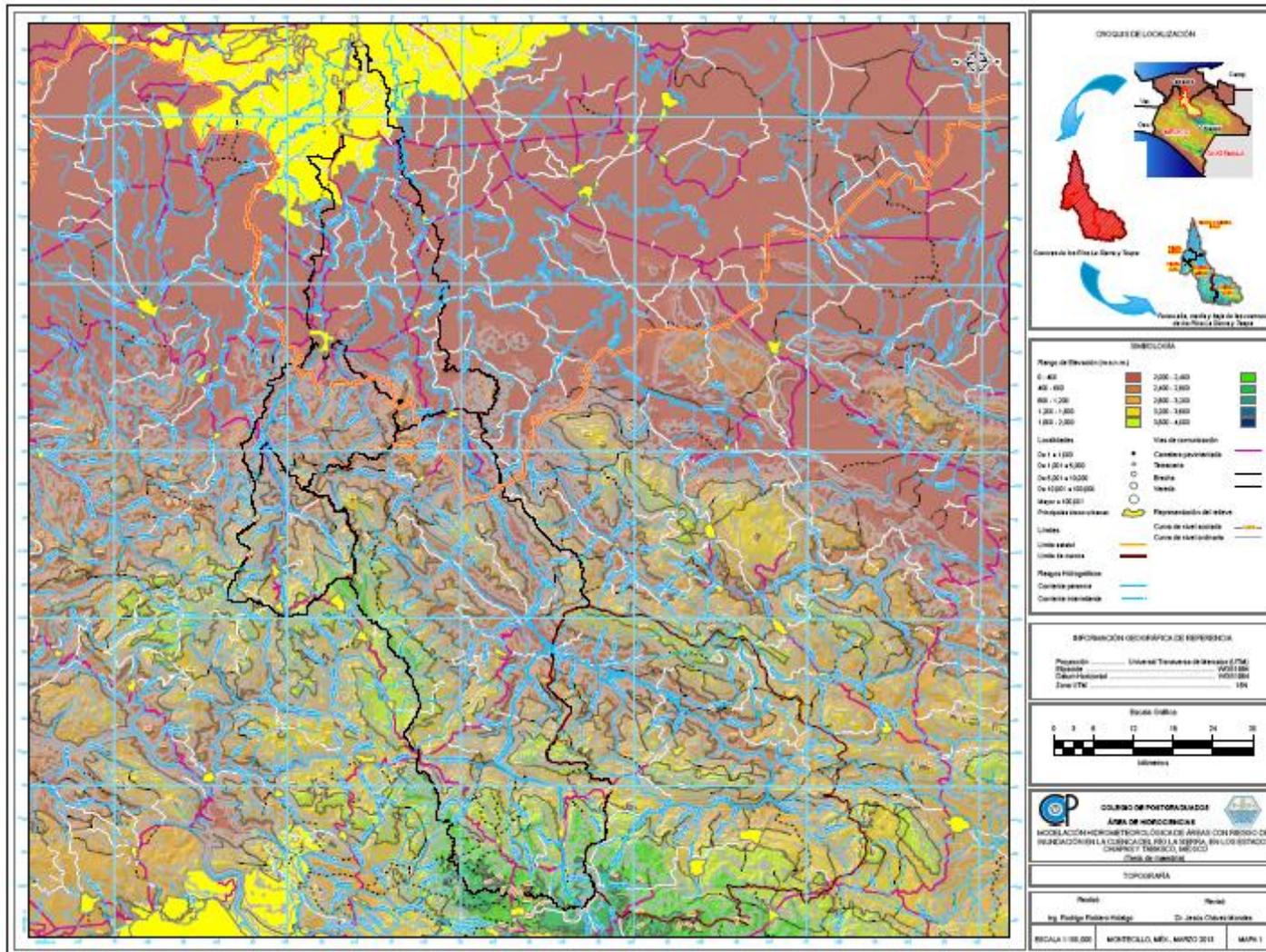
Mapa 12. Precipitación media anual

Mapa 13. Precipitación máxima anual

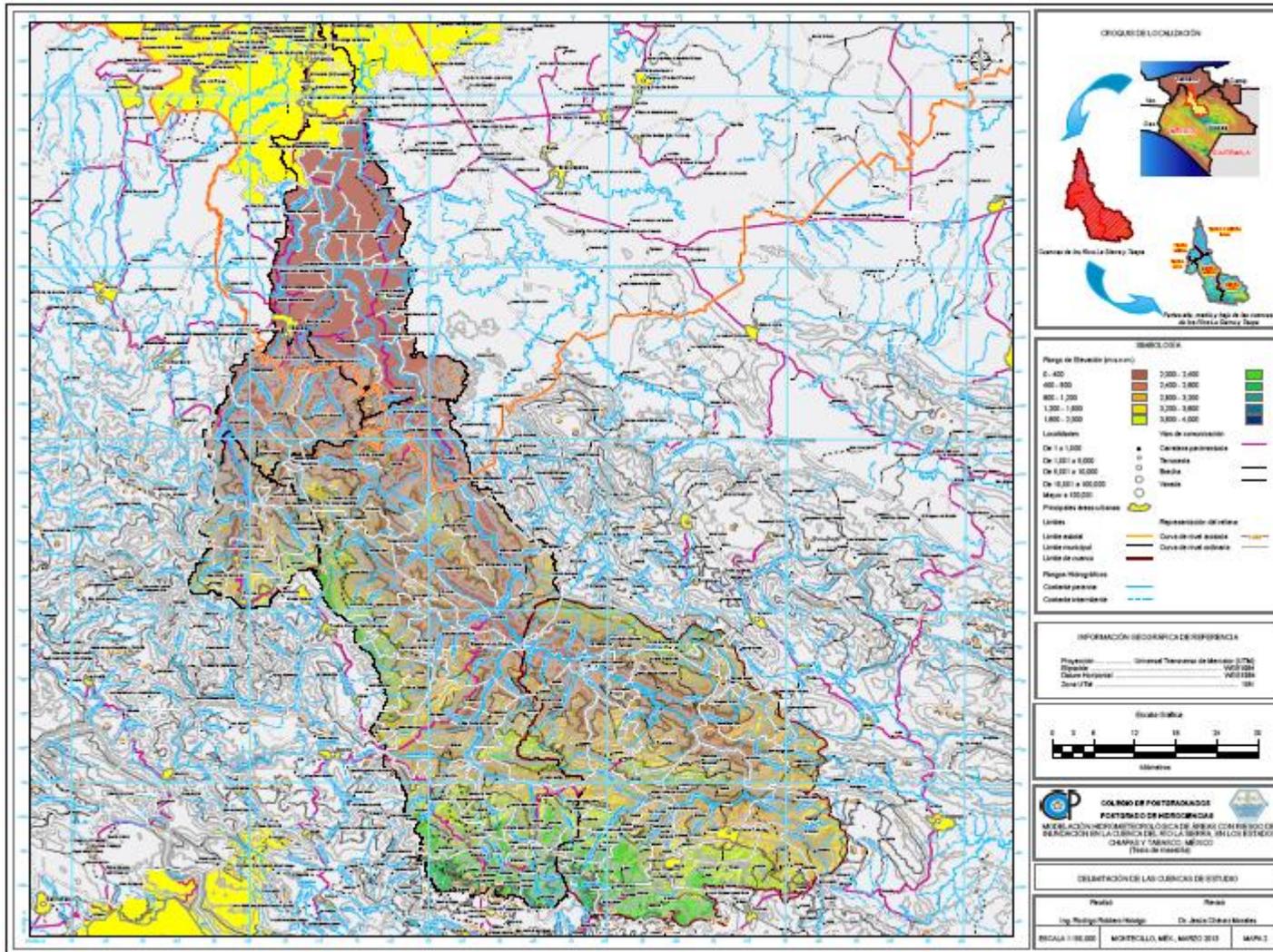
Mapa 14. Evapotranspiración media anual

