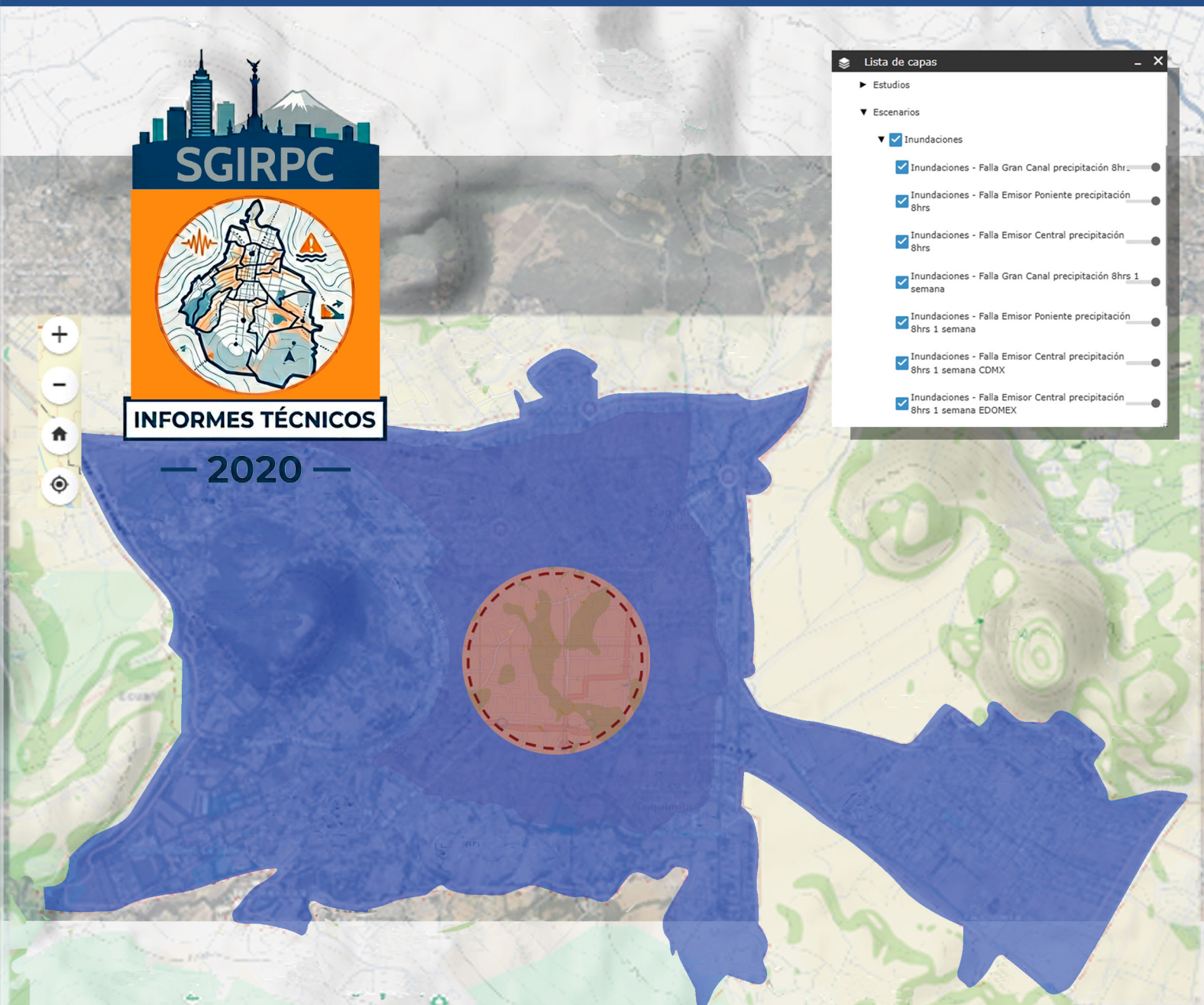


ESCENARIOS DE INUNDACIÓN EN SAN MIGUEL AJUSCO, ALCALDÍA TLALPAN, CIUDAD DE MÉXICO.



Subdirección de Fenómenos Naturales
y Antropogénicos Marzo, 2020.



**GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO**
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN



**SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL
DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL**



**GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO**
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN



**SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL
DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL**



SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Arq. Myriam Urzúa Venegas

Secretaria de Gestión Integral de Riesgos
y Protección Civil

Lic. Luz Elena Rivera Cano

Secretaria Particular de la Secretaría de Gestión
Integral de Riesgos y Protección Civil

Mtro. Jorge Antonio Ortiz Torres

Asesor de la Secretaria

Lic. Iccen Leticia Salas Pichardo

Directora Ejecutiva de Asuntos Jurídicos

Mtra. Gloria Luz Ortiz Espejel

Directora General de Vinculación y Capacitación

Mtro. Norlang Marcel García Arróliga

Director General de Resiliencia

Lic. Rafael Humberto Marín Cambranis

Director General de Análisis de Riesgos

Mtro. Pedro Martínez Cornejo

Director General de Táctico Operativa

Mtra. Erika Alejandra Barba Luna

Directora Ejecutiva de Administración y Finanzas

Lic. Jonathan Pascual Capote Romero

Director de Difusión de Prevención de Riesgos

ESTUDIO REALIZADO POR:

**ROMÁN VALVERDE DELGADO
MELISA SÁNCHEZ ÁLVAREZ**

**FENÓMENOS NATURALES Y
ANTROPOGÉNICOS
DIRECCIÓN GENERAL
DE ANÁLISIS DE RIESGOS**

AÑO 2020

Diseño: Camilo E. Esquivel Reed
Inscrito a la Dirección de Difusión
de Prevención de Riesgos



Imagen generada con IA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
2. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN	7
2.1 Recopilación de datos	7
3. ESTUDIO HIDROLÓGICO	7
3.1 Gastos de diseño	7
3.2 Características fisiográficas de la cuenca	8
3.3 Determinación de las características fisiográficas de la cuenca	9
3.4 Tiempo de concentración (T_c)	10
3.5 Cálculo del número de escurrimiento (N)	11
3.6 Determinación de la lluvia media de diseño	14
3.6.1 Visualizador de Escenarios de Lluvia	14
3.7 Cálculo de los Gastos o Caudales	18
3.7.1 Método de la fórmula racional	18
3.7.2 Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT)	18
3.7.3 Método de Ven Te Chow	19
3.8 Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma adimensional propuesto por el SCS	21
3.9 Hidrogramas	23
3.10 Transporte por áreas	24
4. ANÁLISIS HIDRÁULICO	26
4.1 Generación de escenarios de peligro	26
4.2 Preparación de archivos en ArcGIS	26
4.3 Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas)	26
4.3.1 Importación de datos	27
4.3.2 Llenado de la información	28
4.4 Condiciones de frontera	29
4.5 Ejecución del programa e interpretación de resultados	30
4.6 Verificación y exportación de resultados	30
5. IBER	32
5.1 Ecuaciones de Saint Venant 2D	32
5.2 Estructura del programa	35
5.3 Elementos de la simulación bidimensional	35
6. CONCLUSIONES	38
7. BIBLIOGRAFÍA	39

1. INTRODUCCIÓN

La principal actividad que se desarrolla en San Miguel Ajusco es Comercio minorista, en la que operan cerca de 1,000 establecimientos, con un personal ocupado estimado en 10,000 personas.

La colonia San Miguel Ajusco es uno de los pueblos originarios de la alcaldía Tlalpan, en Ciudad de México, y abarca un área cercana a 2,600 hectáreas.

Población: En San Miguel Ajusco habitan unas 16,300 personas en 3,960 hogares. Se registran 63 habitantes por km², con una edad promedio de 27 años y una escolaridad promedio de 9 años cursados.

Ubicación: La comunidad se localiza al sur de la Ciudad de México, 19.223232° de latitud norte y -99.202240° de longitud oeste.

Hidrografía: La corrientes que se encuentran en la localidad son intermitentes.

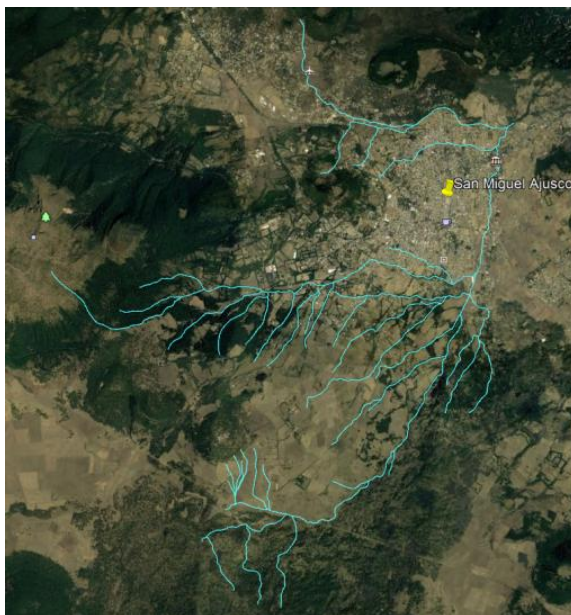


*Figura 01. Red de Drenaje.
(Elaboración propia, con base a MDE de INEGI, 2010)*

2. ESCENARIOS DE INUNDACIÓN

En esta sección se detallan las tareas para obtener los mapas de peligro por inundación, en los cuales se muestren zonas de inundación asociadas a diferentes periodos de retorno. Para lograr lo anterior, se deberá llevar a cabo el siguiente procedimiento:

2.1 Recopilación de datos.

La metodología para elaborar los mapas de inundación considera necesario cumplir con ciertos requerimientos tales como, utilizar el software especializado:

- ArcGIS 9.3 o mayor
- Modelos Digitales del Terreno (MDT) o el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versión 3.0, para mayor precisión un levantamiento topobatimétrico.
- Hec-Ras, IBER etc.

