

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



ESTUDIO DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL
ESCURRIMIENTO EN LA SUBCUENCA 24B4 "MONTERREY",
APLICANDO UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL

POR

MARIA ERENDIRA MURILLO SANCHEZ

MONTERREY, N. L.,

MAYO DE 2002

INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



ESTUDIO DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL
ESCURRIMIENTO EN LA SUBCUENCA 24Bf "MONTERREY",
APLICANDO UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL

POR

MARIA ERENDIRA MURILLO SANCHEZ

MONTERREY, N. L.,

MAYO DE 2002

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE GRUADOS EN INGENIERÍA



**ESTUDIO DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL
ESCURRIMIENTO EN LA SUBCUENCA 24Bf "MONTERREY", APLICANDO
UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO
DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

POR:

MARÍA ERÉNDIRA MURILLO SÁNCHEZ

MONTERREY, N.L.

MAYO DE 2002

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fabián Lozano, por su apoyo y asesoría durante el desarrollo de esta tesis.

A Víctor Guerra, Doroteo Treviño y Martín Bremer, por sus consejos y colaboración para lograr tan buen trabajo.

A Milos Pelikan de Spatial Vision en Melbourne, Victoria (Australia), Albert Perez del Environmental Affairs Office, Washington State Department of Transportation Olympia, Washington, (USA) y Michael Mitchell, por su valiosa ayuda en lo que se refiere a procedimientos de Arc Info.

A Isadora, por su amistad y compañía a lo largo de este tiempo que espero siga siempre.

A Paty, por los buenos momentos que siempre pasamos juntas, las charlas y también por su amistad.

A mis amigos y compañeros de Laboratorio de Sistemas de Información Georreferenciada, Consuelo Hori, Santiago Salazar, Yunin Aguilar, Sandra Gastelum, Cristóbal Rullán y Sandra Correa, por su apoyo, ayuda y compañía durante mi estancia en el Tecnológico.

A Carlos Muñoz del Laboratorio de SIG del Centro de Investigaciones sobre la Sequía (CEISS) del Instituto de Ecología, por la información proporcionada, pero sobre todo por su amistad.

DEDICATORIA

A mis padres Daisy y Agustín (†), por apoyarme siempre y ayudarme a lograr mis metas. Este trabajo está dedicado a ustedes, gracias especiales.

A Carlos, Pilar y mis dos sobrinas Laura y Sofía, a Fernando, Rosario y Hortensia por su apoyo y ánimos.

A mi Tía Hortensia, Tía Maria Ana, Ramón, Chela y familia; mis primas Lupita, Hortensia, Nora y mi sobrino Luis por ayudarme y acompañarme siempre. Gracias.

RESUMEN

Han habido ocasiones excepcionales en las que han penetrado huracanes en el estado de Nuevo León -específicamente en la ciudad de Monterrey-, causando avenidas repentinas del río Santa Catarina y daños en diferentes formas. Tal vez la ocasión más recordada es el huracán Gilberto, en 1988, que desgraciadamente causó gran pérdida de vidas y daños materiales. Por tal motivo ha sido importante estudiar las condiciones fisiográficas de la subcuenca del río Santa Catarina y así predecir las avenidas de agua causadas por las lluvias, para tomar medidas preventivas de modo que se eviten daños como los que se han suscitado a través de la historia del desarrollo de Monterrey. La metodología empleada se basa en el desarrollo de un procedimiento para construir en un Sistema de Información Geográfica un Modelo Hidrológico que incluya la descripción morfológica de la subcuenca en estudio, así como el cálculo de los caudales máximos en diferentes periodos (1975 y 1995), y finalmente el análisis de los cambios de uso de suelo en 20 años y su efecto en el escurrimiento. Los resultados que se ha obtenido con este método son los siguientes: En 1975 el caudal fue de 5004 m³/seg, y en 1995 aumentó a 5528 m³/seg; esto representa un incremento de 524 m³/seg (10.47% del total) en 20 años. La vegetación en ese lapso de tiempo también cambió debido a diferentes factores de disturbio, como incendios, tala inmoderada, agricultura y ganadería, entre otros. La vegetación primaria -y por consiguiente con mayor capacidad de captación de agua- (como bosques y matorral submontano), está siendo sustituida por vegetación indicadora de disturbio o secundaria (como chaparral), o simplemente por vegetación con menores requerimientos de humedad (como matorrales rosetófilos y micrófilos), o en el peor de los casos por zonas desnudas. En su conjunto, estos cambios están causando un aumento en el escurrimiento que provoca la erosión de la superficie del suelo y el acarreo de sedimentos. Por lo tanto es importante considerar un manejo adecuado dirigido a la reforestación en la subcuenca, como medida a largo plazo, además de obras hidráulicas que disminuyan el tiempo de transporte del agua por los cauces, como medidas a corto plazo. De este modo se resolverá el problema que representa el aumento de los caudales máximos en el río Santa Catarina en un futuro.

Indice

I.	INTRODUCCION.....	1
1.1.	La historia de las inundaciones en el Estado de Nuevo León.....	1
1.1.1	Ciclones tropicales en el Estado de Nuevo León.....	4
1.1.2	Acciones de prevención contra inundaciones en el área Metropolitana de Monterrey	7
1.2	Los Modelos Hidrológicos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG´s).....	8
1.2.1	Antecedentes de los Modelos Hidrológicos.....	8
1.2.2	Modelo Digital de Elevación (DEM).....	11
1.3	Influencia de la vegetación sobre el escurrimiento.....	12
1.4	Objetivos.....	13
1.4.1	Objetivo General.....	13
1.4.2	Objetivos Específicos.....	13
II.	METODOLOGÍA.....	14
2.1	Descripción del área de estudio.....	14
2.1.1	Ubicación.....	14
2.1.2	Fisiografía.....	16
2.1.3	Geología.....	16
2.1.4	Clima.....	17
2.1.4.1	Climas Templados.....	17
2.1.4.2	Clima Semicálido.....	18
2.1.5	Hidrología.....	19
2.1.6	Edafología.....	20
2.1.7	Vegetación.....	22
2.2	Construcción del Modelo Hidrológico.....	26
2.2.1	Capas de Información necesarias.....	27
2.2.2	Modelo Digital de Elevación (DEM).....	28

2.2.3	Procedimiento.....	28
2.2.3.1	Preparación del DEM.....	28
2.2.3.2	Dirección del flujo.....	29
2.2.3.3	Acumulación del flujo.....	30
2.2.3.4	Subcuencas.....	31
2.2.3.5	Red de Drenaje.....	31
2.2.3.6	Longitud de los cauces principales.....	34
2.2.4	Cálculo de caudales máximos.....	34
2.2.4.1	Contrucción de curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno.....	34
2.2.4.1.1	Alturas de precipitación.....	35
2.2.4.1.2	Intensidad de la precipitación.....	37
2.2.4.2	Interpolación de las intensidades de lluvia.....	37
2.2.4.3	Método Racional.....	38
2.3	Índice de Transformación de la cobertura vegetal.....	39
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
3.1	Estaciones climatológicas.....	40
3.2	Descripción Morfológica de la Subcuenca 24Bf "Monterrey".....	43
3.2.1	Modelo Digital de Elevación.....	43
3.3	Resultados obtenidos del Modelo Hidrológico.....	45
3.3.1	Dirección y Acumulación del flujo.....	45
3.3.2	Delimitación de las subcuencas.....	45
3.3.3	Red de Drenaje.....	49
3.3.4	Longitud de los cauces.....	52
3.4	Análisis de los Caudales Máximos.....	55
3.4.1	Precipitaciones máximas.....	56
3.4.2	Curvas I-D-Tr.....	57
3.4.3	Interpolación de la intensidad de la precipitación.....	61
3.4.4	Uso del suelo.....	63
3.4.5	Textura del suelo.....	67
3.4.6	Caudales máximos.....	69

3.5	Disturbios en las comunidades vegetales y su relación con el aumento en el coeficiente de escurrimiento.....	73
IV.	CONCLUSIONES.....	92
V.	RECOMENDACIONES.....	94
VI.	ANEXOS.....	95
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	115