Mapa 15. Vulnerabilidad por inundaciones

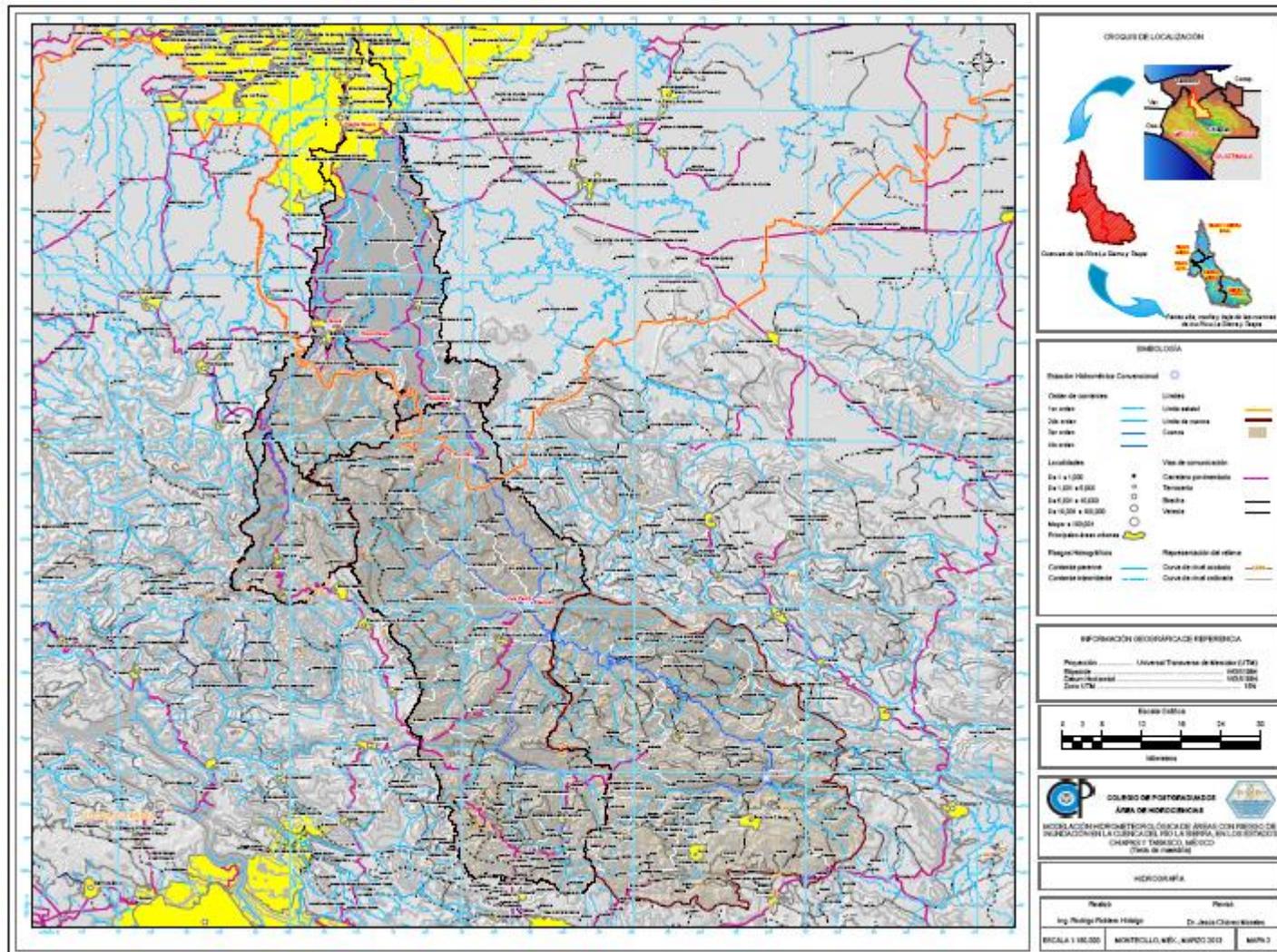
Mapa 16. Propuestas de obras y acciones a realizar en el río La Sierra