3. ESTUDIO HIDROLÓGICO

3.1 Gastos de diseño.

Para estimar los caudales de diseño en cualquier cuenca, se requiere la siguiente información:

- Mapas de isoyetas, elaborados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el CENAPRED, o bien,
- Curvas $h_p - d - T_r$, o
- Curvas $i - d - T_r$, e incluso
- Estudio hidrológico de la zona

La metodología descrita a continuación será para el cuarto caso, donde se presentan los gastos para los diferentes periodos de retorno.

3.2 Características fisiográficas de la cuenca.

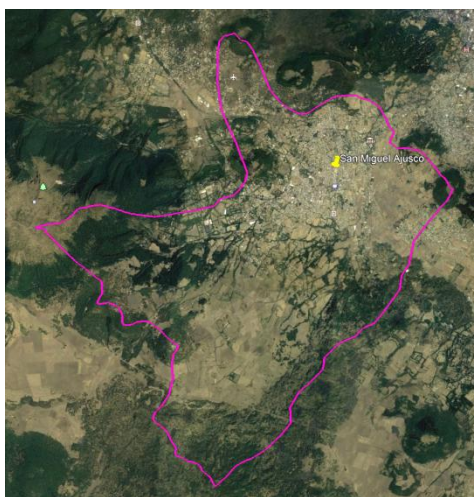


*Figura 02. Parteaguas de la cuenca.
(Elaboración propia, con base a MDE de INEGI, 2010)*

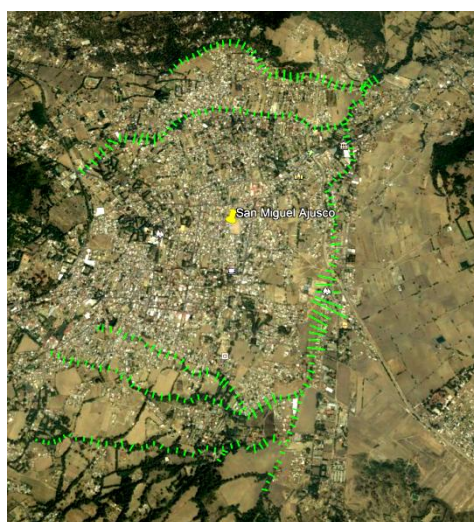


*Figura 03. Secciones para análisis unidimensional.
(Elaboración propia, con base a MDE de INEGI, 2010)*

Para el caso de México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) es quien proporciona los MDT. Los modelos más utilizados para el presente análisis corresponden a un vuelo LIDAR. Se podrá indicar que son de 2x2 metros.

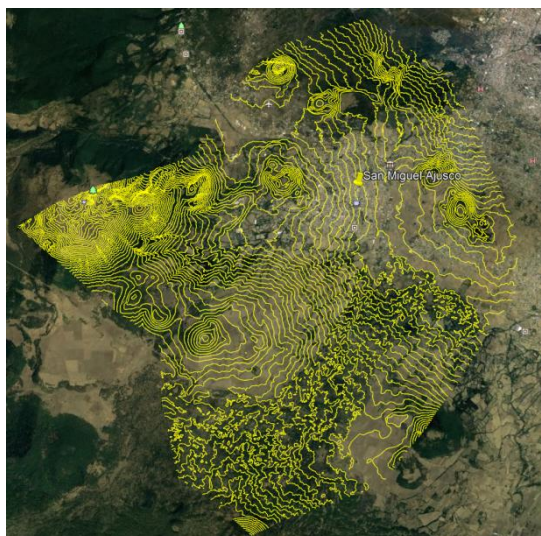


*Figura 04. Curvas de nivel a cada 20 metros.
(Elaboración propia, con base a MDE de INEGI, 2010)*

3.3 Determinación de las características fisiográficas de la cuenca.

Con apoyo en las cartas topográficas de INEGI, se determinó el área de la cuenca (A_c), la longitud de la corriente principal (L), desnivel topográfico (D), así como la pendiente media del cauce principal (S), obteniéndose:

$A_c =$	32.44	Km^2
$L =$	10.18	Km
$D =$	529.1	m
$S =$	0.051972	

3.4 Tiempo de concentración (Tc).

El tiempo de concentración de una cuenca se obtuvo con la fórmula de Kirpich (Aparicio, 2001):

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

- L longitud del cauce principal, (m)
- S pendiente del cauce principal, (adim)

Otra forma para obtener el tiempo de concentración fue el método de Rowe (Breña, 2010):

$$T_C = \left(\frac{0.87 L^3}{D} \right)^{0.385}$$

Dónde:

- L longitud del cauce principal, (Km)
- H diferencia de elevación entre los extremos del cauce principal, (m)

Tiempo de concentración hrs		
Kirpich	Rowe	SCS
1.23	1.24	1.22

Tabla 02. Tiempos de concentración para las diferentes cuencas.

Las duraciones más desfavorables serán aquellas adoptadas de la tormenta para el $T_c = 1.22$ hrs.

3.5 Cálculo del número de escurrimiento (N).

Mediante el empleo de la cartografía del tipo y uso de suelo del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), escala 1:50 000, según el criterio del USCS, se obtuvieron los siguientes valores ponderados de N, Tabla 02, correspondiente a las cuencas en estudio.

Tipo Edafológico	Clasificación	Uso de Suelo y Vegetación	N	A (km ²)	N*A
VSa/BP	C	BOSQUE DE PINO	54	3.456	186.641
BA	D	BOSQUE DE OYAMEL	61	0.267	16.307
BA	D	BOSQUE DE OYAMEL	61	1.41	86.033
BA	D	BOSQUE DE OYAMEL	61	0.196	11.926
VSa/BQ	C	BOSQUE DE ENCINO	54	0.061	3.296
VSa/BQ	C	BOSQUE DE ENCINO	54	0.332	17.933
VSa/BQ	C	BOSQUE DE ENCINO	54	0.332	17.933
BP	B	BOSQUE DE PINO	44	0.104	4.563
BQ	B	BOSQUE DE ENCINO	44	0.067	2.952
BQ	B	BOSQUE DE ENCINO	44	0.001	0.041
BQ	B	BOSQUE DE ENCINO	44	0.034	1.484
ZU	B	NO APLICABLE	84	1.1	92.401
BA	B	BOSQUE DE OYAMEL	44	0.109	4.81
BA	B	BOSQUE DE OYAMEL	44	0.605	26.626
BA	D	BOSQUE DE OYAMEL	61	0.011	0.65
BQP	C	BOSQUE DE ENCINO-PINO	54	0.123	6.647
BQP	C	BOSQUE DE ENCINO-PINO	54	0.123	6.647
PI	C	PASTIZAL INDUCIDO	70	0.006	0.451
VSa/BQ	C	BOSQUE DE ENCINO	54	0.251	13.528
VSa/BQ	C	BOSQUE DE ENCINO	54	0.256	13.8
BP	C	BOSQUE DE PINO	54	0.675	36.445
BPQ	C	BOSQUE DE PINO-ENCINO	54	1.294	69.864
BP	C	BOSQUE DE PINO	54	0.675	36.445
PI	C	PASTIZAL INDUCIDO	70	1.1	77.007
BP	C	BOSQUE DE PINO	54	0.675	36.445
BP	C	BOSQUE DE PINO	54	0.059	3.21
BP	C	BOSQUE DE PINO	54	0.059	3.21
IAPF	D	RESIDENCIAL URBANO	90	0.011	0.958
IAPF	D	RESIDENCIAL URBANO	90	1.401	126.103
IAPF	D	RESIDENCIAL URBANO	90	0.713	64.179
IAPF	D	RESIDENCIAL URBANO	90	6.969	627.219
IAPF	D	RESIDENCIAL URBANO	90	1.696	152.669
IAPF	D	RESIDENCIAL URBANO	90	6.264	563.769

Tabla 02. Número de escurrimiento.

Uso de tierra	Condición de la cobertura vegetal de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Bosques cultivados	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso, alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo, muy baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso, alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso, muy alta transpiración	15	44	54	61
Descanso, sin cultivo.	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surco en curva de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surco en curva de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas sembradas con maquinaria o al voleo	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surco en curva de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curva de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curva de nivel, normal	25	59	75	83
	Curva de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero permanente	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100
Urbano			84	90	92

Tabla 03. Tipo de suelo.