Indice de Tablas

Tabla 1. Cronología de las inundaciones en el estado de Nuevo León.....	1
Tabla 2 : Tipos de clima Templado presentes en la Sierra Madre Oriental.....	18
Tabla 3: Características del clima semicálido subhúmedo.....	19
Tabla 4 : Coeficientes de rugosidad de Manning.....	34
Tabla 5 : Coeficientes de escurrimiento asociados a períodos de retorno menores de 25 años.....	38
Tabla 6: Lista de estaciones meteorológicas, localización y período de registro.....	42
Tabla 7: Datos técnicos del Modelo Digital de Elevación.....	43
Tabla 8: Características morfológicas de la subcuenca.....	55
Tabla 9: Alturas de precipitación (mm) para un período de retorno de 20 años.....	58
Tabla 10: Intensidad de precipitación (mm/hr) para un período de retorno de 20 años.....	59
Tabla 11: Tipos de Uso del suelo en 1975 y 1995	66
Tabla 12: Clases Texturales de suelos representadas en las cartas edafológicas de INEGI (McCuen, 1998).....	67
Tabla 13: Caudal total acumulado por subcuenca (m^3/seg) para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.....	72
Tabla 14. Lista de disturbios presentes en la subcuenca 24Bf "Monterrey" y unidades vegetales afectadas (INEGI, 1998).....	74
Tabla 15. Índice de Transformación de la cubierta vegetal.....	86
Tabla 16. Cambios en el coeficiente de escurrimiento de 1975 a 1995, expresado por la diferencia entre los datos de ambos grids.....	89

Indice de Figuras

Figura 1. Precipitaciones anuales en la estación Monterrey.....	4
Figura 2. Trayectoria de huracanes de 1909, 1933 y 1938.....	5
Figura 3. Trayectoria estimada de los huracanes Beulah en 1965, Gilberto en 1988 y la tormenta tropical Gabrielle en 1995.....	6
Figura 4. Mapa de subcuencas de la República Mexicana, donde se puede observar el área que abarca la subcuenca Río Bravo-San Juan.....	14
Figura 5. Localización Geográfica del área de estudio, especificando el límite de la subcuenca 24Bf "Monterrey", y los municipios que la conforman.....	15
Figura 6. Formatos utilizados en Sistemas de Información Geográfica.....	27
Figura 7. Representación en formato raster de un Modelo Digital de Elevación.....	28
Figura 8: Perfil de un Modelo Digital de Elevación antes y después de llenar una depresión.....	29
Figura 9. <i>Grid</i> representando las 8 posibles direcciones que puede producir la función de <i>FLOWDIRECTION</i>	29
Figura 10. Suma acumulada de los valores de las celdas aplicando la función <i>FLOWACCUMULATION</i>	30
Figura 11. Cuenca y red de drenaje representado en raster.....	31
Figura 12. Producto del proceso de construcción de las líneas de escurrimiento.....	32
Figura 13: Diagrama de flujo del procedimiento empleado para la construcción del Modelo Hidrológico.....	33
Figura 14. Estaciones climatológicas utilizadas en el presente estudio.....	41
Figura 15. Modelo Digital de Elevación utilizado para construir el Modelo Hidrológico.....	44
Figura 16. Dirección del escurrimiento de acuerdo al patrón topográfico.....	46
Figura 17. Sitios de mayor acumulación de flujo, determinado por el valor de las celdas del grid.....	47
Figura 18. Área y perímetro por subcuenca.....	45
Figura 19. Subcuencas obtenidas, así como perímetro y área de cada una.....	48
Figura 20. Órdenes de escurrimiento por subcuenca.....	50

Figura 21. Comparación de los resultados obtenidos en la delimitación de los escurrimientos con la imagen Landsat TM de 1993.....	51
Figura 22. Coeficiente de rugosidad de Manning.....	53
Figura 23. Longitud de los cauces por subcuenca.....	52
Figura 24. Longitudes de los cauces por subcuenca (km).....	54
Figura 25. Precipitaciones máximas anuales (mm) de las estaciones climatológicas.....	56
Figura 26. Altura de la precipitación (mm) para un período de retorno de 20 años, Estación: El Cerrito.....	60
Figura 27. Intensidad de la precipitación (mm/hr) para un período de retorno de 20 años, Estación: El Cerrito.....	60
Figura 28. Interpolación de la intensidad de la lluvia (mm/hr) para una duración de 5 minutos y un período de retorno de $T_r = 20$ años.....	62
Figura 29. Media y datos máximos de la Intensidad de la lluvia por subcuenca, para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.....	63
Figura 30. Uso de suelo obtenido de las cartas de INEGI (1975).....	64
Figura 31. Uso de suelo de 1995 originado de la clasificación de la imagen Landsat de 1995.....	65
Figura 32. Cambios en el uso del suelo por área (km^2) de 1975 a 1995.....	66
Figura 33. Clases texturales presentes en el área de estudio.....	68
Figura 34. Caudal máximo por subcuenca obtenido a partir de los datos de 1975.....	70
Figura 35. Caudal máximo por subcuenca obtenido a partir de los datos de 1995.....	71
Figura 36. Caudales máximos estimados por subcuenca en 1975 y 1995 para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.....	69
Figura 37. Disturbios presentes en la zona de estudio.....	76
Figura 38. Comunidad de pino-encino localizada en la sierra "El Álamo".....	77
Figura 39. Bosque de pino. Ubicado en "El Tarillal".....	77
Figura 40. Bosques alternados con pastizales en "El Tarillal".....	78
Figura 41. Zona incendiada ahora ocupada por chaparral, donde aún se observan los troncos de árboles que originalmente crecían. El grado de erosión en la superficie del suelo es muy alto. Ubicado en la sierra "El Álamo".....	79
Figura 42. Ladera en la Sierra "El Álamo" afectada por un incendio,	

en la parte inferior se distingue una franja de pinos que no fueron afectados.....	80
Figura 43. Cambios detectados en las zonas cubiertas por bosque.....	81
Figura 44. Cambios detectados en las zonas cubiertas por matorral submontano.....	82
Figura 45. Cambios detectados en zonas cubiertas por chaparral.....	83
Figura 46. Cambios de Bosque a cualquier otro uso de suelo 1975-1995.....	84
Figura 47. Cambio de Matorral Submontano a cualquier otro tipo de uso de suelo 1975-1995.....	85
Figura 48. Cambios de Chaparral a cualquier otro tipo de uso de suelo 1975-1995.....	85
Figura 49. Media de coeficientes de escurrimiento de 1975 y 1995	87
Figura 50. Cambio en el coeficiente de escurrimiento de 1975 a 1995.....	87
Figura 51. Diferencias entre coeficientes de escurrimiento de 1975 y 1995.....	88

I. INTRODUCCION

1.1. La historia de las inundaciones en el estado de Nuevo León

De acuerdo con González (1973), la región de Monterrey se encuentra sujeta, por su cercanía al mar, a las perturbaciones que aparecen en el Golfo de México, ondas del este muy comunes en verano y perturbaciones ciclónicas tropicales, por lo que la lluvia ocurre en mayor cantidad en los meses en que se presentan estos fenómenos, de mayo a octubre, y tienen una media máxima en la primera quincena del mes de septiembre. Generalmente estos fenómenos no alcanzan a llegar a esta región como tales, con todas sus características -magnitud de vientos, baja extrema de presión atmosférica, intensidad de la precipitación, etc.,- sino que producen lluvias frontales muy copiosas y chubascos. Se nota también otra débil cresta que se desliza entre mayo y junio, mucho menor que la primera. Las lluvias de los restantes meses se generan por fenómenos frontales u orográficos.

Este régimen de precipitación genera las condiciones propicias para la ocurrencia de inundaciones producidas por avenidas repentinas en la ciudad de Monterrey. Su historial, registrado desde la fundación de Monterrey, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Cronología de las inundaciones en el estado de Nuevo León (González, 1973).