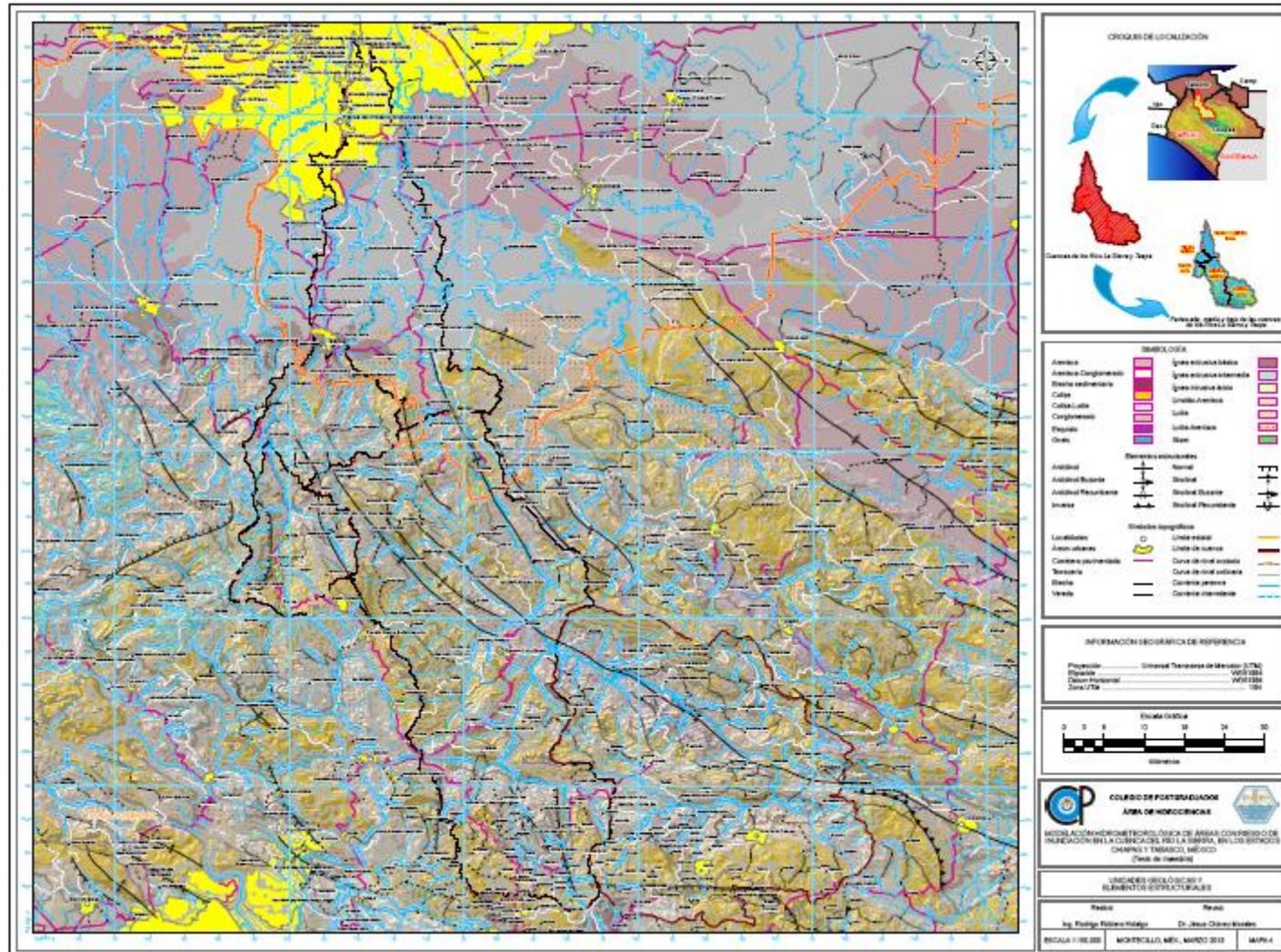
Mapa 1. Topografía



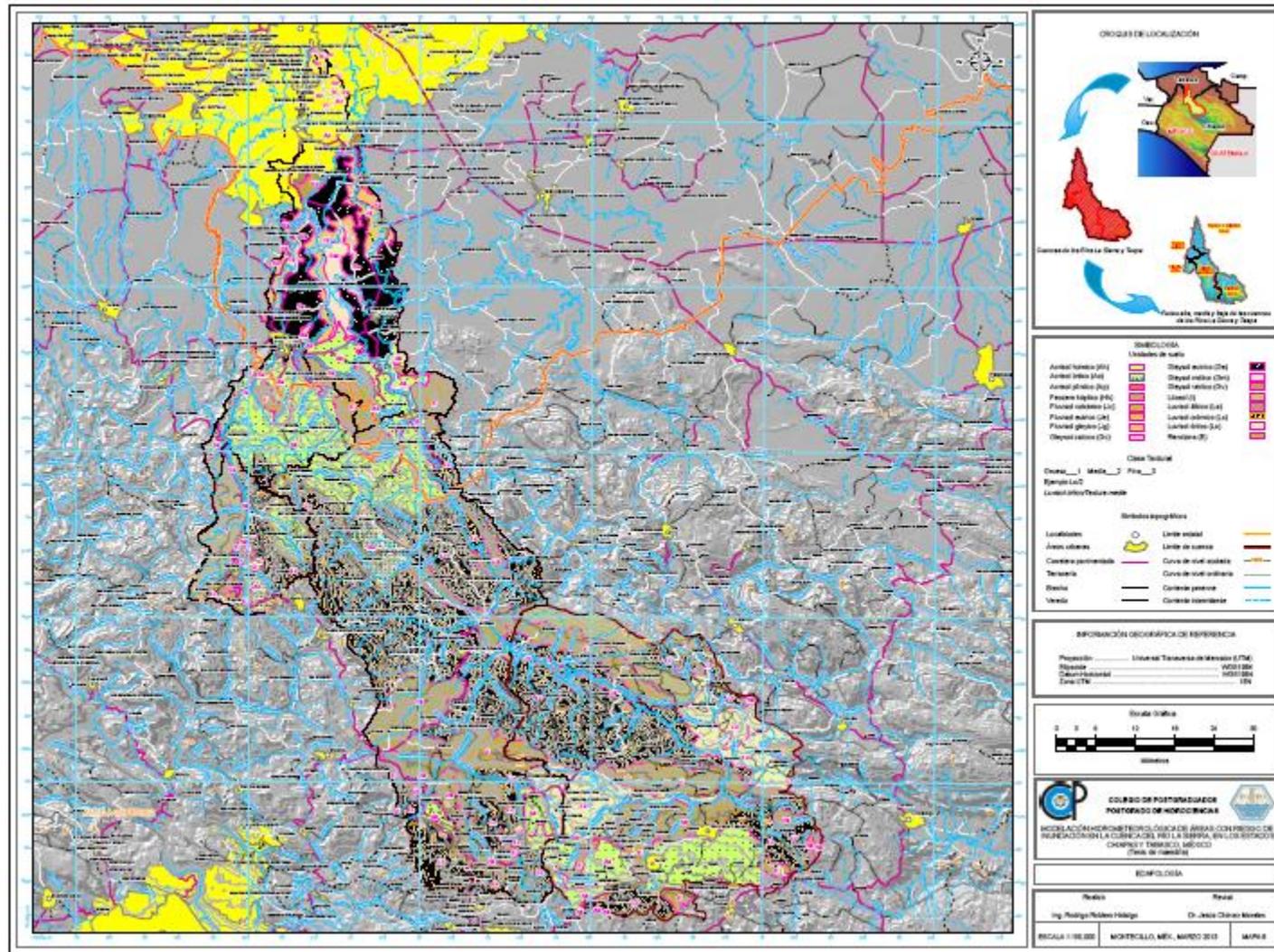
Mapa 2. Delimitación de las cuencas