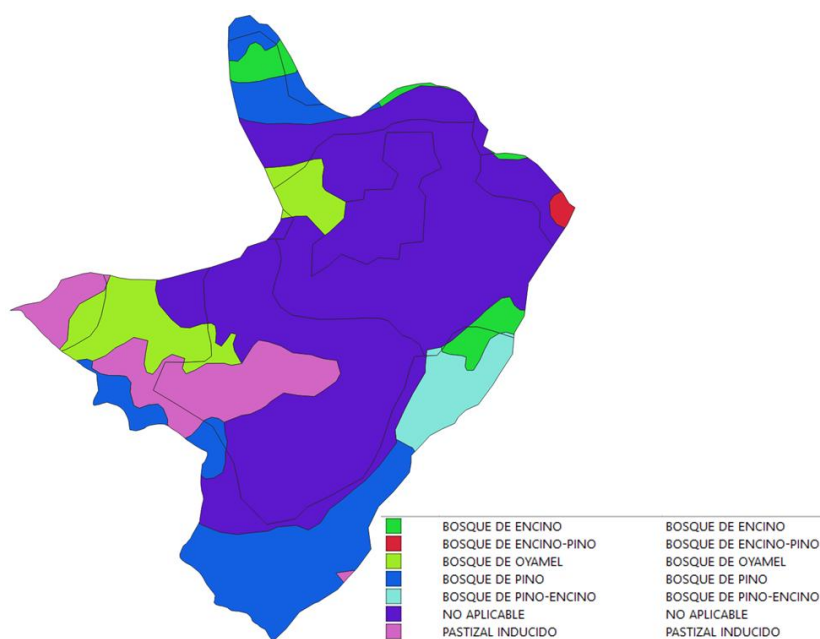


Figura 05. Tipo de vegetación.
(Elaboración propia, con base a datos del INEGI, 2010)

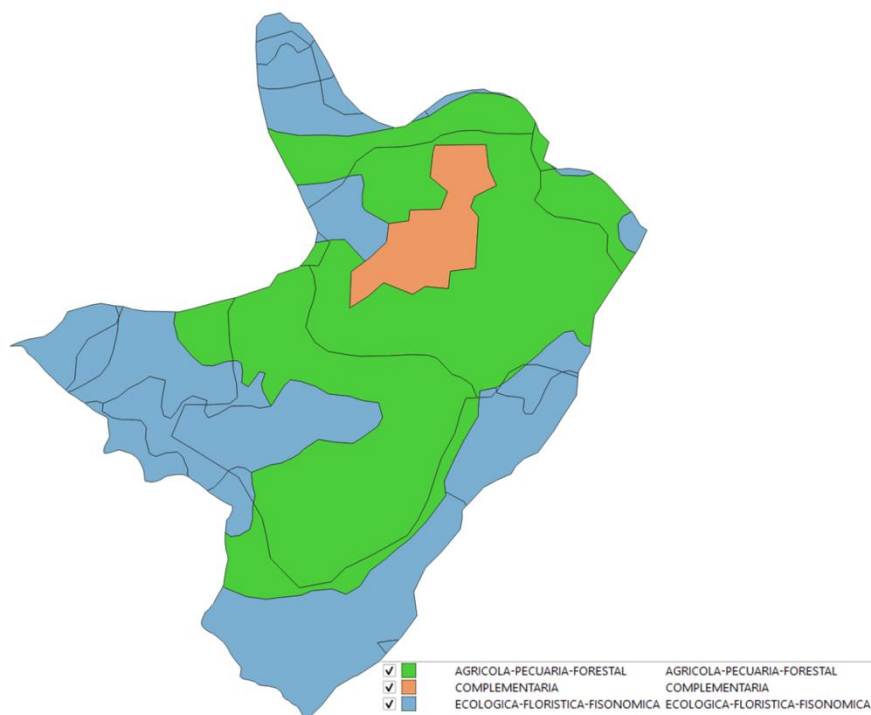


Figura 06. Tipo de información.
(Elaboración propia, con base a datos del INEGI, 2010)

3.6 Determinación de la lluvia media de diseño.

3.6.1 Visualizador de Escenarios de Lluvia.

VELL (Visualizador de Escenarios de Lluvia) Versión 1.0, es un desarrollo informático que presenta los resultados de análisis de precipitaciones para diferentes duraciones y periodos de retorno, que funciona a través de la elección de la combinación entre los Organismos de Cuenca y las duraciones en un punto geográfico, que arrojará los resultados de las precipitaciones para los diferentes periodos de retorno, dirigido a personal técnico que requiera los datos de precipitación asociados a las diferentes duraciones.

La Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), a través del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), interesada en la buena calidad de los estudios hidrológicos para elaborar mapas de peligro y riesgo por inundaciones, consideró pertinente elaborar mapas de isoyetas de altura de precipitación, con diferentes duraciones asociados con distintos periodos de retorno, que proporcionan información importante para los Atlas de peligro o riesgo estatales y municipales, así como para el estudio de diferentes tipos de obras, que caen en el ámbito de otras dependencias del gobierno federal, organismos descentralizados y privados.

La finalidad de este trabajo es doble:

- Complementar y validar la información pluviográfica disponible en el país, subsanando la carencia de la misma, en algunas zonas y,
- Ofrecer información básica para la elaboración de mapas de peligro y riesgo por inundación, asegurando el uso de criterios homogéneos durante la realización del análisis de frecuencias en cualquier cuenca del país.

En este software, la información climatológica se obtuvo de la base de datos CLICOM, del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que cuenta con alrededor de 5,338 estaciones en todo el país; sin embargo, las empleadas en este trabajo corresponden a 2,243 estaciones pluviométricas instaladas en diferentes puntos del país. El número de estaciones utilizadas fue definido, básicamente, revisando que el registro histórico de cada estación contara con al menos 20 años de información válida, hasta diciembre de 2010.

Los periodos de retorno que se presentan son: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años; El valor de la altura de precipitación máxima asociada con cada isoyeta está expresado en milímetros.

El análisis estadístico y probabilístico de la información se efectuó utilizando las distribuciones siguientes: Normal, Exponencial, Lognormal de 2 y 3 parámetros, Gama de 2 y 3 parámetros Gumbel y Doble Gumbel, en tanto que para determinar la bondad de cada una de las distribuciones de probabilidad a la serie de datos históricos, se usó el mínimo error estándar y extrapolar la precipitación para distintos periodos de retorno.

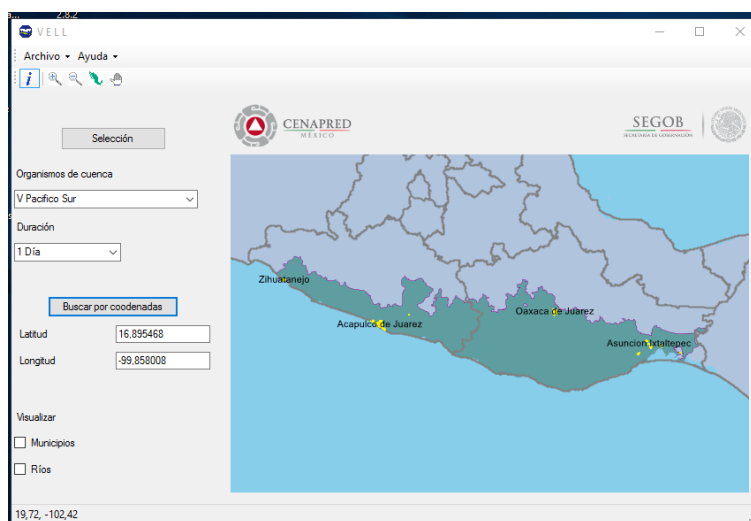


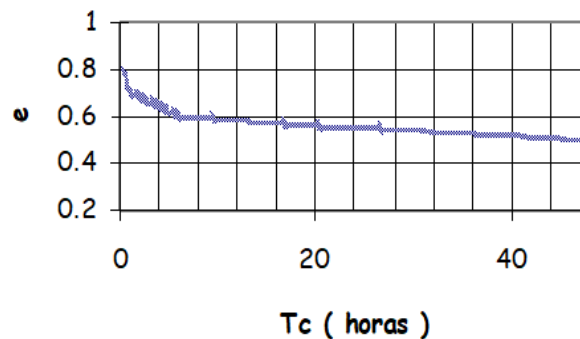
Figura 07. Visualizador de escenarios de lluvia (VELL).

Tr (Años)	H _p max 24 (mm)
2	58.8
5	77.7
10	91.0
20	103.7
50	121.6
100	135.8
500	169.7
1000	185.9

Tabla 04. Resultados del VELL.

Una vez calculado el tiempo de concentración, con objeto de obtener la lluvia efectiva, se determina el valor del coeficiente de Kuishling (e), el cual depende del periodo de tiempo (tc); tales como:

Figura 08. Coeficiente de Kuishling (e)



Por lo cual: $e = 0.70$

Con las expresiones:

$$Hp_d = \frac{KTc^{1-e}}{1-e} \quad K = \frac{h\bar{p} (1-e)}{24^{1-e}}$$

Se calcula Hpd de diseño:

<i>Tr (años)</i>	<i>K</i>	<i>Hpd media de diseño (mm)</i>
2	6.80	23.72
5	8.99	31.35
10	10.53	36.71
20	12.00	41.84
50	14.07	49.06
100	15.71	54.79
500	19.63	68.46
1,000	21.51	75.00

Tabla 05. Lluvia efectiva de diseño.

Para obtener la lluvia en exceso, el coeficiente de escurrimiento e intensidad; se emplean las siguientes expresiones

$$He = \frac{\left(Hp - \frac{508}{N} + 5.08 \right)^2}{\left(Hp + \frac{2032}{N} - 20.32 \right)} \quad C = \frac{He}{Hp_d}$$

$$I = \frac{K}{(1 - e)Tc^e} \quad \text{Así,}$$

Con las expresiones anteriores se llena la tabla 1.6

Tr (años)	He (mm)	C	I (mm / hr)
2	0.67	0.03	19.52
5	2.44	0.08	25.79
10	4.22	0.11	30.20
20	6.26	0.15	34.42
50	9.60	0.20	40.36
100	12.59	0.23	45.07
500	20.68	0.30	56.33
1,000	24.93	0.33	61.70

*Tabla 06. Extrapolación de la lluvia en exceso,
coeficiente de escurrimiento e intensidad.*

3.7 Cálculo de los Gastos o Caudales.

3.7.1 Método de la fórmula racional.

$$Q_d = 0.278 C i A$$

Dónde:

Q_d Gasto de diseño

C coeficiente de escurrimiento. Representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa. Varía entre 0 y 1

i intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, mm/h

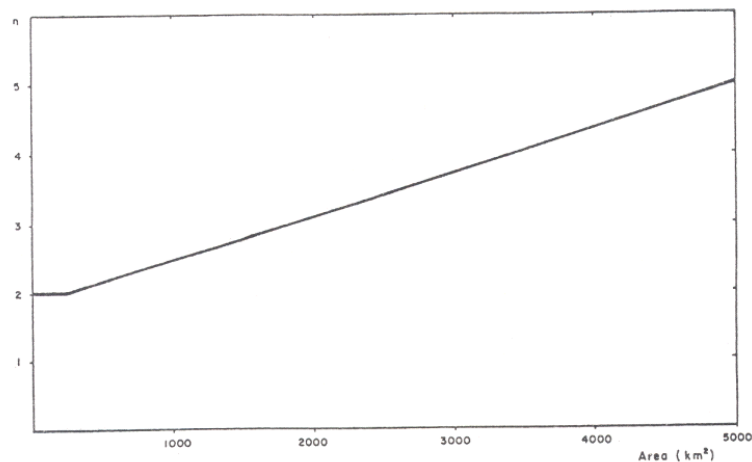
A área de la cuenca, km^2

3.7.2 Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT).