FECHA	TESTIMONIOS
1498	Hubo inundaciones en el México prehispánico
1568	El Minión (barco de los piratas Hawkins, en octubre), maltratado por las tempestades que seguían azotándolo, desembarcó parte de la tripulación 10 leguas al norte de Tampico. (Probablemente ciclones en las costas de Tamaulipas).
1611	Con motivo de una inundación se traza nuevamente la ciudad de Monterrey al sur del Ojo de agua
1612	Hubo una avenida en la cañada del Ojo de agua que derribó la mitad de las casas de la ciudad de Monterrey
1636	"En el mes de septiembre parece que se abrieron las cataratas del cielo, y fue tal la furia de las aguas que se llegó a temer un segundo diluvio, derribó las casas en Monterrey dejándolo hecho un desierto. La Villa de Cerralvo quedó de la misma suerte"
1648	En Cerralvo "Fue tanta el agua que bajó de la sierra por la cañada, achaque es de los años

Continuación Tabla 1	
	bisiestos como por experiencia se ha visto”
1672	Desbordamiento del río Santa Catarina que hizo huir a la mayoría de la población. Sólo se quedaron 685 personas
1716	“Llovió sin interrupción durante 40 días y las aguas del Santa Catarina amenazaron precipitarse sobre la ciudad, sobre el barrio de la Purísima”
1752	El Gobernador Bahamonde informa en 1788 que Monterrey se había arruinado por un diluvio en 1752
1756	Creciente del río Santa Catarina, y a partir de ésta, el río se convirtió en el subterráneo desde el poniente del cerro del Obispado hasta 8 kms abajo (Probablemente el arrastre de grava fue considerable)
1782	El Cabildo de Monterrey informa en 1784: “Con las irrupciones de la copiosas lluvias en el año 82 (1782) principió en sus edificios tanta ruina que para restablecerse quedaron en parte de sus facultades y la de todos sus habitantes tan debilitadas que aún subsisten sin vigor expedito para contribuir al remedio”
1801	D. Carlos Ma. Bustamante refiere: “El primer año de este siglo fue lluviosísimo, sobre todo en la frontera; fueron tan grandes las crecientes de los ríos, que las del Salado destruyeron la recién fundada Villa de Azanza que estaba en sus orillas”
1802	“De aquí se ve claramente que la epidemia de fiebres (palúdicas) que hubo en Monterrey de 1802 a 1803 fue igual a la que ha habido después y las que hemos visto (años lluviosos).
1810	El Gobernador D. Manuel de Santamaría (22 de agosto de 1810) expresa: “La notoria voracidad de las aguas que bajan por este río (Santa Catarina) amenaza la ruina de toda o parte de la ciudad, así lo observé el día 2”
1814	“De 1814 a 1815 hubo otra epidemia de fiebres (palúdicas), probablemente igual a la anterior” (Año lluvioso)
1825	Durante la creciente del Santa Catarina de 1881: “Viejos residente afirmaban que no había arrasado caudal semejante desde 1825, y otros comparaban el volumen con el de 1775”
1826	“Otra epidemia de fiebres (palúdicas) affigió a Monterrey por los años de 1826 a 1827” (Época lluviosa)
1835	Dice el Dr. J. E. González: “De otoño de 1835 a la primavera de 1836 vi por primera vez una epidemia de calenturas, que fue muy benigna” (a causa de las lluvias).
1844	“Sobrevino en el año de 1844 la epidemia más grave y más extensa de fiebres palúdicas que en mi vida he visto. Comenzó en la primavera, y a proporción que se aproximaba el estío se iba aumentando” (Siguen las lluvias).
1846	Hubo una creciente considerable del Río Santa Catarina
1867	En octubre 7, un ciclón se presenta en Matamoros y casi lo destruye (Es casi seguro que se hayan presentado lluvias frontales en la región).

Continuación Tabla 1	
1873	"Sopla un terrible ciclón en Matamoros, y otras poblaciones fronterizas sufren perjuicios".
1874	"En el mes de septiembre, después de unas lluvias muy abundantes y tempestuosas".
1881	"Desastres en Monterrey causados por las aguas, las siembras son arrasadas, se desploman edificios, perece ganado, y más de 200 familias quedan sin hogar" (Octubre 8) "En este mes (octubre 31) las lluvias torrenciales en Nuevo León inundan las cementeras y destruyen los caminos". "Creciente e inundación en el río Santa Catarina".
1894	"En septiembre 25 una gran avenida del río Santa Catarina destruye el puente del río frente al poblado de Cadereyta" (según el registro de lluvias en Monterrey, en agosto y septiembre llovió el 63% del año)
1895	"Fuertes temporales (en el mes de septiembre) azotan los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas". En Monterrey la lluvia de agosto y septiembre fue el 72% del total del año. Desde este año hasta 1906 es una buena época de lluvias bien repartidas en todos los meses.
1909	Desde el mes de julio de este año las lluvias fueron muy intensas, teniendo un máximo en el mes de agosto de 790 mm (74% del total del año), ocasionando dos terribles inundaciones en las riberas del río Santa Catarina el día 10 y del 27 al 29, dejando un saldo trágico con la pérdida de 2000 vidas humanas y 29 millones de pesos.
1933	A partir del año de 1922 hasta 1948 las lluvias se presentaron casi todos los años, más altas que la normal (salvo 1926, 1929 y 1939). En este lapso se destacan 1933 y 1938 por la magnitud de las precipitaciones, ocasionando de nuevo dos grandes crecientes en el río Santa Catarina; septiembre de 1933, en que llovió en agosto y septiembre 770 mm, 59% del total anual, y agosto de 1938, con 454 mm, 51 % del total del año (Al autor de este estudio le tocó observar ocularmente la creciente del año de 1933).
1967	Desde el año de 1966 la precipitación anual toma un franco ascenso que alcanza su máximo en 1967, presentándose en este año fuertes precipitaciones en los meses de agosto y septiembre, con 995 mm (76% del total del año), y, por supuesto, se tienen grandes caudales escurridos en las corrientes de la región que ponen en peligro muchas poblaciones localizadas aguas debajo de los ríos Santa Catarina y San Juan .

Desde el año de 1886 en adelante se tiene información de datos observados diariamente en el "Observatorio Sinóptico de Superficie" de la antigua Secretaría de Agricultura y Ganadería, localizado en el centro de la ciudad de Monterrey. Los datos que aparecerán a continuación (a partir de ese año) son tomados de los registros de este observatorio. Otros datos son cualitativos, sujetos a errores de apreciación. En la Figura 1

se pueden apreciar las fluctuaciones en las precipitaciones totales acumuladas, distribuidas a lo largo del tiempo.

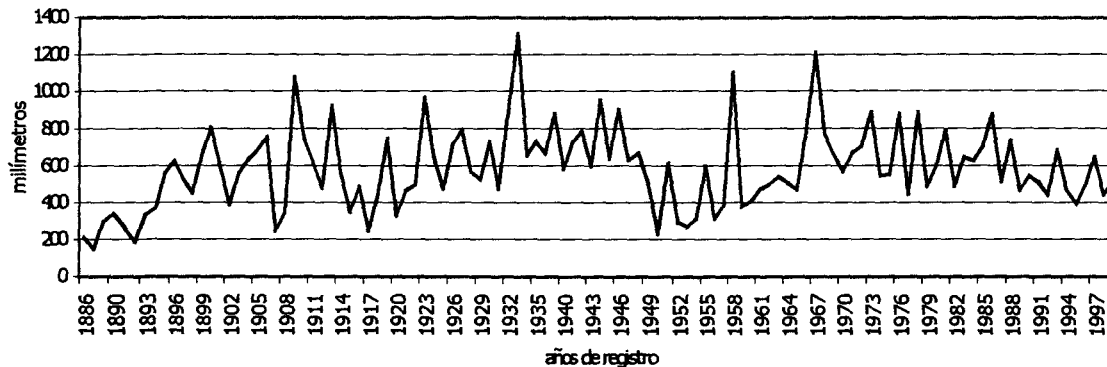


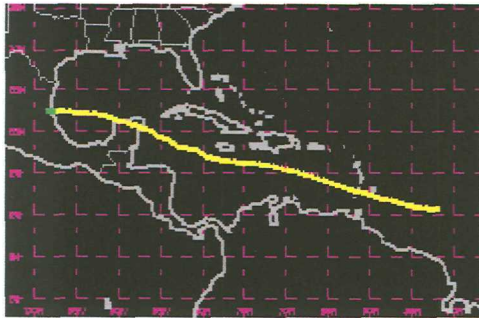
Figura 1. Precipitaciones anuales en la estación Monterrey

1.1.1 Ciclones tropicales en el estado de Nuevo León.

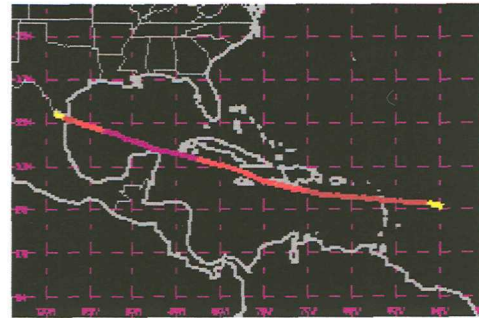
La costa oriental de México es azotada por estos fenómenos casi actualmente, con mucha frecuencia desde el mes de agosto hasta el mes de octubre, pero pueden presentarse en menor cantidad en el mes de junio (González, 1967).