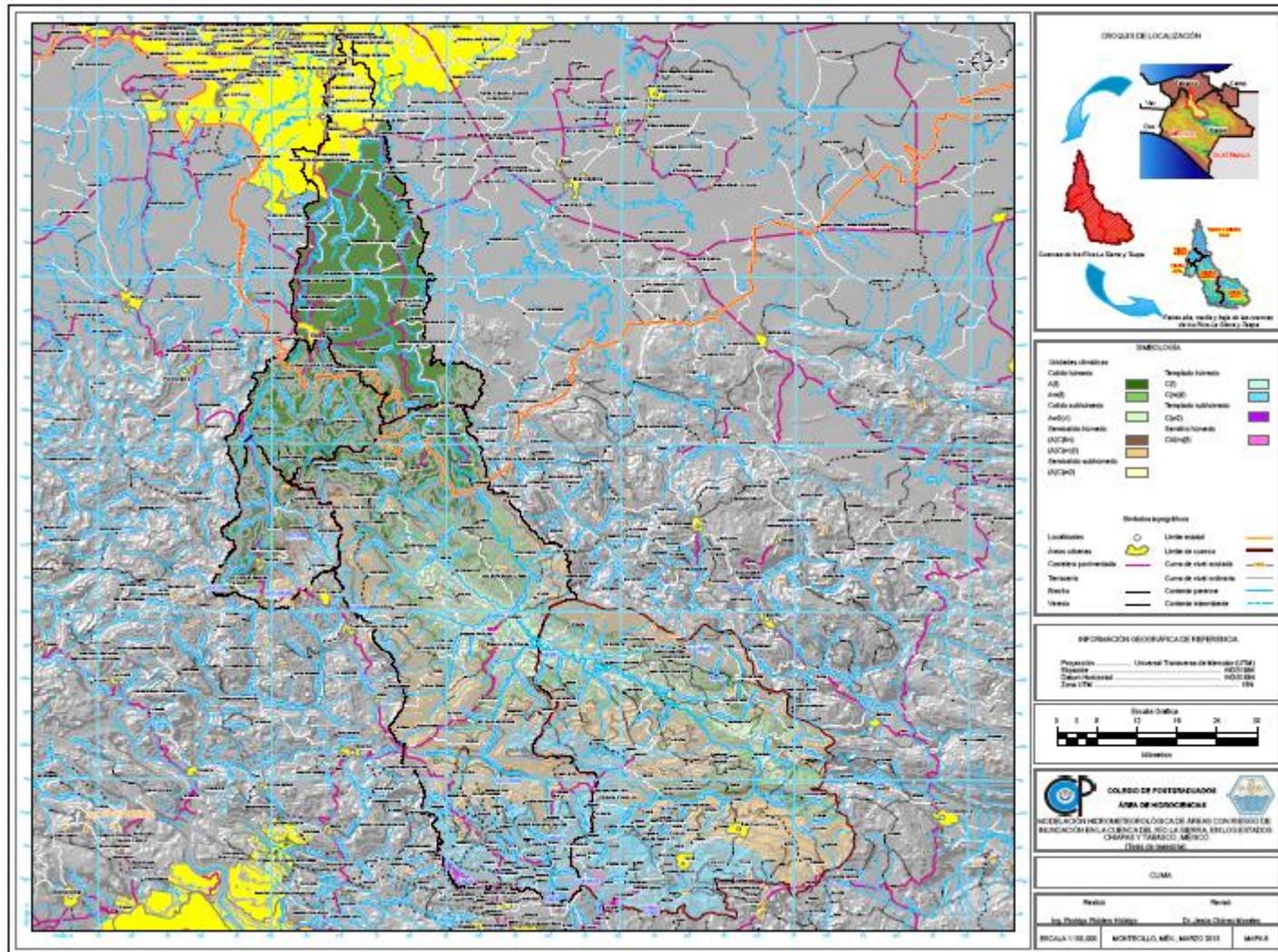
Mapa 3. Hidrografía



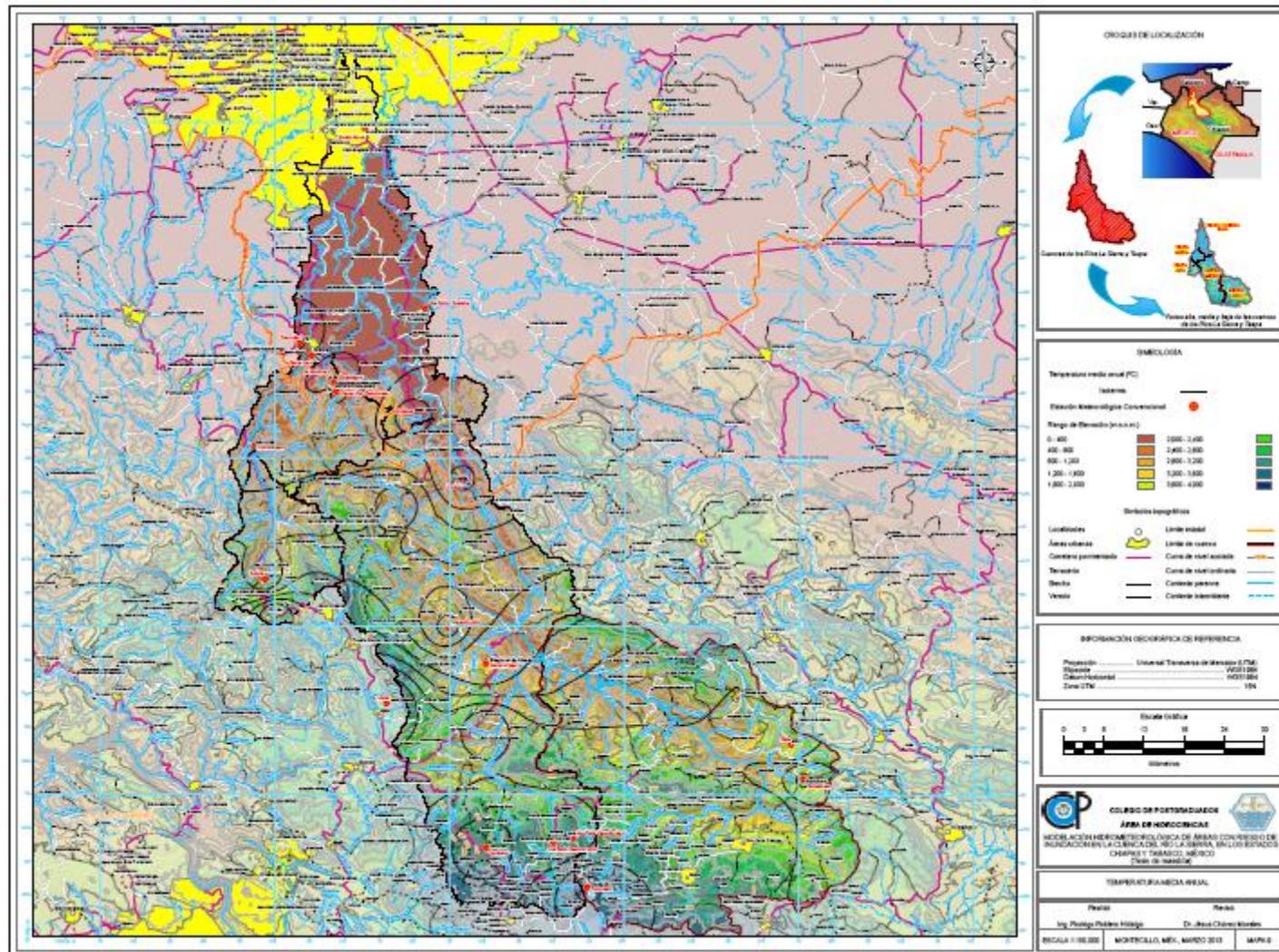
Mapa 4. Unidades geológicas y elementos estructurales