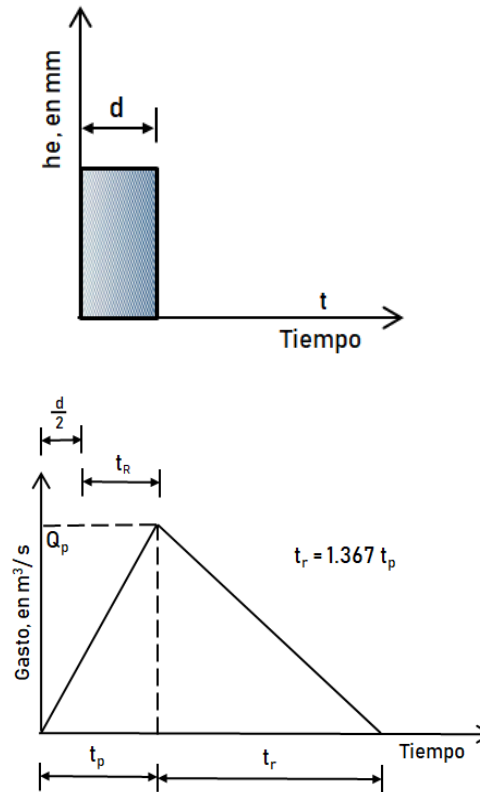
$$Q_d = \frac{0.556 H_e A}{n T_p}$$

Dónde:

$$T_p = 0.60 T_c + \frac{\Delta t}{2} = 1.34 \text{ horas}$$



Área = 32 km^2 por lo tanto, $n = 2.000$



3.7.3 Método de Ven Te Chow.

$$Qd = AXYZ$$

Dónde:

$X = He/D$ Factor de escurrimiento.

$Y = 0.278$ Factor climático.

$Z = Qp/Qe$ Factor de reducción.

$$Tr = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64} = 1.09 \text{ horas}$$

La siguiente gráfica muestra la relación entre Z y T_c/T_r .

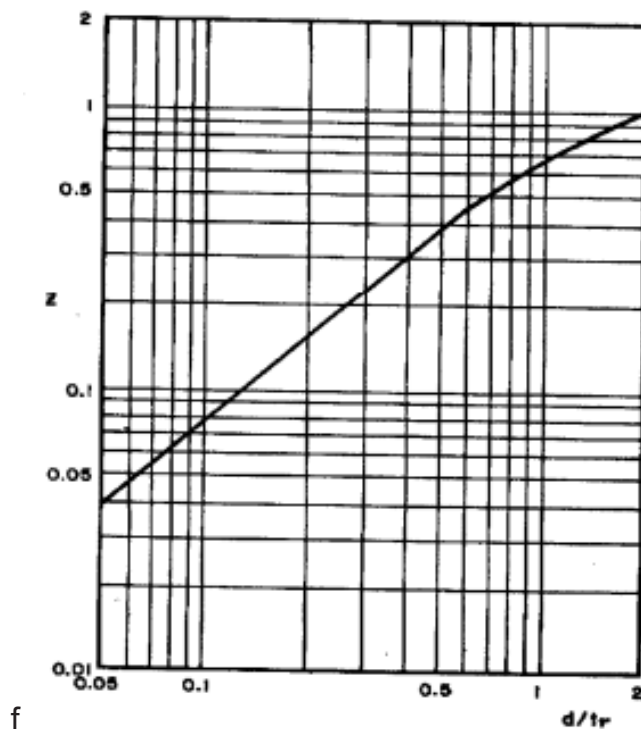


Figura 08. Relación entre Z y T_c/T_r .

Los gastos máximos inferidos mediante modelos de lluvia-escorrentía, con los métodos descritos anteriormente, para diferentes períodos de retorno, son:

Tr años	GASTOS MAXIMOS (m^3/s)		
	RACIONAL	H U T	VEN TE CHOW
2	5	4	4
5	18	16	13
10	31	28	23
20	46	42	34
50	71	65	52
100	93	85	68
500	153	139	111
1000	185	168	134

Tabla 07. Gastos máximos para diferentes periodos de retorno.

3.8 Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma adimensional propuesto por el SCS.

Los hidrogramas para diferentes periodos de retorno se calculan después de estimar el gasto máximo para los periodos de retorno, es necesario definir la forma del hidrograma de escurrimiento directo, para ello existen diferentes modelos que pueden ser usados, entre ellos:

- Hidrograma unitario adimensional
- Hidrograma unitario geomorfológico
- Hidrograma unitario triangular
- Método de Chow

La opción propuesta en esta metodología es usar el Hidrograma Unitario Adimensional del SCS (HUA, Tabla).

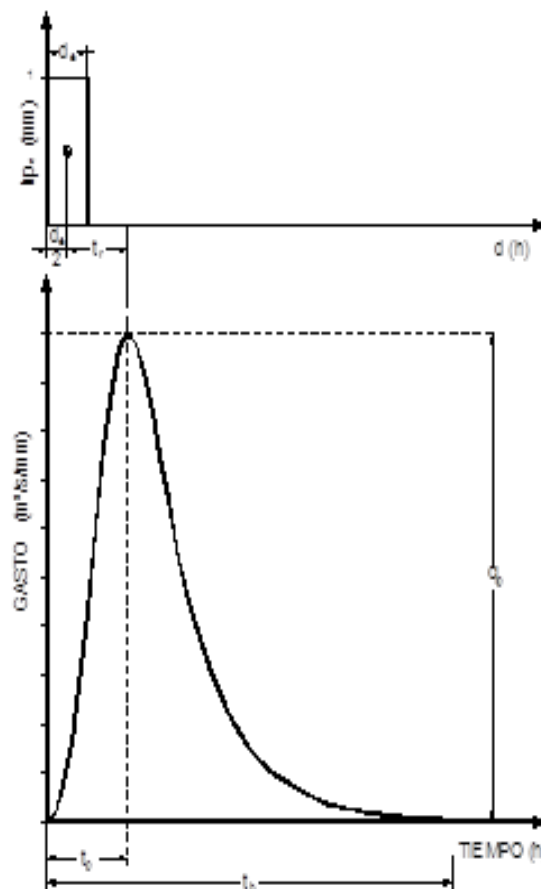


Figura 09. Características del HUA.

T/Tp	Q/Qp
0.00	0.00
0.10	0.03
0.30	0.19
0.40	0.31
0.60	0.66
0.70	0.82
0.80	0.93
0.90	0.99
1.00	1.00
1.10	0.99
1.20	0.93
1.30	0.86
1.50	0.68
1.70	0.46
1.90	0.33
2.20	0.21
2.60	0.11
3.20	0.04
5.00	0.00

Tabla 08. Coordenadas del HUA.

Las características del HUA se obtienen a partir de las siguientes expresiones (Aparicio, 1987):

Tiempo de retraso:

$$t_r = 0.6 t_c \quad (1.14)$$

Tiempo de pico:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (1.15)$$

Tiempo base:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (1.16)$$

Gasto de pico:

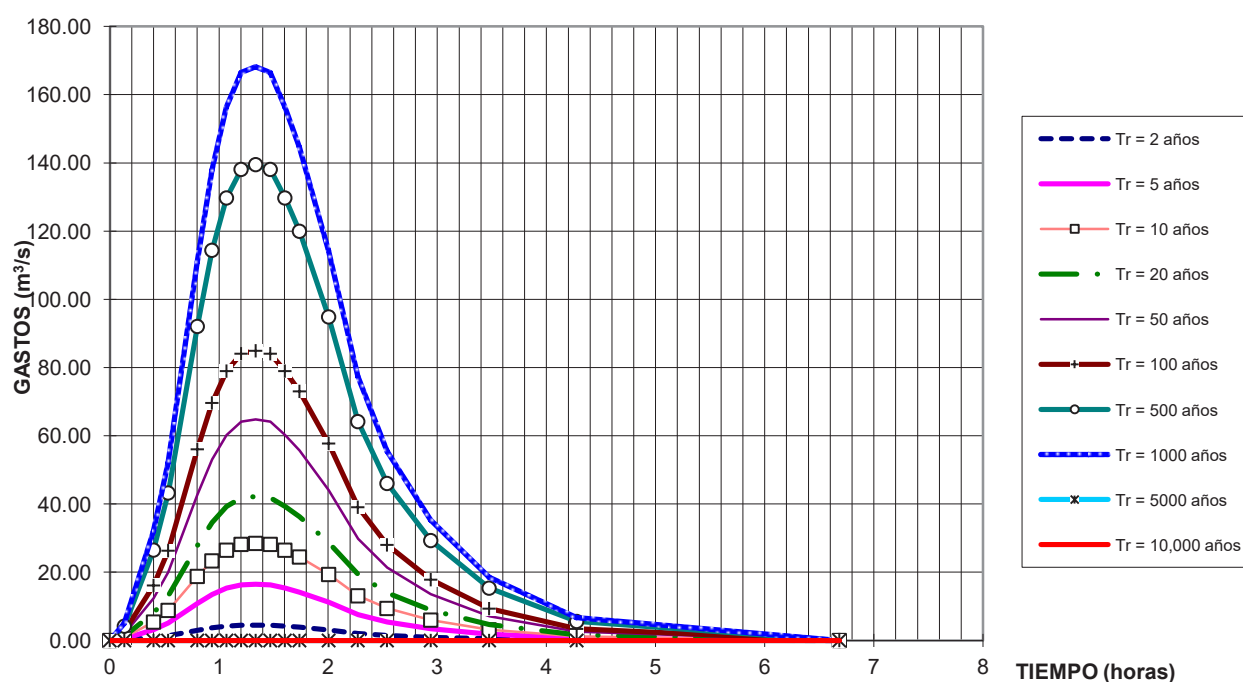
$$q_p = \frac{0.208 A_c}{t_p} \quad (1.17)$$

3.9 Hidrogramas.

Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma adimensional propuesto por el SCS.