Han habido ocasiones excepcionales en que los huracanes han penetrado en el estado de Nuevo León. De acuerdo a González (1967), "Los huracanes del 10 y 25 de agosto de 1909, septiembre 5 de 1933 y agosto 28 de 1938 cruzaron la plataforma continental (Figura 2), ocasionando inundaciones en Monterrey por el desbordamiento del río Santa Catarina, y pudieron conservar su fuerza hasta el estado de Coahuila, donde declinaron". Sánchez y Zaragoza (1989) describen detalladamente los sucesos del huracán de 1909 y mencionan que hubo 3000 víctimas.

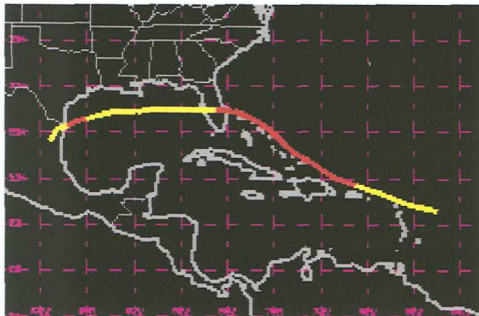
También se tienen registros de huracanes más recientes en Monterrey (Figura 3), como el Beulah, que se presentó del 19 al 25 de septiembre de 1967, el Gilberto del 17 al 18 de septiembre de 1988, y la tormenta tropical Gabrielle el 13 de agosto de 1995.



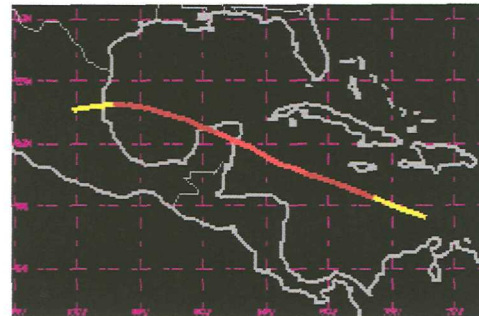
27 de Julio-11 de Agosto 1909
 Categoría: TT
 Vientos máximos: 50 nudos



20 al 28 de Agosto 1909
 Categoría: 3
 Vientos máximos: 105 nudos



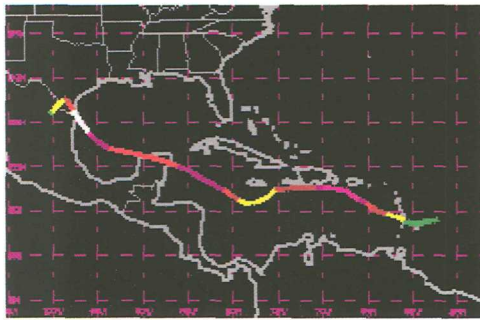
25 de Julio al 5 de Agosto 1933
 Categoría: 1
 Vientos máximos: 80 nudos
 Presión mínima: 981 mb



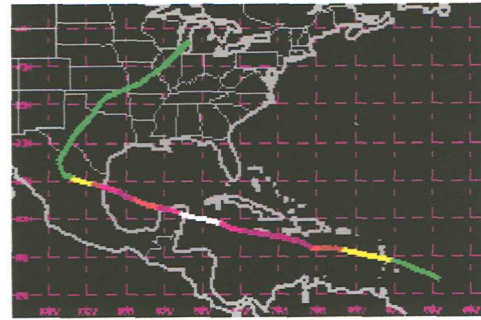
23 al 28 de Agosto 1938
 Categoría: 2
 Vientos máximos: 85 nudos
 Presión mínima: 938 mb

Categoría	Color de línea
DT (Depresión Tropical)	Verde
TT (Tormenta Tropical)	Amarillo
1	Rojo
2	Rojo claro
3	Magenta
4	Magenta claro
5	Blanco

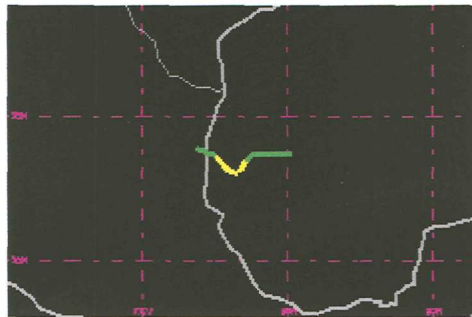
Figura 2. Trayectoria de los huracanes de 1909, 1933 y 1938 (UNYSIS, 2000)



Huracán Beulah
05 al 22 de Septiembre 1967
Categoría: 5
Vientos máximos: 140 nudos
Presión Mínima: 923 mb



Huracán Gilberto
08 al 20 de Septiembre 1988
Categoría: 5
Vientos máximos: 180 nudos
Presión Mínima: 888 mb



Tormenta tropical Gabrielle
9 al 12 de Agosto 1995
Categoría: TT
Vientos máximos: 60 nudos
Presión Mínima: 990 mb

Categoría	Color de línea
DT (Depresión Tropical)	Verde
TT (Tormenta Tropical)	Amarillo
1	Rojo
2	Rojo claro
3	Magenta
4	Magenta claro
5	Blanco

Figura 3. Trayectoria estimada de los huracanes Beulah en 1967, Gilberto en 1988 y la tormenta tropical Gabrielle en 1995 (UNYSIS, 2000)

De acuerdo con estimaciones de la Comisión Nacional del Agua (CNA), el gasto máximo del río Santa Catarina durante el Huracán Gilberto fue de 4,800m³/seg. (comunicación personal de D. Treviño, perteneciente a la Unidad de Hidrometeorología, Subgerencia Técnica, Gerencia Regional Río Bravo).

1.1.2 Acciones de prevención contra inundaciones en el área metropolitana de Monterrey

En los 400 años de historia de Monterrey ha sido común el desbordamiento del río Santa Catarina por causa de las grandes avenidas que no ha podido desfogar. En cada ocasión causó serios destrozos a la ciudad y provocó la pérdida de gran número de vidas. En 1950 el Gobernador Morones Prieto tomó la decisión de canalizar y rectificar el cauce del río a lo largo de 7 kilómetros frente a la ciudad, y sometió el proyecto a la aprobación del Presidente Miguel Alemán. Ese mismo año comenzaron las obras que eliminarían el peligro de nuevas inundaciones en Monterrey. De paso se acabó con el enorme depósito de desperdicios y basura en que se convertía el lecho del río en las épocas en que no corría agua. Se utilizaron además alrededor de 900 mil metros cuadrados de ambas riberas para la urbanización de la ciudad. De ellos se destinaron 400 mil a la construcción de calles, avenidas y banquetas, 100 mil fueron para áreas de jardín, y los restantes 400 mil se urbanizaron para venderse y recuperar las inversiones. También se construyeron los puentes de Zaragoza, Gonzalitos, Pino Suárez y Félix U. Gómez para facilitar las comunicaciones dentro de la zona urbana (Torres y Santoscoy, 1985).

Sin embargo, las obras hidráulicas no son suficientes para evitar este tipo de eventos (más bien, son una solución a corto plazo), y si se quiere encontrar una verdadera solución se tiene que tomar en cuenta el estado biológico de conservación de la subcuenca, pues debido a la degradación de la cubierta forestal, los volúmenes de escurrimiento se incrementan. Por tal motivo es importante estudiar las condiciones fisiográficas de la subcuenca del río Santa Catarina, para de este modo predecir las avenidas de agua causadas por las lluvias o chubascos -así como de huracanes- y tomar medidas preventivas para evitar daños como los que se han suscitado a través de la historia del desarrollo de Monterrey, y actualmente de su área metropolitana.

1.2 Los Modelos Hidrológicos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG's)

Los SIG's y la Hidrología se basan en principios fundamentales muy diferentes; sin embargo, existe un vínculo entre los dos. Los SIG's describen el medio ambiente, mientras la Hidrología describe cómo el ambiente afecta el flujo de agua a través del ciclo hidrológico. Un objetivo fundamental en la Hidrología Espacial es el uso de los datos espaciales y funciones de los SIG's, a fin de ayudar a generar nuevas ideas y estrategias para solucionar problemas dentro de la Hidrología.