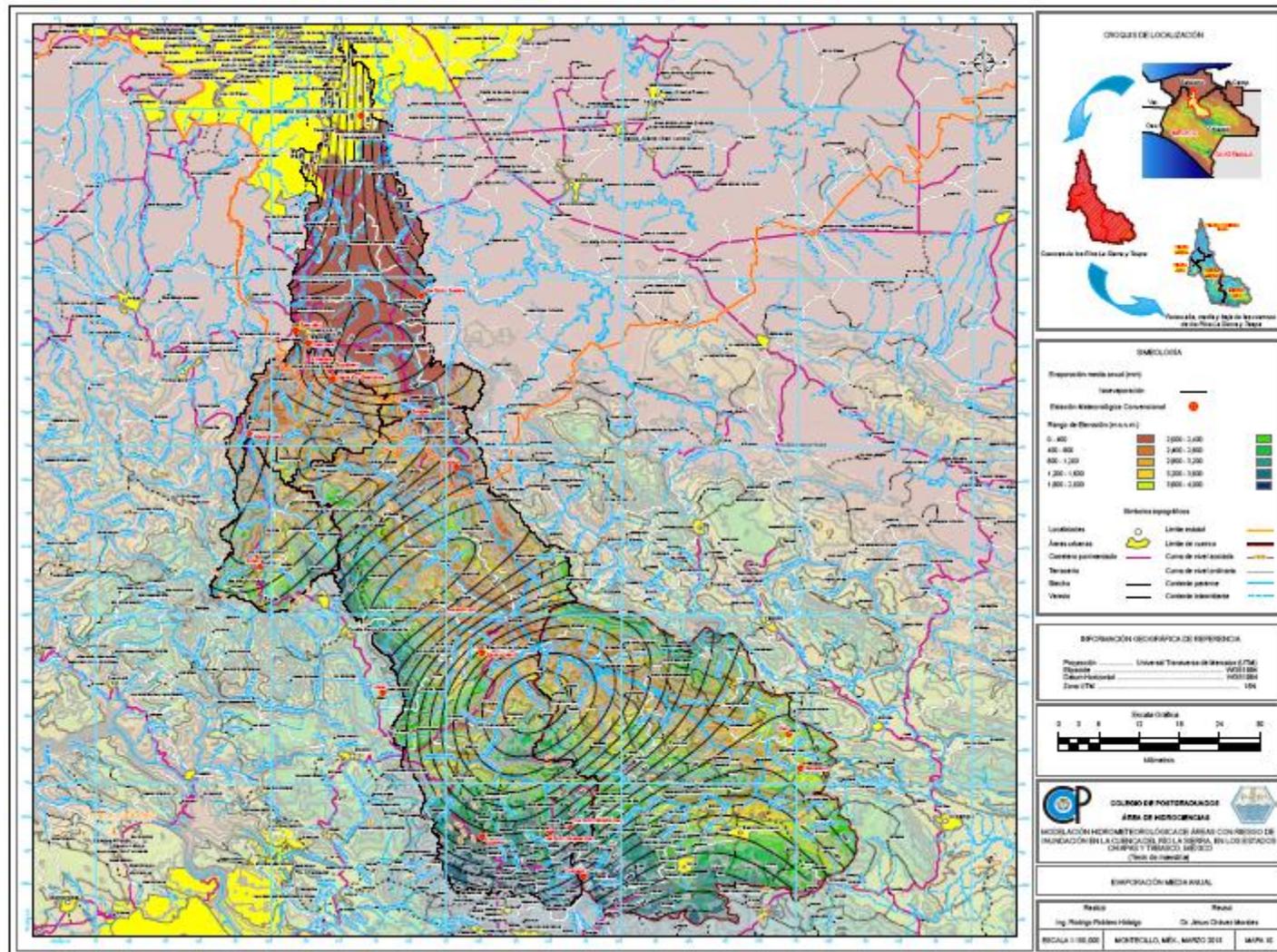
Mapa 6. Edafología



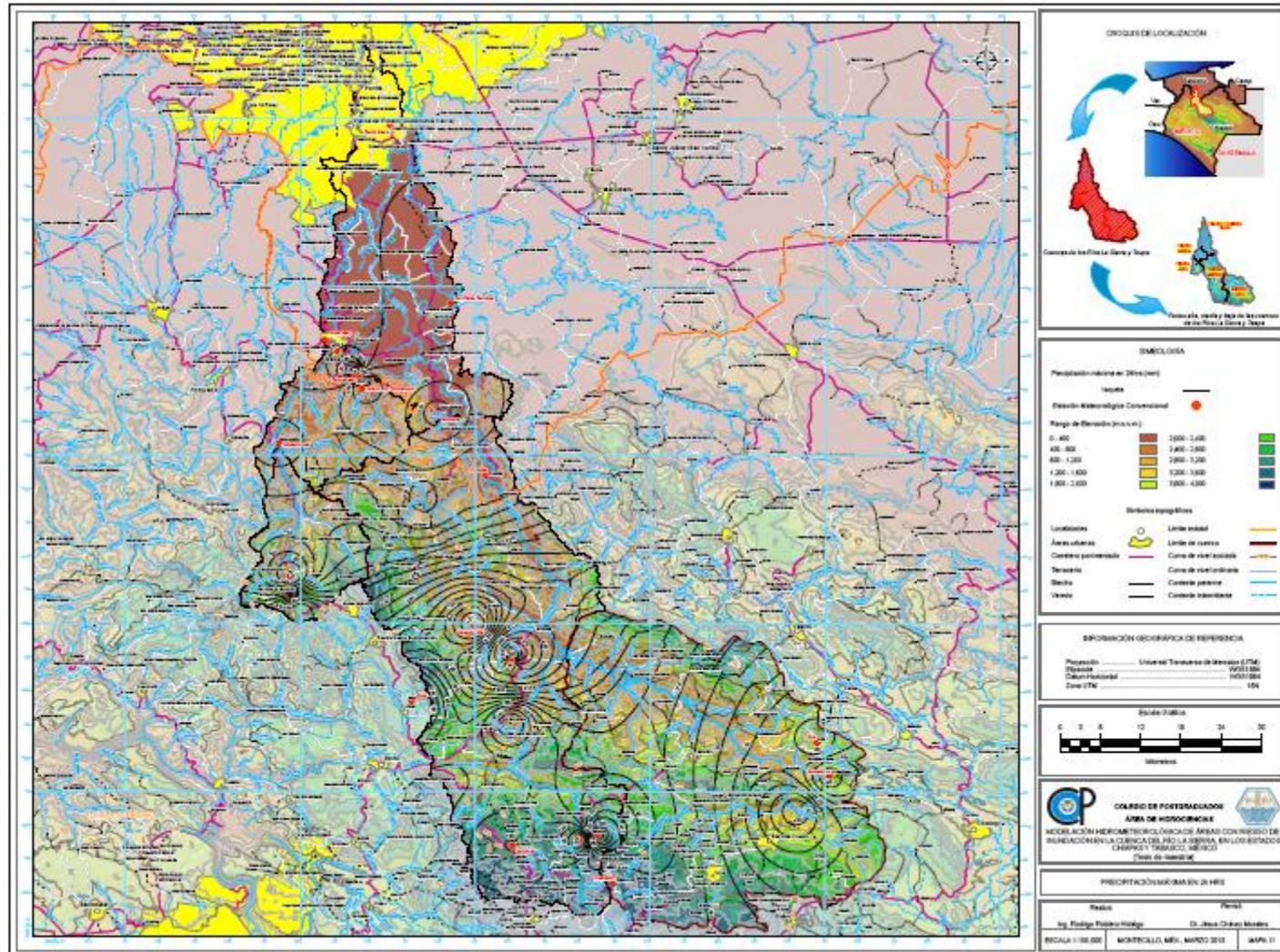
Mapa 8. Clima



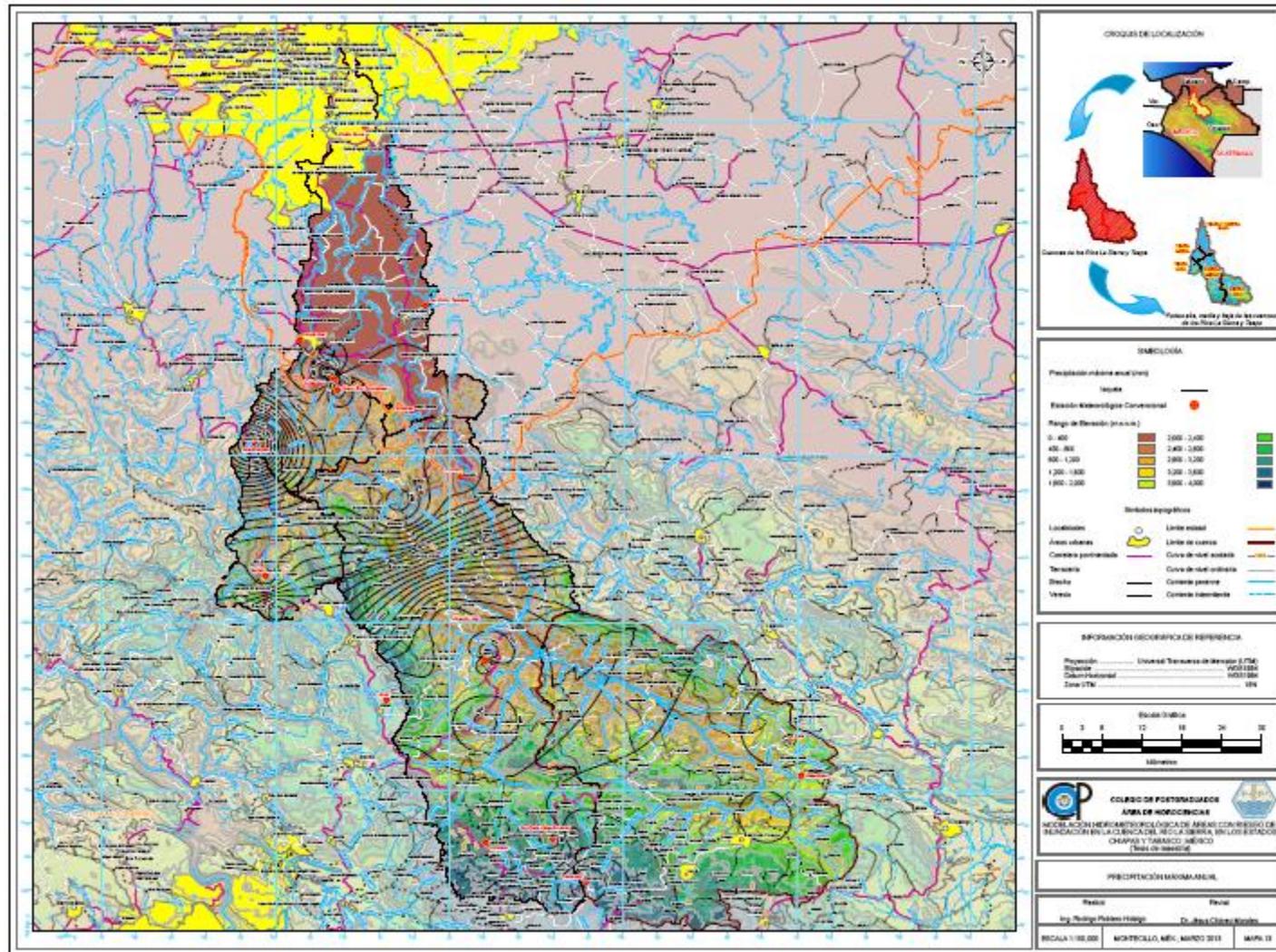