T i e m p o	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años	500 años	1000 años
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.13	0.13	0.49	0.85	1.27	1.94	2.55	4.18	5.05
0.4	0.85	3.13	5.41	8.02	12.31	16.14	26.5	31.96
0.53	1.39	5.1	8.82	13.08	20.08	26.33	43.24	52.14
0.8	2.96	10.87	18.79	27.86	42.75	56.05	92.07	111
0.94	3.68	13.5	23.34	34.61	53.11	69.64	114.39	137.91
1.07	4.18	15.31	26.47	39.25	60.24	78.98	129.73	156.42
1.2	4.44	16.3	28.18	41.78	64.12	84.08	138.1	166.51
1.34	4.49	16.47	28.46	42.21	64.77	84.93	139.5	168.19
1.47	4.44	16.3	28.18	41.78	64.12	84.08	138.1	166.51
1.6	4.18	15.31	26.47	39.25	60.24	78.98	129.73	156.42
1.74	3.86	14.16	24.48	36.3	55.7	73.04	119.97	144.64
2.01	3.05	11.2	19.36	28.7	44.04	57.75	94.86	114.37
2.27	2.07	7.57	13.09	19.41	29.79	39.07	64.17	77.37
2.54	1.48	5.43	9.39	13.93	21.37	28.03	46.03	55.5
2.94	0.94	3.46	5.98	8.86	13.6	17.83	29.29	35.32
3.48	0.49	1.81	3.13	4.64	7.12	9.34	15.34	18.5
4.28	0.18	0.66	1.14	1.69	2.59	3.4	5.58	6.73
6.69	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasto máximo	4.49	16.47	28.46	42.21	64.77	84.93	139.5	168.19

Tabla 9 Hidrogramas



Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS.

3.10 Transporte por áreas.

Ahora se procede a realizar el cálculo para cada subcuenca.

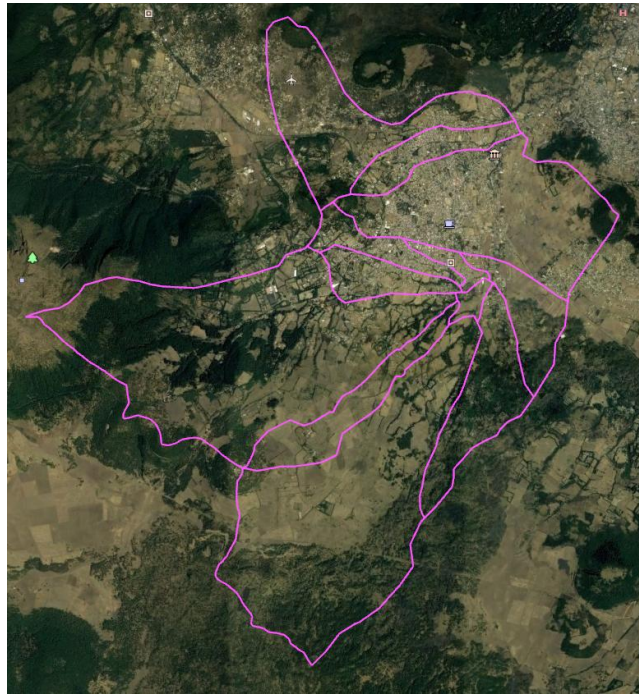


Figura 10. Subcuencas
(Elaboración propia, con base a MDT de INEGI, 2010)

“Cálculo de gastos en subcuencas mediante transporte por áreas”

Para obtener los gastos de salida asociados a subcuencas aguas arriba y abajo del sitio donde el caudal es conocido; se debe realizar la ponderación de áreas mediante las siguientes ecuaciones:

$$(1) \quad C_i = \left(\frac{A_i}{A_c} \right)^{5/6} \quad (2) \quad Q_i = C_i * Q_s$$

C_i = coeficiente por áreas de aportación

A_i = área de aportación de la subcuenca i (m^2 ó km^2)

A_c = área donde es conocido el caudal (m^2 ó km^2)

Q_s = gasto en el sitio base por transportar ($\frac{m^3}{s}$)

Q_i = gasto correspondiente a la subcuenca i ($\frac{m^3}{s}$)

Subcuenca	Área km ²
1	32.44
2	3.32
3	29.10
4	0.88
5	28.13
6	1.85
7	20.20
8	0.73
9	0.86
10	10.41
11	9.76
13	8.89
14	1.40

Tabla 10. Área de cada subcuenca

Finalmente.

Tr SubCuenca	Q m ³ /s					
	2	5	10	20	50	100
1	4.49	16.47	28.46	42.21	64.77	84.93
2	0.67	0.65	1.09	2.51	7.67	25.52
3	4.10	2.94	3.85	7.14	18.35	52.81
4	0.22	0.26	0.51	1.32	4.51	16.39
5	3.99	2.87	3.77	7.02	18.10	52.22
6	0.41	0.43	0.78	1.89	6.06	20.98
7	3.03	2.28	3.11	5.99	15.84	46.74
8	0.19	0.23	0.46	1.21	4.17	15.36
9	0.22	0.25	0.50	1.31	4.46	16.24
10	1.74	1.44	2.12	4.35	12.14	37.43
11	1.65	1.38	2.04	4.21	11.82	36.62
13	1.53	1.29	1.94	4.03	11.39	35.50
14	0.33	0.36	0.66	1.65	5.42	19.12

Tabla 11. Resultados de los gastos por cada subcuenca.

Con los resultados de la tabla anterior se realiza el análisis hidráulico.

4. ANÁLISIS HIDRÁULICO

4.1 Generación de escenarios de peligro.

Para conocer los cambios que ocurren sobre una corriente o una planicie de inundación (profundidad de agua, velocidad de la corriente, zona inundada, etc.) durante el paso de una crecida, se debe llevar a cabo el tránsito de la avenida.

El programa empleado para esta sección ha sido seleccionado debido a su fácil acceso y, aunque es software libre cuenta con un buen soporte técnico. El modelo hidráulico utilizado es HecRas, el cual fue construido por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002).

4.2 Preparación de archivos en ArcGIS.

Crear las capas que se usarán para guardar la información exportada.

La información mínima necesaria para usar HecRAS requiere que desde ArcGIS se exporten los siguientes archivos:

- La trayectoria del río (StreamSenterline).
- Los hombros del cauce (Bank Lines).
- La ubicación y geometría de las secciones transversales (XS CutLines).

4.3 Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas).

La simulación del paso de las avenidas a lo largo del río, también conocido como tránsito de avenidas, y la exportación de los resultados hacia ArcGis, se lleva a cabo en las siguientes etapas:

- Importación de los datos geométricos en *HecRAS*
- Completado de la información geométrica
- Información de los caudales que serán simulados
- Condiciones de frontera en el río o tramo que será simulado
- Ejecución del programa e interpretación de resultados
- Verificación y exportación de los resultados hacia *ArcGIS*

4.3.1 Importación de datos.

En esta etapa se lee el archivo que contiene la información geométrica del proyecto generado en ArcGis y que será simulado en HecRAS.