1.2.1 Antecedentes de los Modelos Hidrológicos

La historia de los modelos hidrológicos se remonta a la mitad del siglo XIX, cuando en el año 1856 se describe la Ley de Darcy (la ecuación fundamental para el flujo de aguas subterráneas), y en 1871 la Ecuación de St. Venant que describe el flujo no estable de canal abierto desarrollado. Durante el siglo pasado (en la década de los 40's) se comenzó a hablar del transporte de constituyentes en aguas naturales. Los modelos computacionales empezaron a aparecer a mediados de 1960, primero para aguas superficiales y transportes de sedimentos. Un ejemplo es el Modelo de Cuencas de Standford, de Crawford y Linsley (1966), que es un ejemplo de los modelos que representan la respuesta de una cuenca en su totalidad y sin tomar en cuenta la caracterización de la variabilidad espacial del lugar; además utilizan parámetros que no se relacionan a características superficiales físicamente observables, y esto hace que la estimación de los parámetros consuma demasiado tiempo, y que se obtenga un resultado poco satisfactorio. La precipitación se representaba como el promedio espacial de las estaciones climatológicas (Storck, *et al* 2000). Tales modelos todavía se utilizan en Estados Unidos; por ejemplo, en el Sistema de Predicción Ripario del Servicio Meteorológico Nacional, en el Modelo de Cuantificación de la Humedad del Suelo de Sacramento (Burnash *et al*; 1973 en Storck *et al* 2000), que es un derivado del Modelo de Cuencas de Standford. Posteriormente, en los 70's, se desarrollaron modelos para calidad de aguas superficiales y subterráneas, y en 1980 para transporte de aguas subterráneas.

En los últimos 10 años se ha visto el desarrollo de una segunda generación de Modelos de Simulación Hidrológicos que permiten representar la variabilidad espacial de la mayoría de las características superficiales de la Tierra. Dos factores han provocado lo anterior: primero, la topografía digital y otros datos superficiales están más disponibles, así como datos importantes para los hidrólogos, como suelos y vegetación, aunque la precisión de éstos varía. En segundo lugar está la reciente utilización de computadoras personales, que se ha incrementado. Muchas de las aplicaciones de modelos hidrológicos que hace diez años se corrían en grandes computadoras, ahora se corren en estaciones de trabajo en ambiente UNIX (Storck, et al 2000). Una segunda migración de estas estaciones de trabajo a PC's está por venir a medida que las capacidades de las computadoras personales sobrepasen a las estaciones de trabajo. Así mismo, De Vantier y Feldman (1993) presentan un resumen general de la relación entre los SIG y los modelos hidrológicos.

Muchos trabajos hablan sobre el análisis de las cuencas basados en datos topográficos mediante Modelos de Elevación Digital (DEM's): autores como Hutchinson (1989) presentan un algoritmo de interpolación que produce DEM's mas exactos. Otros autores han desarrollado procedimientos para delinear la red hidrológica y cuencas a partir de los DEM's, así como la corrección de depresiones producidas por datos erróneos (Maidment, 1994; Martz y Garbrecht, 1992). Sus aplicaciones son en áreas como predicción de inundaciones (diseño y planeación), así como la construcción de registros de avenidas (Storck, et al 2000).

Rinaldo et al. (1992) analizan las similitudes entre las redes hidrológicas derivadas de los DEM's y las redes de canales óptimos (OCN) obtenidos minimizando la energía utilizada en el sistema. Moore y Graison (1991) subdividen la cuenca en subcuencas para modelos donde el área es muy grande y el manejo de datos se dificulta.

Los modelos utilizados para determinar los contaminantes en el agua y, por ende, los escurrimientos, son muy variados. Vieux (1991), Maidment (1992a, 1992b, 1993, 1996a), Olivera et al. (1995), Olivera y Maidment (1996), y Saunders y Maidment (1995) han presentado artículos interesantes con diversas metodologías.

La sensibilidad de los resultados del modelo a la resolución espacial de los datos es mencionada por Vieux (1993), que discute cómo el tamaño de la celda (o píxel) del DEM

afecta la pendiente del terreno y la longitud del recorrido del fluido, y por lo tanto el escurrimiento. Vieux y Needham (1993) concluyen que a medida que se incrementa el tamaño de la célula se acorta la longitud de los cuerpos de agua y se incrementa el área de sedimentos.

Recientemente se cuenta con múltiple información disponible en internet. En la página de GIS Development.net (2000) se pueden encontrar diversos artículos sobre Hidrología Espacial. A continuación se enumeran algunos:

- Grover, S. Perspectives of GIS Modeling in Hydrology
- Seth, S.M. Physically based Hydrological Modeling
- Jagadeesha, C.J. Water Resources Development and Management
- Jaiswal, I., Mani, R., y Panchal, V.K. Estimation of Runoff through Remote Sensing
- De Silva, R.P. Spatiotemporal Hydrological Modeling
- Rao, D.P. Disaster Management
- Paik, S. Countries may be different...not the sufferings
- Lavakare, A. Gis and Risk Assessment

En años recientes el Centro de Investigación de Recursos Hidrológicos (Center for Water Resources, CRWR) de la Universidad de Texas, en Austin, y ESRI (Environmental Research Institute) han establecido un consorcio para desarrollar e implementar las capacidades de los SIG's dentro de los estudios hidrológicos, utilizando Arc Info 8.0 y Arc View 3.2, los principales softwares aplicados a los sistemas de información geográfica. Resultado de esta colaboración han sido varias publicaciones que se pueden consultar en la página de internet de dicho instituto (<http://www.crwr.utexas.edu>). En la actualidad, es el grupo que está a la vanguardia en el estudio de la Hidrología Espacial.

1.2.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Los Modelos Digitales de Elevación escala 1:50,000 son derivados de la carta topográfica de la misma escala, y en México son distribuidos por INEGI. Consisten en una matriz de elevaciones del terreno sobre el nivel medio del mar calculados a intervalos regulares. Se proporcionan en archivos binarios crudos con extensión .bil, e incluyen archivos de texto con los metadatos básicos para su utilización, como son las dimensiones del Modelo, el tipo de datos, la proyección cartográfica y el datum geodésico de referencia, entre otros. A partir del Modelo o combinándolo con otros tipos de información, y aplicando las herramientas digitales, se puede generar sombreado digital de relieve, mapas de pendiente de terreno, mapas de visibilidad e imágenes en perspectiva. Tienen la Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum NAD27 o ITRF92. La cobertura geográfica por cada Modelo corresponde a la clave de la carta topográfica (INEGI, 2002).

Los Modelos Digitales de Elevación pueden ser distribuidos a través de cinta de 8mm, disco compacto, diskette o vía internet (ftp) (INEGI, 2002).

Las curvas de nivel originales se revisan en perfiles del terreno a cada 45 y 10 metros en el terreno. Se realiza una inspección visual del Modelo Digital de Elevación para detectar posibles errores de valores de altitud. Se utiliza como apoyo un sombreado del relieve del Modelo para detectar errores omitidos en el paso anterior. En todos los casos se editan las curvas de nivel y se origina un nuevo Modelo Digital de Elevación si existen errores (INEGI, 2002).

Los valores de altitud se originan a partir de curvas de nivel y puntos acotados obtenidos de mapas impresos, o puntos con precisión fotogramétrica utilizados en la triangulación fotogramétrica para realizar la restitución de originales. El espaciamiento entre cada valor de altitud en el Modelo Digital de Elevación es de 50 metros en el terreno, es decir, una rejilla de 50 por 50 metros de resolución. El Modelo Digital de Elevación, por su geometría, cubre un área rectangular. El área del Modelo no cubierta por el formato geográfico de la carta se obtiene recortando curvas de nivel de archivos colindantes y/o digitalizando en pantalla sobre archivos raster de cartas impresas colindantes, uniéndose al archivo de curvas de la carta antes de generar el Modelo Digital

de Elevación. La línea de costa, si existe, es tratada dándole un valor arbitrario de cero (0) a la parte marítima y valor de uno (1) a la parte continental (INEGI, 2002).

El procedimiento simplificado para obtener un Modelo Digital de Elevación es:

- 1) Obtención de curvas de nivel por restitución fotogramétrica de fotografías aéreas.
- 2) Edición de la carta topográfica escala 1:50,000.
- 3) Barrido ("escaneo") de curvas de nivel de la carta topográfica.
- 4) Vectorización de curvas de nivel en formato digital.
- 5) Generación del Modelo Digital de Elevación.