Mapa 9. Temperatura media anual



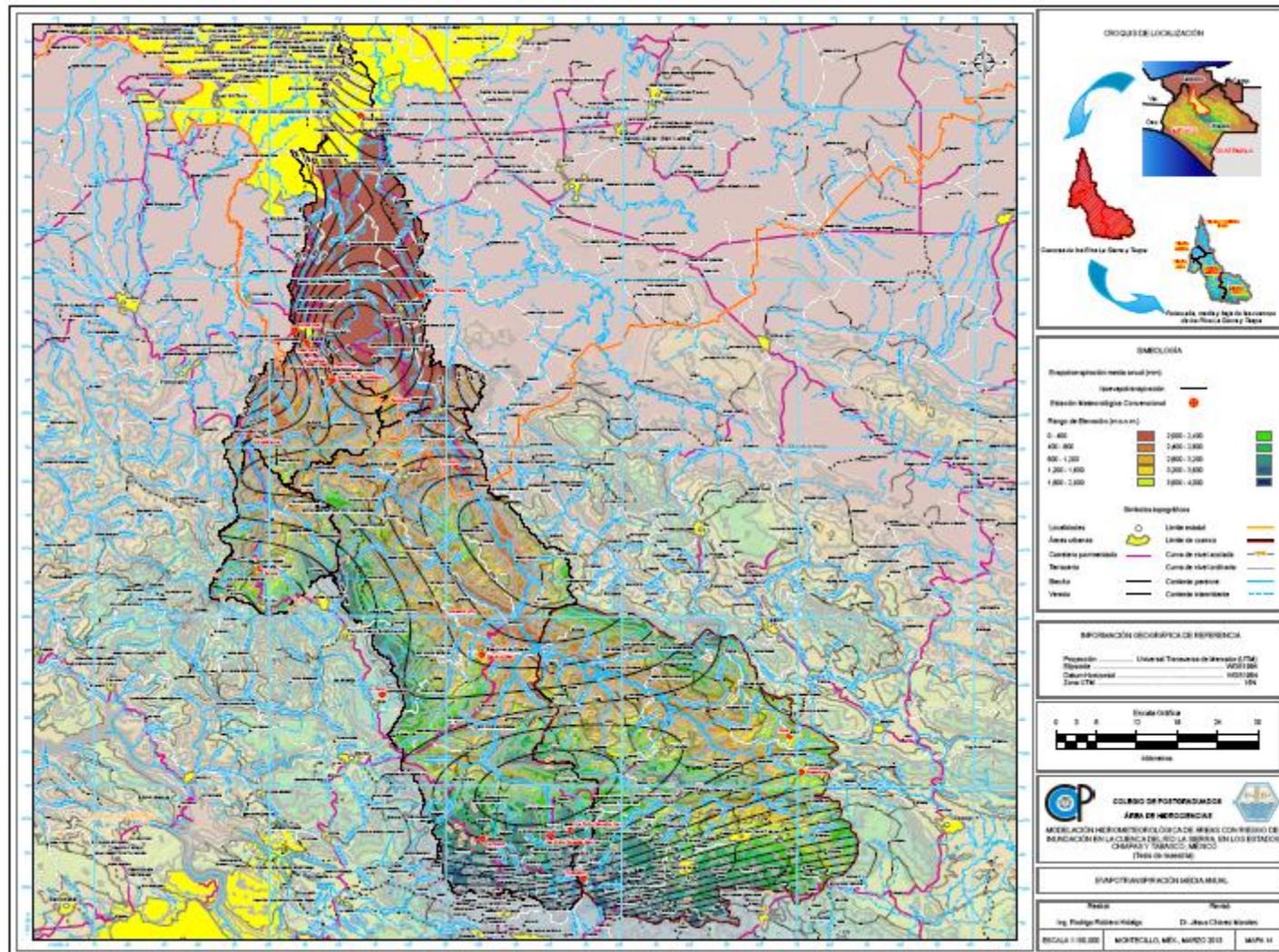
Mapa 10. Evaporación media anual



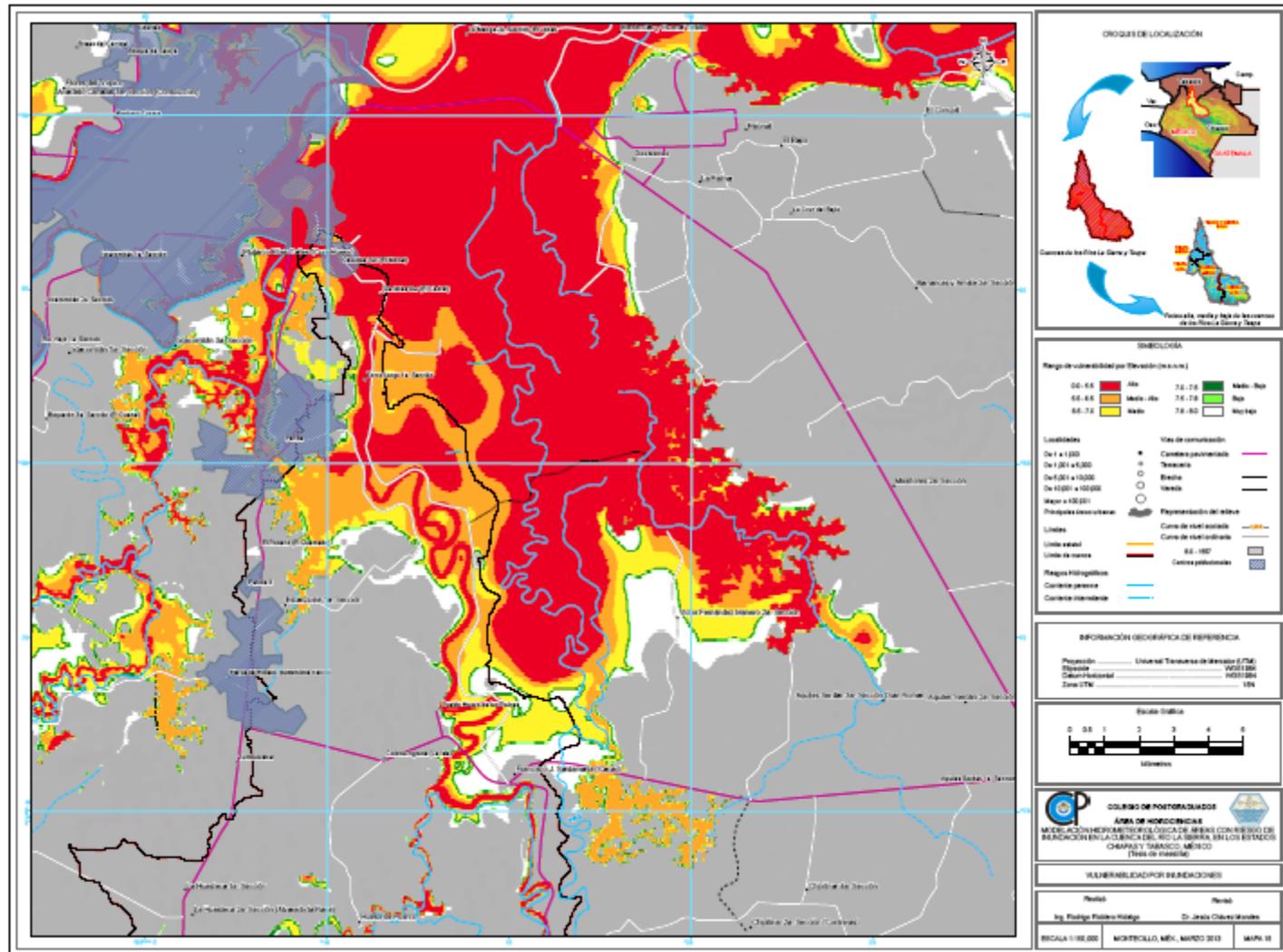