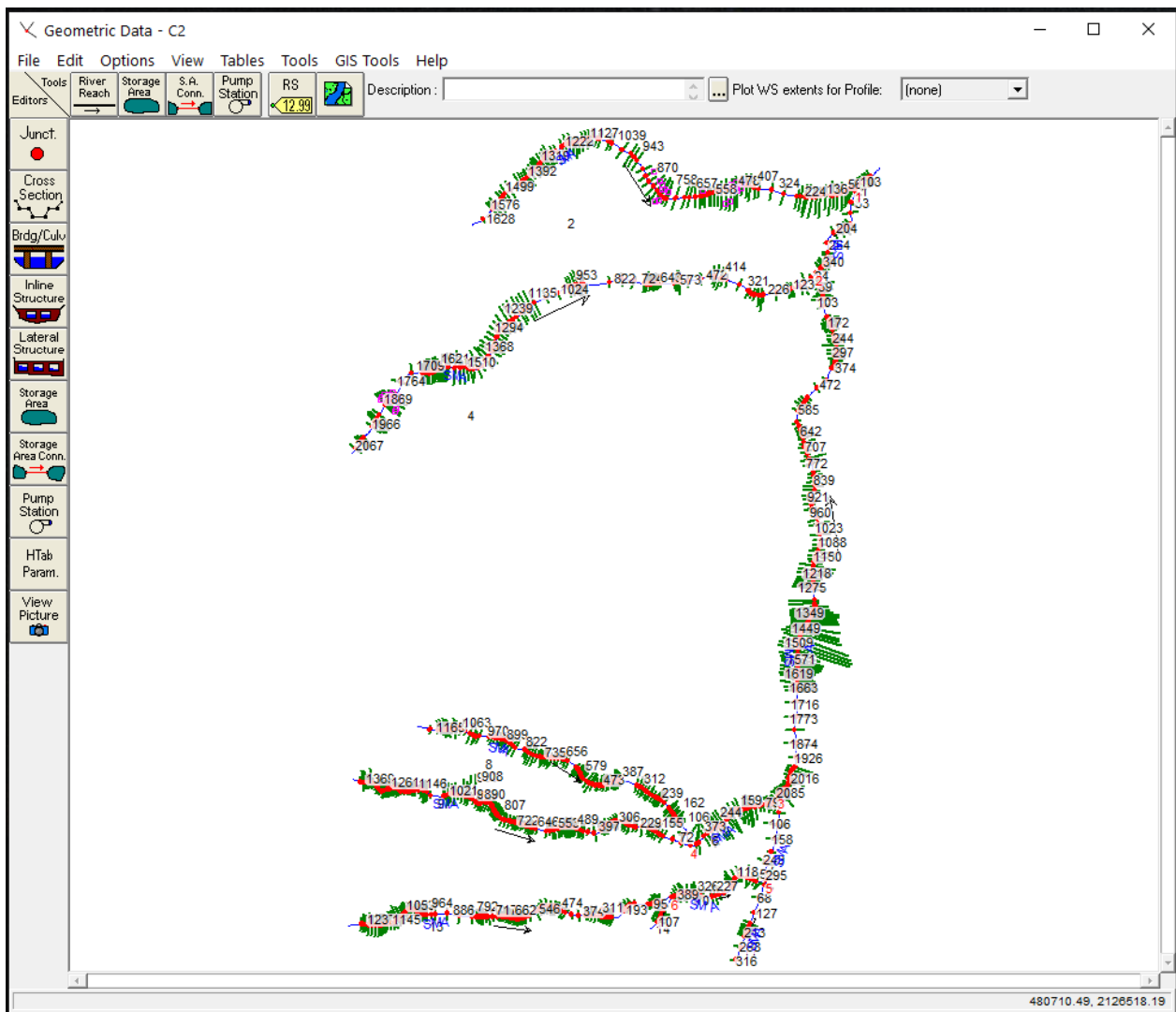


Figura 11. Geometría del cauce por simular

4.3.2 Llenado de la información.

El siguiente paso consiste en completar la información requerida por HecRAS para realizar la simulación; se define el coeficiente de rugosidad "n" de Manning en cada sección, este valor puede variar y ser diferente para cada margen, para el centro del cauce o en cada sección, de acuerdo con los requerimientos del modelo.

Previamente, se realizó el cálculo de los gastos asociados con diferentes periodos de retorno (*tabla 1.7 Gastos de Diseño*).

Dependiendo del tipo de simulación que se pretenda realizar, la información de los caudales puede darse de dos maneras:

- Como un gasto constante (simulación en flujo permanente)
- Como un hidrograma (simulación en flujo no permanente)

Para este ejemplo sólo se mostrará el primer caso, mientras que para el segundo, se deberá consultar el manual de usuario de *HecRAS* (USACE, 2002).

En el menú *SteadyFlow Data* se define la información referente a caudales. El número de perfiles que se simularán, corresponden a los gastos que se ingresarán de los diferentes periodos de retorno.

Steady Flow Data - C2

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (25000 max): Reach Boundary Conditions ... Apply Data

Locations of Flow Data Changes

River: SMA Add Multiple...

Reach: 14 River Sta.: 107 Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates							
River	Reach	RS	Tr=2	Tr=5	Tr=10	Tr=20	Tr=50	Tr=100	Tr=500	Tr=1000
1 SMA	14	107	0.3272998	0.3573596	0.6647215	1.653195	5.420808	19.12123	89.7947	392.8813
2 SMA	13	1237	1.526288	1.289281	1.936459	4.029934	11.39048	35.50157	150.3813	603.7827
3 SMA	10	389	1.741348	1.438982	2.122094	4.349388	12.1381	37.433	157.1689	626.4088
4 SMA	9	1369	0.2180748	0.2547741	0.5013964	1.306999	4.456803	16.24234	78.3781	350.7907
5 SMA	11	316	1.649304	1.375312	2.043554	4.214825	11.82434	36.62489	154.3362	616.9866
6 SMA	8	1165	0.1899137	0.2270462	0.4554916	1.206493	4.169313	15.36442	74.83148	337.5121
7 SMA	7	295	3.025596	2.280306	3.114436	5.987891	15.84366	46.73855	189.1111	730.8304
8 SMA	6	373	0.412192	0.4330789	0.7801731	1.889224	6.058478	20.97806	97.00453	418.9985
9 SMA	2	1628	0.6715536	0.6504559	1.094965	2.505866	7.66641	25.52441	114.231	480.1451
10 SMA	5	2085	3.986861	2.869744	3.77214	7.024481	18.09836	52.21897	207.4171	789.3256
11 SMA	4	2067	0.2230417	0.2596007	0.5092996	1.324145	4.505471	16.39001	78.97147	353.0024
12 SMA	3	356	4.100789	2.937922	3.846673	7.139956	18.34595	52.8136	209.3835	795.5567
13 SMA	1	103	4.489296	16.46503	28.46407	42.20555	64.76978	84.92603	139.4974	168.189

Edit Steady flow data for the profiles (m3/s)

Figura 12. Número de perfiles que serán simulados

4.4 Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera deben establecerse en todos los extremos de la red de drenaje.

En el menú **SteadyFlow Data**, se da clic en el botón **ReachBoundaryConditions** y aparece la ventana de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.8.0.** En la tabla **electBoundaryCondition, Locations and Types**, por cada tramo de río habrá un renglón.

Figura 13. Pantalla para definir las condiciones de frontera de sus extremos (Fig. 15 Condiciones de frontera).

Un río puede tener varios tributarios y en cada uno de ellos se puede definir la condición de frontera de sus extremos (Fig. 15 Condiciones de frontera).

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
SMA	14	all	Critical Depth	Junction=6
SMA	13	all	Critical Depth	Junction=6
SMA	10	all	Junction=6	Junction=5
SMA	9	all	Critical Depth	Junction=4
SMA	11	all	Critical Depth	Junction=5
SMA	8	all	Critical Depth	Junction=4
SMA	7	all	Junction=5	Junction=3

Figura 14. Muestra de la selección de las condiciones de frontera para diferentes arreglos

4.5 Ejecución del programa e interpretación de resultados.

Hasta este momento se ha completado el llenado de datos para ejecutar el programa *HecRAS*. Ahora para ejecutarlo, se elige el ícono de la simulación seleccionada:

- Flujo permanente (*Perform a steady flow simulation*) 
- Flujo no permanente (*Perform an unsteady flow simulation*) 

Para este trabajo se explica el flujo permanente.

4.6 Verificación y exportación de resultados.

Después de simular el paso de las avenidas y para verificar los resultados obtenidos, es posible usar las herramientas gráficas y tablas disponibles en *HecRAS*.

Antes de exportar el nivel que alcanza el agua con cada gasto, se debe revisar el polígono que delimita el área de inundación.

La información del mencionado polígono, para cada perfil, puede ser revisada con el editor de datos geométricos (Geometric Data Editor). Seleccionando el menú **Tools | Plot GIS ReachProfileBounds** es factible indicar el gasto y el tramo de río para los cuales se desean graficar los resultados. Para este caso se tienen varios tramos F0.

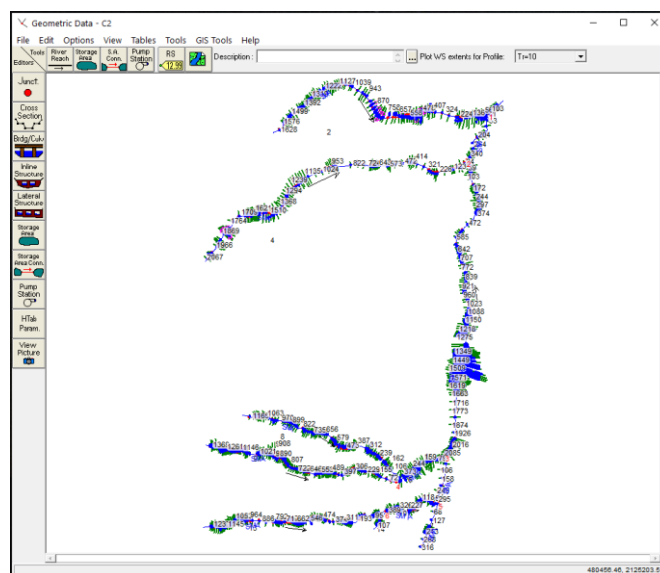


Figura 15. Resultado gráfico de la simulación.

Finalmente, los resultados de la simulación deben ser exportados para procesarlos en *ArcGIS*, a través de la extensión *HecGeoRAS*.