1.3 Influencia de la vegetación sobre el escurrimiento

El papel fundamental que desempeña la vegetación (principalmente los bosques) sobre el escurrimiento es el de modificar la forma en que las aguas acceden a los cauces, disminuyendo drásticamente las aportaciones de superficie y aumentando correspondientemente las subterráneas, conjugándose los siguientes factores para conseguir este efecto (TRAGSATEC, 1998):

- a) La mayor capacidad de infiltración de que dotan a los suelos
- b) La interceptación de la precipitación, que disminuye la intensidad de los aguaceros y distribuye su agua a lo largo del tiempo
- c) La mayor rugosidad de la superficie, los mayores obstáculos del contorno, que producen una fuerte disminución de la velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales (la cuarta parte de la velocidad en suelo raso, lo que implica un retraso importante en el tiempo de concentración en los cauces, disminuyendo no sólo el caudal punta de la descarga, sino también su volumen, por la mayor posibilidad de infiltración y evaporación que supone este retraso)
- d) La transpiración de las plantas, que regula la dosis de humedad del suelo, manteniendo una capacidad de almacenamiento disponible aun en épocas de gran humedad

- e) La gran capacidad de absorción de agua de las cubiertas de restos vegetales y húmicas (propias de las masas forestales), que retrasa el punto de encharcamiento y, por tanto, el comienzo del flujo superficial (TRAGSATEC, 1998).

A nivel local, otra consecuencia del máximo interés en el bosque del control de los escurrimientos superficiales consiste en la posibilidad de reducir los caudales originados por los fuertes aguaceros que, con cierta frecuencia, son causa de fuertes avenidas en Monterrey.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el efecto que ha producido el cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la subcuenca 24Bf "Monterrey" mediante un sistema de Información Geográfica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- 1) Construir un Modelo Hidrológico basado en un Modelo de Elevación Digital, determinando las características morfométricas de la subcuenca.
- 2) Construir curvas de Intensidad-Duración-Período de Retorno (I-D-Tr) a partir de precipitaciones máximas obtenidas de las estaciones climatológicas.
- 3) Determinar la distribución espacial de la intensidad de la precipitación mediante una interpolación de los datos, aplicando el método de distancias inversas cuadradas (IDW).
- 4) Estimar el caudal máximo a partir de datos de uso de suelo de las cartas de INEGI de 1975 y la clasificación de la imagen Landsat de 1995 (Hori, 1998),
- 5) Hacer un análisis de detección de cambios en la vegetación en 20 años y establecer la relación entre el aumento en el escurrimiento y los cambios producidos en la vegetación en este período de tiempo.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

2.1.1 Ubicación

El área de estudio forma parte de la cuenca B Río Bravo-San Juan (Figura 4), subcuenca f (Río Santa Catarina), dentro de la región hidrológica RH-24 del río Bravo, ocupando un área de 1128.84 km², aproximadamente. Varios municipios del estado de Nuevo León forman parte de la subcuenca, y son Santa Catarina, San Pedro Garza García, Santiago, Garza García, Allende y Monterrey. Del estado de Coahuila están incluidos los municipios de Saltillo y Ramos Arzipe (Figura 5).



Figura 4 . Mapa de subcuencas de la República Mexicana, donde se puede observar el área que abarca la subcuenca Río Bravo-San Juan.

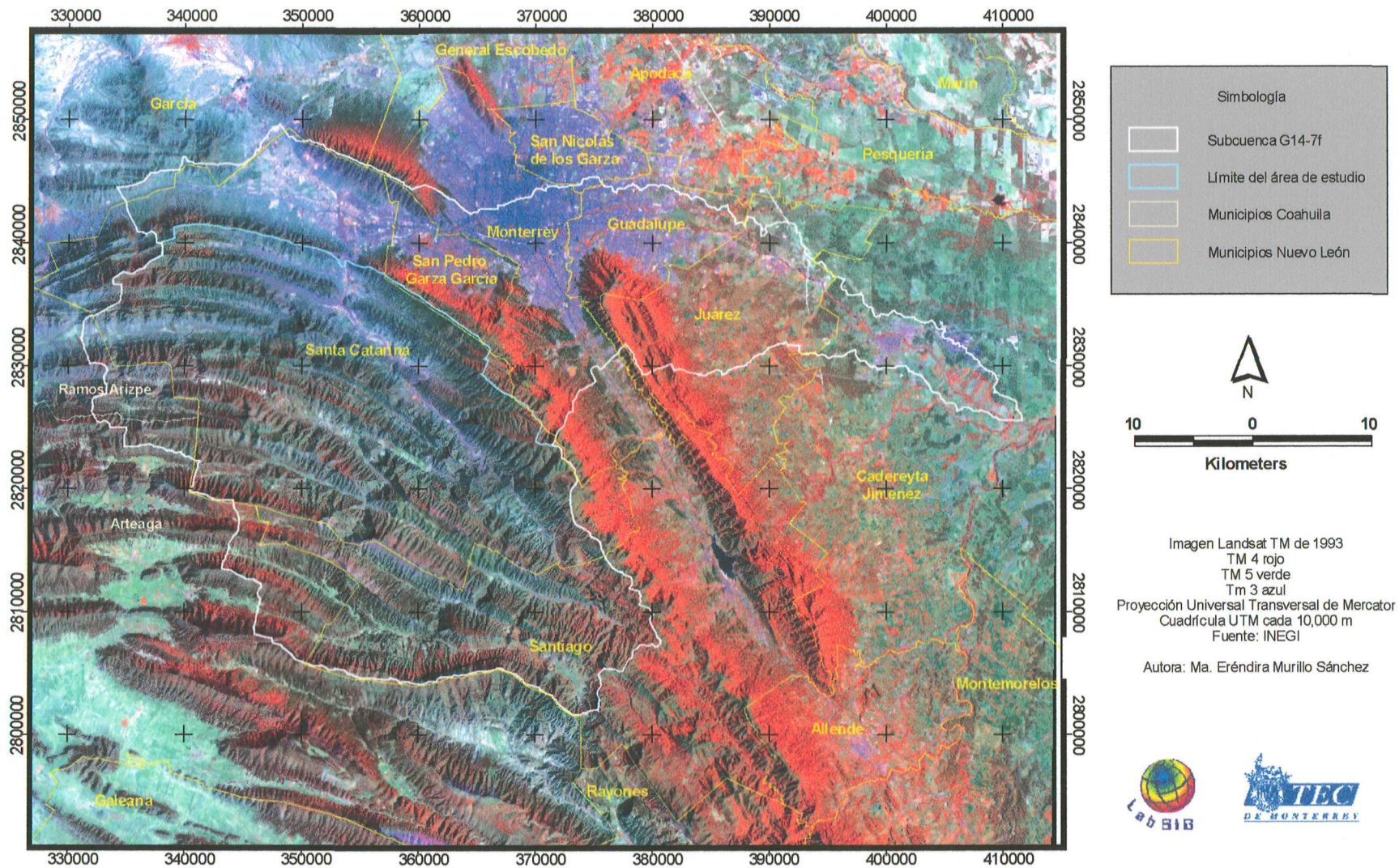


Figura 5. Localización geográfica del área de estudio, especificando el límite de la subcuenca 24Bf (Monterrey), y los municipios que la conforman.

En este trabajo se modelará la subcuenca 24Bf "Monterrey", que es de donde provienen las aportaciones de escurrimientos al río Santa Catarina, excluyendo la zona metropolitana de Monterrey.

2.1.2 Fisiografía

El área de estudio se encuentra en la provincia de la Sierra Madre Oriental, constituida por una serie de plegamientos con dirección Norte-Noroeste a Sur-Sureste, los cuales sufren una flexión hacia Oeste-Suroeste de Monterrey, Nuevo León, hasta Teziutlán Puebla. Al oeste de Monterrey, la Sierra Madre Oriental sufre una flexión Este-Oeste y llega al sur de Torreón. A su vez, pertenece a la subprovincia de la Gran Sierra Plegada que se inicia inmediatamente al este de Saltillo, Coah., se flexiona con la integración de un gran arco al sur de Monterrey, N.L. y se prolonga hacia el sur hasta la altura de Ciudad Valles, San Luis Potosí, de tal manera que abarca territorios de los estados mencionados y de Tamaulipas. La variación altitudinal fluctúa desde 700 m.s.n.m. hasta los 3,400 m.s.n.m. (INEGI 1975). En ella dominan las capas plegadas de calizas y lutitas, con prominentes ejes estructurales de anticlinales y sinclinales. La región flexionada que se encuentra al este de Saltillo y al sur de Monterrey, se conoce como anticlinorio de Arteaga (INEGI, 1986).