Mapa 11. Precipitación máxima en 24 horas



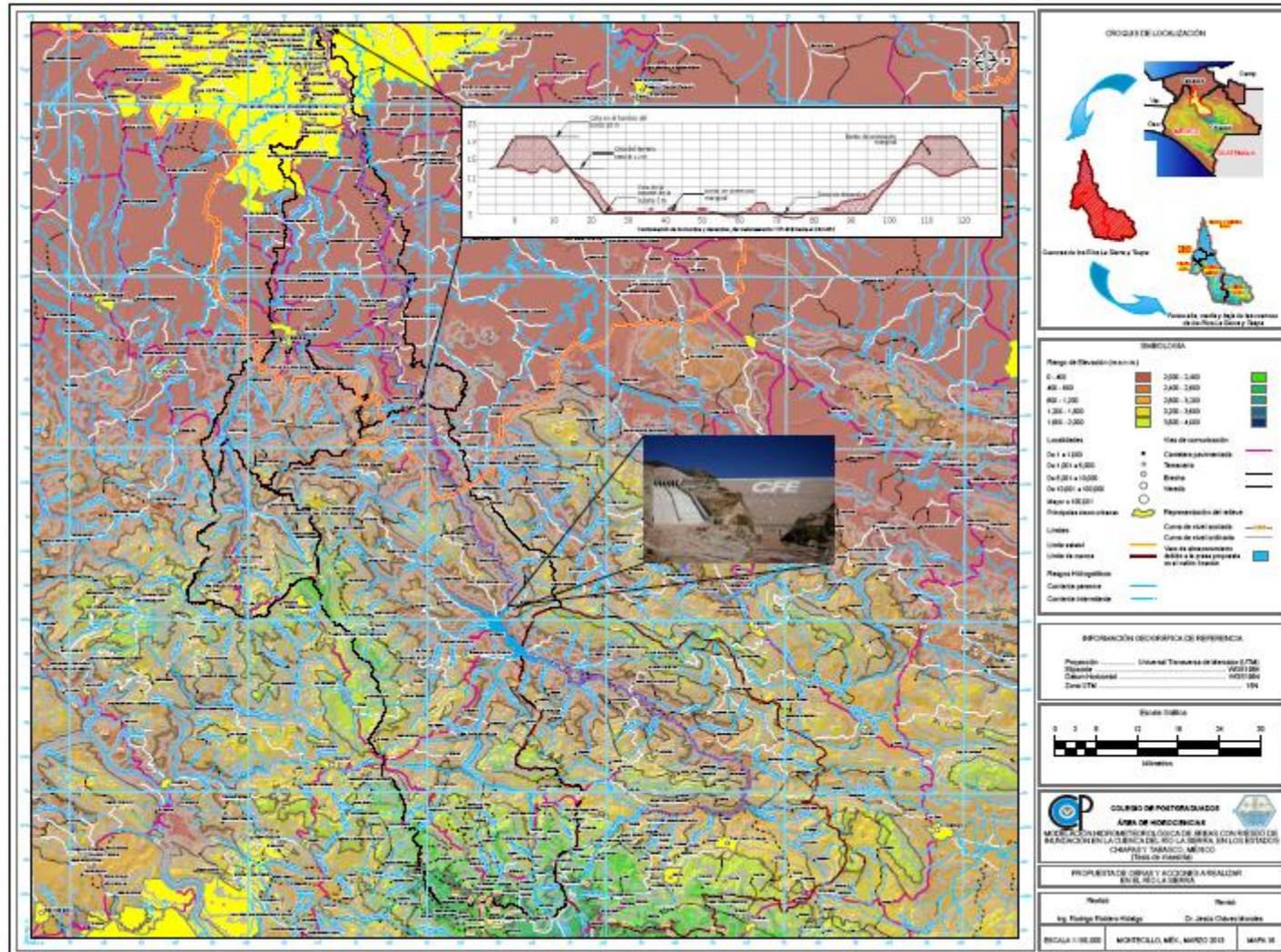
Mapa 13. Precipitación máxima anual



Mapa 14. Evapotranspiración media anual



Mapa 15. Vulnerabilidad por inundaciones



Mapa 16. Propuestas de obras y acciones a realizar en el río La Sierra