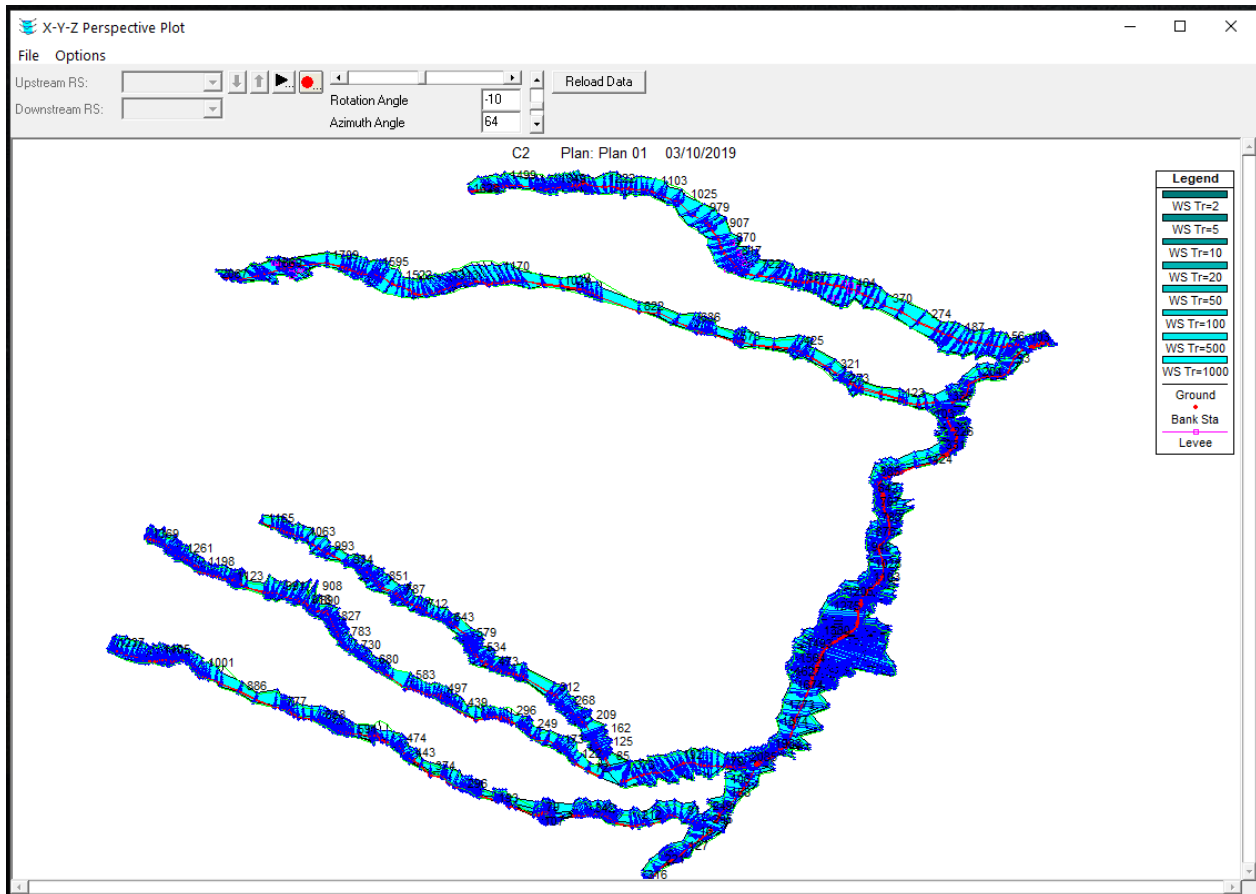


Figura 16. Resultado gráfico de la simulación *Hec_Ras*.

5. IBER.

Iber surgió del interés mostrado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en disponer de un modelo bidimensional de simulación del flujo, este se desarrolló a partir de la integración y evolución de tres herramientas numéricas preexistentes: Turbillón, CARPA y GiD, se presentó en el año 2010, España. Con las siguientes características.

- Es una herramienta de modelización bidimensional del flujo en la lámina libre en ríos, estuarios, canales, llanuras de inundación, obras hidráulicas etc.
- Es bidimensional. Esto significa que los resultados básicos son la cota del agua y la velocidad del agua en las dos direcciones horizontales del espacio (x,y).
- La definición de la geometría en 3 dimensiones mediante archivos del Modelo Digital del Terreno, debido a lo cual los resultados dependen menos de la discretización utilizada.

5.1 Ecuaciones de Saint Venant 2D.

Para resolver la hidrodinámica, Iber resuelve unas ecuaciones que se deducen de dos leyes físicas de conservación elementales: Conservación de la masa y Conservación de la cantidad de movimiento (segunda ley de Newton aplicada a un fluido).

Estas leyes físicas se traducen en unas expresiones matemáticas que son las ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Saint Venant 2D se obtienen a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, realizando dos pasos:

Paso 1: Un promedio temporal para filtrar las fluctuaciones turbulentas, con lo cual se obtienen las ecuaciones de Reynolds.

Paso 2: Un promedio en la profundidad para pasar de las ecuaciones tridimensionales a las ecuaciones bidimensionales.

Las ecuaciones de Reynolds se obtienen al descomponer la velocidad instantánea u en la suma de la velocidad media u_m y unas fluctuaciones turbulentas u' :

$$u = u_m + u'$$

De manera que la velocidad media se puede entender como el promedio temporal de la velocidad instantánea en un cierto intervalo de tiempo.

$$u_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u \, dt$$

Las ecuaciones que se obtienen después de este proceso se conocen como *ecuaciones de Reynolds*.

La integración vertical consiste en promediar todos los términos de las ecuaciones de Reynolds en la dirección vertical. Por ejemplo, una variable como la velocidad se promediaría según:

$$u = \frac{1}{h} \int_{z_0}^{z_0+h} u_m \, dz$$

Donde z indica la dirección vertical, h el calado, z_0 la cota de fondo y u es ahora la velocidad promedio que existe en un punto (x,y) .

Después de este proceso, las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) &= -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h \overline{u_x' u_x'}) - \frac{\partial}{\partial y} (h \overline{u_x' u_y'}) \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) &= -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h \overline{u_x' u_y'}) - \frac{\partial}{\partial y} (h \overline{u_y' u_y'}) \end{aligned}$$

La primera representa la ecuación de conservación de la masa.

La 2ª y 3ª representan la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en las direcciones x e y respectivamente. Si, además, se realiza la consideración de no tomar en cuenta el efecto de las tensiones turbulentas, las ecuaciones de Saint Venant 2D son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) &= g h (S_{ox} - S_{fx}) \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) &= g h (S_{oy} - S_{fy})\end{aligned}$$

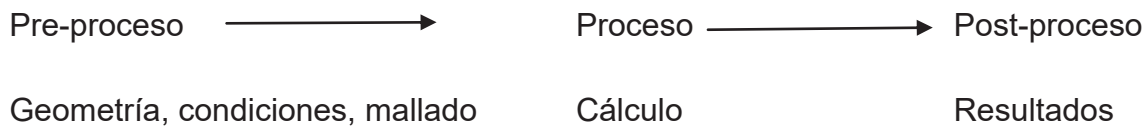
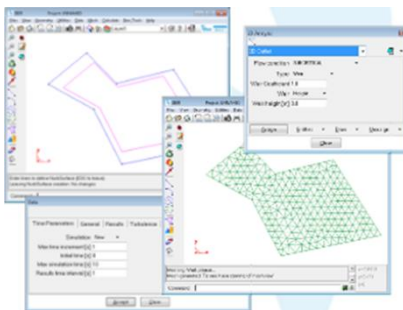
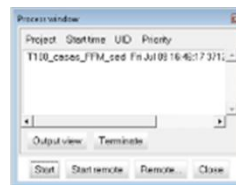
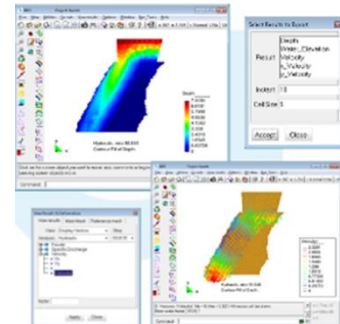
Las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales son un sistema de ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, hiperbólico y no lineal.

Un sistema de este tipo se tiene que resolver con algún método numérico, se requiere una geometría con su rugosidad de fondo, unas condiciones iniciales y unas de contorno.

Los principales resultados de una simulación con Iber son:

- La evolución del calado en cada punto de cálculo.
- La evolución de las dos componentes horizontales del caudal específico (caudal por unidad de ancho).

5.2 Estructura del programa.



5.3 Elementos de la simulación bidimensional.

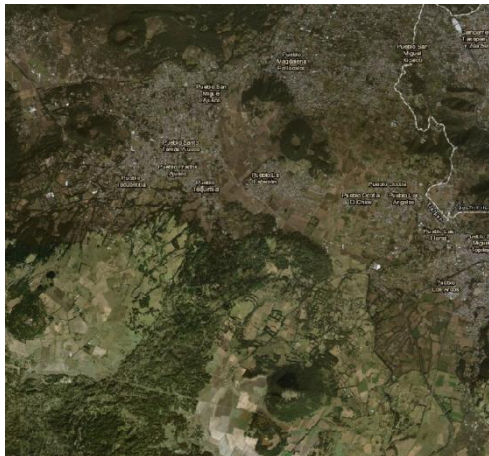
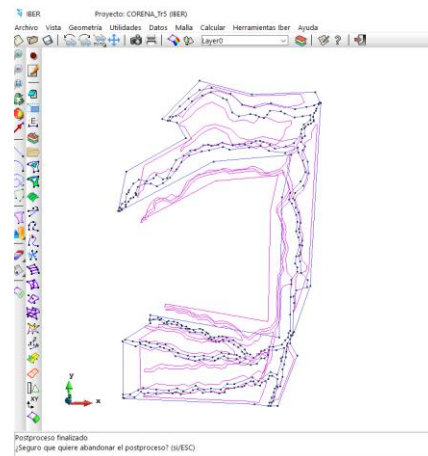


Imagen Base



Superficie NURBS

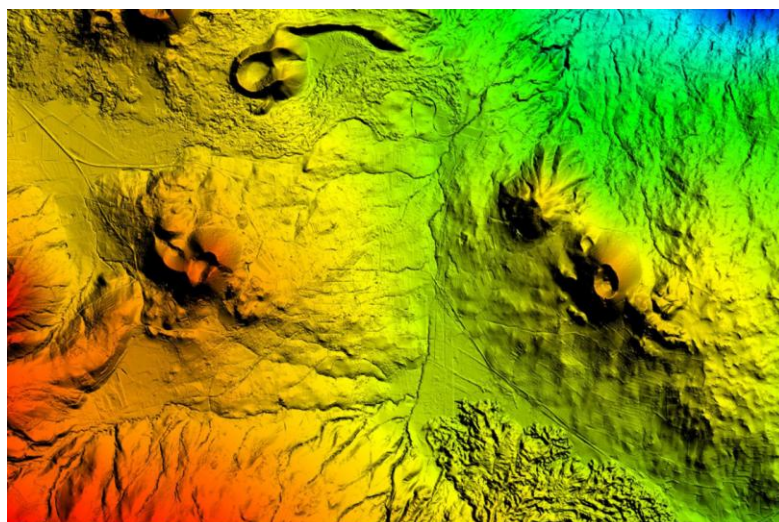


Figura 17. Modelo Digital de Elevaciones, INEGI 2009.