2.1.3 Geología

Las rocas más antiguas de la Sierra Madre Oriental son esquistos del Precámbrico. Hay afloramientos de areniscas y asociaciones de areniscas y lutitas intercaladas, pertenecientes al Triásico. Del Jurásico superior hay afloramientos masivos de calizas de yeso, y de yeso asociado con caliza. Además afloran lutitas y varias asociaciones de calizas lutitas y lutitas areniscas (INEGI, 1986). Los cuerpos de rocas ígneas intrusivas (ácidas e intermedias) que afectan a rocas sedimentarias mesozoicas son del Terciario. También pertenecen a esta edad los conglomerados que se encuentran en las márgenes de la Sierra Madre Oriental. Además, hay depósitos de conglomerados y rellenos aluviales

del Cuaternario. Las principales estructuras de la Sierra Madre Oriental están constituidas por pliegues anticlinales y sinclinales, afectados por grandes fallas de tipo normal y numerosas fallas inversas (cabalgaduras) que han trocado las secuencias normales de depósito. Además, hay varios cuerpos de depósito intrusivos que han afectado a las secuencias mesozoicas de la Sierra Madre Oriental en diversos puntos (INEGI, 1986).

En esta subcuenca se encuentran algunos de los principales yacimientos minerales del estado, algunos de los cuales están siendo explotados por pequeños mineros, aunque su producción es de poca importancia. Por lo demás, la mayoría de los antiguos yacimientos de minerales metálicos se encuentra abandonados debido a diversos problemas técnicos y socioeconómicos (INEGI, 1986).

2.1.4 Clima

La provincia de la Sierra Madre Oriental presenta una distribución climática muy compleja, ya que encontramos aquí diversos tipos de clima: secos extremos, semisecos, templados y semicálidos. Esto se debe principalmente a la marcada diferencia de altitudes en la sierra. Las diferencias de temperatura ocasionadas por la existencia de cadenas montañosas producen un efecto de condensación que a su vez genera lluvias que se concentran en la vertiente este de la sierra, mientras que en la vertiente oeste se desarrolla un fenómeno conocido como "sombra orográfica", que da lugar a llanos o bolsones con clima seco o semiseco en las zonas de transición de la sierra al altiplano, así como a algunas porciones aisladas en las cumbres con climas templado y semicálido (INEGI, 1986).

2.1.4.1 Climas Templados

Estos climas se observan en las partes altas de la sierra, donde las condiciones de humedad propician un cambio notorio. Están distribuidos en una franja norte-sur, que corresponde a la transición entre las llanuras occidentales y la Sierra Madre Oriental (INEGI, 1986).

Son estables en cuanto a temperatura, por lo que se consideran mesotérmicos. Se caracterizan por tener una temperatura media anual entre 12 y 18°C; la temperatura del mes más frío oscila entre -3 y 18°C. Las comunidades vegetativas típicas en estos climas son bosques mesófilos de montaña y matorral de coníferas. Las lluvias son en verano. Se presentan cinco variantes, de las cuales destacan cuatro (INEGI, 1986) que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 . Tipos de clima Templado presentes en la Sierra Madre Oriental (INEGI, 1986).

Tipos de clima templado	Municipios	% de lluvia invernal	Lluvia total anual en mm	Temperatura media anual en °C	Mes de mayor lluvia en mm	Mes de mayor temperatura en °C
Templado subhúmedo con índice de humedad alto	General Zaragoza,	5-10.2	800-1200	12-18	Septiembre 280-290	Mayo, junio julio agosto con 18
Templado subhúmedo con humedad intermedia	General Zaragoza, Aramberri y Santiago	5-10.2	600-800	12-18	Septiembre 140-150	Mayo, junio julio agosto con 16 y 17
Templado subhúmedo con lluvias en verano	A lo largo de Sierra Madre Oriental: parte de Galeana	Mayor de 10.2	600-800	12-18	Septiembre 110-120	Agosto con 18-19
Templado subhúmedo con índice de humedad bajo	Pequeñas porciones en Aramberri, Galeana e Iturbide	5-10.2	600-700	14-18	Septiembre 140-150	En junio con 21-22

2.1.4.2 Clima Semicálido

Presenta las características generales de la Llanura Costera del Golfo Norte, pues se encuentra en la zona de transición entre la llanura y la sierra, como continuidad climática. Destaca en la zona una sola variante: el semicálido subhúmedo, que se describe en la Tabla 3 (INEGI, 1986).

Tabla 3. Características del clima semicálido subhúmedo (INEGI, 1986).

Tipos de clima semicálido	Municipios	% de lluvia invernal	Lluvia total anual en mm	Temperatura media anual en °C	Mes de mayor lluvia en mm	Mes de mayor temperatura en °C
Semicálido subhúmedo	General Zaragoza, Santiago y Aramberri	5-10.2	800-1200	18-20	Septiembre 230-240	Junio julio y agosto con 27 ó 28

2.1.5 Hidrología

La cuenca del Río Bravo-San Juan está distribuida en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. El área de cuenca que le corresponde a cada estado es de 13,123 km², 18,860 km², y 989 km² respectivamente, para un total de 32,972 km². Una de las corrientes principales es el río San Juan, segundo afluente de importancia del río Bravo. Tiene su origen en el arroyo la Chueca, que recibe aportaciones de varios pequeños arroyos perennes que bajan de la Sierra Madre Oriental, desde altitudes del orden de 2,000 a 2,300 m.s.n.m.. El arroyo la Chueca corre con dirección sureste hasta la presa la Boca (construida para aumentar la dotación de agua a Monterrey) y de ahí continúa con el nombre de río San Juan, cambiando su dirección al noreste y recibiendo las aportaciones del río Santa Catarina y del río Ramos. Un poco más adelante pasa por el poblado de San Juan Vado para continuar hacia el oriente, confluyendo por la margen derecha del arroyo Garrapatas y el río Pilón, convergiendo finalmente con el río Mohinos, punto donde se encuentra la presa El Cuchillo-Solidaridad en el municipio de China, Nuevo León. La confluencia de este último modifica su dirección hacia el nor-noreste después de que recibe la aportación del mayor de sus afluentes, el río Pesquería, por la margen izquierda, y sigue hacia el norte hasta los Aldamas. En este punto cambia su rumbo hacia el oriente y después hacia el noreste hasta la Presa Marte R. Gómez, que es de las más importantes del país. Descarga en el río Bravo un poco más delante de Ciudad Camargo. Tiene como subcuencas intermedias: Presa Marte R. Gómez (24Ba), río San Juan (24Bb), río Pesquería (24Bc), río Salinas (24Bd), San Miguel (24Eb), Monterrey (24Bf), río Ramos (24Bc) y río Pilón (24Bj) (INEGI, 1986).

La subcuenca Bf "Monterrey" la cual es la de mayor extensión en el área, se encuentra respresentada por dos corrientes, la primera de nombre "San José de las Boquillas" con dirección de oeste a este y pasando por los cañones de San José de las Boquillas, Cañada La Boquilla y El Álamo. La segunda se origina al oeste de la localidad La Ciénega y presenta una dirección sur-noroeste de nombre Santa Catarina y atravesando el Cañón de la Huasteca (INEGI et al., 1998).

2.1.6 Edafología

Según la clasificación de suelos de la FAO-UNESCO (1970) modificada por Cetenal, que utiliza los horizontes y características de diagnóstico para la descripción de las unidades de suelo, se distingue para la zona de estudio las siguientes unidades y subunidades (INEGI et al. 1998):

- a) Litosol. Suelos de menos de 10 cm de espesor y se encuentran sobre roca o tepetate, no aptos para cultivos de ningún tipo. Pueden destinarse al pastoreo. Se distribuyen sobre la parte más alta y en las exposiciones oeste y sur de la sierra.
- b) Rendzina. Se caracteriza por tener un horizonte "a" mólico que se encuentra sobre material calcáreo. Es una capa superficial blanda de color oscuro rica en materia orgánica y nutrientes, de alta fertilidad. En su mayor parte se localiza sobre las partes altas de la sierra y en exposiciones noreste, en zonas ocupadas por bosques.
- c) Regosol. Suelos formados por material suelto que no sea aluvial reciente. Se presentan dos subunidades: regosol calcárico que, -como su nombre lo indica- está formado por materiales calcáricos, y regosol éutrico, que carece de propiedades especiales además de las del grupo.