Con base en el Modelo Digital de Elevaciones de INEGI y el proceso anteriormente descrito, se obtienen los siguientes rastes asociados a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años respectivamente.

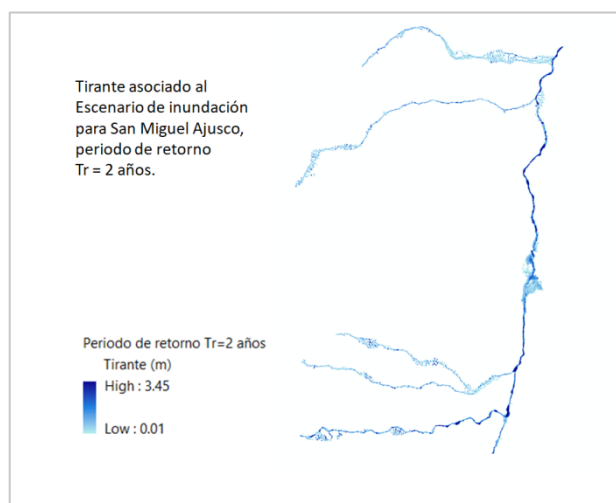


Figura 18. Raster Tr 02
(Elaboración propia)

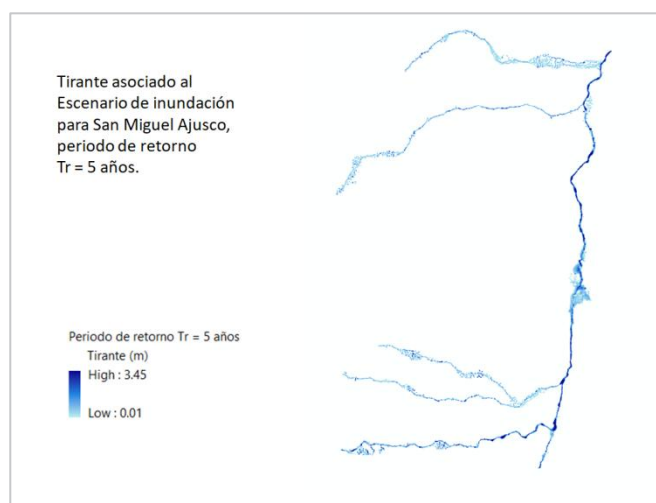


Figura 19. Raster Tr 05
(Elaboración propia)

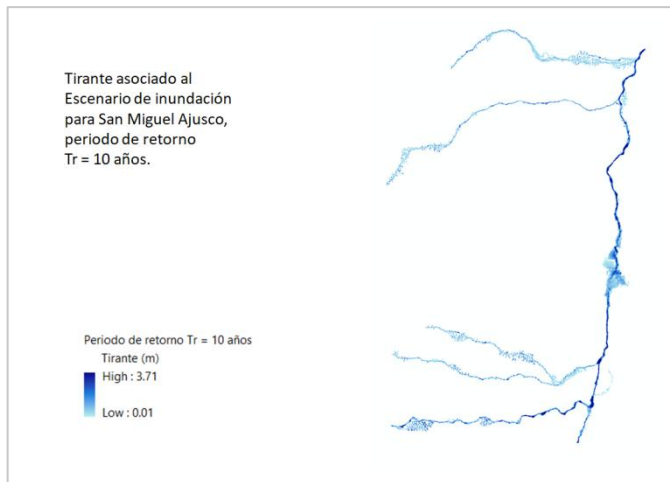


*Figura 20. Raster Tr 10
(Elaboración propia)*

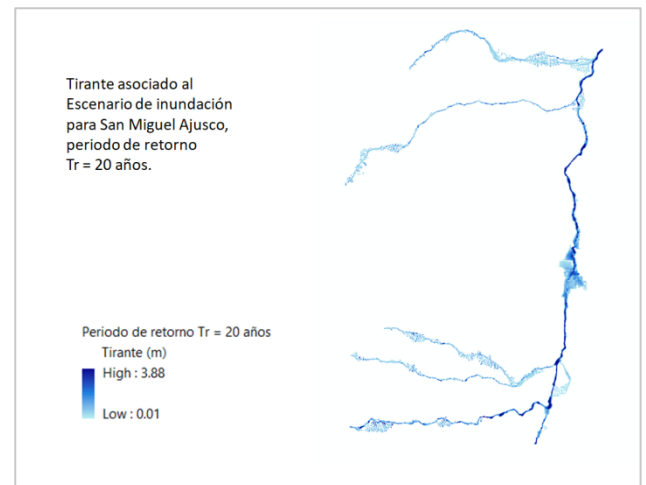


*Figura 21. Raster Tr 20
(Elaboración propia)*

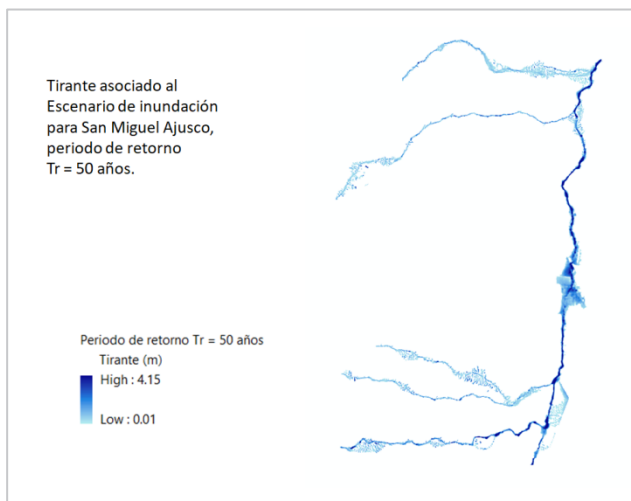


*Figura 22. Raster Tr 50
(Elaboración propia)*

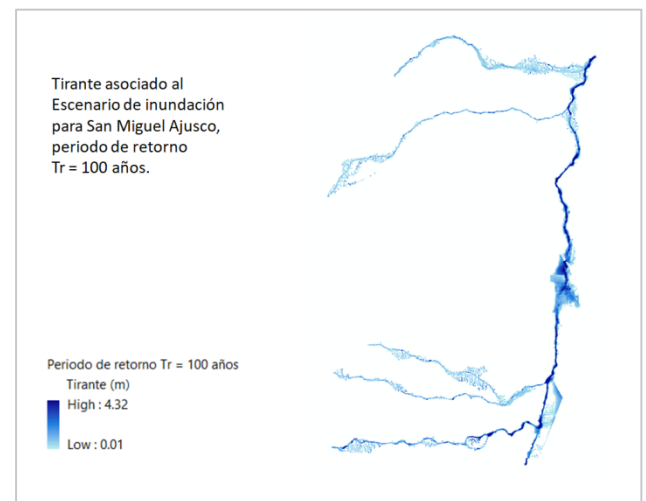


*Figura 23. Raster Tr 100
(Elaboración propia)*

6. CONCLUSIONES.

Por otra parte, el modelo digital de terreno del INEGI utiliza las cartas topográficas (escala 1:50,000), cuya información es confiable sólo si el río es intermitente.

Un análisis más preciso supone la disposición de más y mejor calidad de información, como es el caso de un mayor detalle en el modelo digital del terreno e información batimétrica del cauce, e inclusive la visita al sitio para recopilar información adicional sobre las condiciones del terreno.

Los resultados obtenidos mediante la metodología aquí presentada nos proporcionan mayor información al obtener como resultados tirantes asociados a escenarios de inundación, información que sirve de insumo para evaluar la vulnerabilidad física y posteriormente el riesgo por inundación.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Francisco Javier Aparicio Mijares (2008), "Fundamentos de hidrología de superficie", México, 304 p, Ed. Limusa, Noriega editores.

Universidad Autónoma Metropolitana (2006), "Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial", Agustín Breña Puyol, Marco Antonio Jacobo Villa, México: UAM. Universidad Autónoma de San Luis potosí (1998), "Procesos del Ciclo Hidrológico", D.F. Campos Aranda, México, UASLP.

S.M. Woodward and C.J. Posey (1941) "*Hydraulics of steady flow in open channels*", U.S.A, New york, J. Wiley & Sons, inc.

CENAPRED. (2006). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos). En H. Eslava Morales, M. Jiménez Esponosa, M. A. Salas Salinas, F. García Jiménez, M. T. Vazquez Conde, C. Baeza Ramírez, y otros, *Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones y avenidas subitas en zonas rurales, con arrastre de sedimentos* (págs. 141-182). México: CENAPRED.

CENAPRED. (2013). VELL (*Visualizador de Escenarios de Lluvia*). México.

Google Earth. (s.f.). *Google Earth*. Recuperado el Agosto de 2013, de <http://www.google.com/earth/>

CENAPRED, (2006), "Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos", Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica, serie: Atlas Nacional de Riesgos, CENAPRED, noviembre.



SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL

GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO
CENTRO DE LA TRANSFORMACIÓN

SGIRPC

San Miguel Ajusco, CDMX