Su distribución va desde las porciones intermedias de la sierra, con pendientes de más de 40%, hasta partes planas donde la pendiente es mínima a consecuencia de la acumulación de este tipo de materiales, ocupando indiferentemente zonas de bosques, matorrales, pastizales y áreas agrícolas. En algunas localidades, la formación de estos suelos está relacionada con substratos de lutitas y areniscas.

- d) En algunas áreas de la zona de estudio, esta unidad de suelo presenta dos horizontes, uno "A" úmbirco, y "B" argílico; el primero indica que existe una capa superficial blanda de color oscuro rica en materia orgánica, y el segundo se refiere a una capa ubicada generalmente debajo del horizonte "A", en la que ha habido de arcilla. En su mayor parte ocupa zonas de boques. Presenta la subunidad crómica.
- e) Feozem. Su característica es la presencia de un horizonte "A" mólico (ya descrito). Las subunidades que se encuentran en la zona son feozem calcárico y feozem lúvico; la primera se refiere a la presencia de material calcáreo, y la segunda es un horizonte "B" argílico. Las dos son en general fértiles y de fácil manejo. Estos suelos están destinados a fines agrícolas tanto de temporal como de riego.
- f) Vertisol. Suelos de textura arcillosa y pesada que se agrietan notablemente cuando se secan. Tienen dificultades en su labranza, pero son adecuados para una gran cantidad de cultivos, siempre y cuando se controle la cantidad de agua para que no se inunden o sequen. La subunidad existente es vertisol pélico, que presenta una capa negra en la superficie. Ocupan zonas de pastizales inducidos y áreas agrícolas de temporal.
- g) Fluvisol. Suelos de origen aluvial reciente, pedregosos que se encuentran en su mayor parte sobre lechos de ríos. La subunidad calcárica es la que se encuentra en la zona.
- h) Castañozem. Suelos con horizonte "A" mólico de color pardo oscuro y de acumulación calcárea (horizonte cálcico). Se encuentran tres subunidades: castañozem lúvico cuya característica es la presencia de un horizonte "B" argílico (capa de arcilla abajo del horizonte "A"), castañozem háplico con acumulación calcárea también abajo del horizonte "A", y finalmente también se encuentra la subunidad háplica. Son comunes en zonas de cultivo y tienen alta productividad agrícola.
- i) Xerosol. Se caracterizan por tener una capa superficial de color claro y muy pobre en humus. Debajo de ella puede existir un suelo muy rico en arcillas, o bien semejante a la capa superficial. Muchas veces presentan a cierta profundidad

manchas, polvo o aglomeraciones de cal; cristales de yeso o caliche, de mayor a menor dureza. A veces son salinos. Presenta la subunidad háplica.

2.1.7 Vegetación

Es bien conocido el hecho de que en nuestro país el clima depende más de las variaciones altitudinales que de las latitudinales. Esto hace que la estructura de la vegetación siga un patrón provocado por el mismo gradiente; es decir, por los cambios en la altitud por encima del nivel del mar. Así se explica -a nivel local- el hecho de que sean las sierras de la subprovincia los sistemas de topoformas que presentan una mayor diversidad de tipos de vegetación. En las cuatro clases de sierras del área se presentan entre seis y quince ejemplos distintos de vegetación que abarcan expresiones diversas de los tipos generales de bosque, matorral y pastizal (INEGI, 1986).

La diversidad es tal que no permite establecer con seguridad cuál es la vegetación clímax. Si es bien cierto que los bosques de pino cubren áreas considerables, frecuentemente se les encuentra entretejidos con otros tipos de vegetación, por lo que no se les puede considerar como francamente dominantes, ya sea porque se encuentran en zonas ecotonales difíciles de definir en lo que a vegetación respecta, o porque se han visto expuestos a perturbaciones más o menos intensas (INEGI, 1986).

En términos generales puede decirse que hay dos formas fundamentales de paisaje vegetal que compiten por un claro predominio: los bosques y los matorrales. En el primer caso dominan los de pino, y en el segundo, los matorrales desértico rosetófilo y submontano, y el chaparral (INEGI, 1986).

A continuación se describe los principales tipos de vegetación que se encuentran en el área de estudio (INEGI, et al., 1998):

- a) **Matorral Desértico Rosetófilo.** Se encuentra con mayor abundancia en exposiciones suroeste de la sierras. En general, la estructura de la comunidad destaca dos estratos, uno superior de 0.80 a 1.50 metros y otro de 0.80 a 0.40 metros. En el primero observamos *Rhus virens* (lantrisco), *Mimosa* sp., *Acacia berlandieri* (guajillo), *Viguiera deltoidea*, y en el segundo *Agave striata striata* (espadín), *Agave lechuguilla* (lechuguilla)

Dasyllirion sp. (sotol), *Viguiera deltoidea*, *Rhus microphylla*, *Gymnosperma glutinosum*, *Opuntia* sp. (nopal), *Euphorbia antisiphilitica* (candelilla), *Bouteloua curtipendula* (zacate banderilla), *Parthenium incanum* (mariola), *Muhlenbergia virescens* (cola de zorra), *Jatropha dioica* (zangregado).

Esta agrupación vegetal se encuentra en contacto con pastizales inducidos, hacia las partes bajas con matorral submontano y en las regiones de mayor altitud con chaparrales y bosques de pino piñonero.

- b) **Matorral submontano.** Se localiza al norte, noreste y noroeste de la subcuenca, especialmente en exposiciones suroeste, en condiciones de mayor aridez causado por sombra orográfica, y en cañones interiores de la sierra.

En cuanto a la estructura de la comunidad, existen tres estratos: uno superior de 2 a 5 metros de alto dominado por *Helietta parvifolia* (barreta), *Fraxinus greggii* (barreta lisa), *Acacia amentacea* (chaparro prieto) *Pithecellobium pallens* (tenaza), *Neopringlea integrifolia* (corvagallina), *Casimiroa pringlei* (chapote amarillo), *Cordia boissieri* (anacahuita), y *Celtis pallida* (granjeno). Un estrato medio de uno a dos metros con *Helietta parvifolia*, *Diospyros texana* (chapote), *Neopringlea integrifolia* (corvagallina), *Zantoxylum fagara* (colima) *Pithecellobium pallens* (tenaza), *Decatropis bicolor* (colorín), y *Acacia berlandieri* (guajillo). Por último, un tercer estrato inferior de menos de 0.80 metros con las siguientes especies: *Chiococca alba*, *Chrysactinia pinnata*, *Croton toreyanus*, *Digitaria sanguinalis*, *Lantana camara*, *Lantana citrosa*, *Lasciasis divaricata*, *Paspalum notatum*, *Capsicum frutescens*, *Antigonon leptopus*, y *Notholaena sinuata*.

En las porciones interiores de la sierra, -en condiciones secas- este tipo de vegetación se encuentra en contacto con matorral desértico rosetófilo en las partes bajas y en las partes mas altas con chaparrales, bosques de encino, bosques de pino-encino (sobre todo en zonas de parteaguas) y menos frecuente con bosques de piñoneros (*Pinus cembroides*).

- c) **Chaparral.** Se encuentra repartido en gran parte de la subcuenca, en exposiciones suroeste y generalmente en pendientes pronunciadas.

Este tipo de vegetación presenta tres estratos: superior, de uno a tres metros; medio, de 0.10 a 0.80 metros, e inferior de menos de 10 centímetros. Como especies dominantes podemos mencionar para el estrato superior *Quercus cordifolia*, *Quercus intricata*, *Quercus emoryi* (encinos chaparros), *Arctostaphylos pungens* (manzanilla), *Dasylium berlandieri*, *Dasylium texanum* (sotoles), *Lyndleyella mespiloides*, *Cowania plicata* (alejandría), *Cercocarpus mojadensis*, *Ceanothis coeruleus*, *Rhus virens* (lantrisco). En el estrato medio *Rhus virens* (lantrisco), *Arctostaphylos pungens* (manzanita), *Chrysactinia mexicana*, *Cyperus flavus*, *Gymnosperma glutinosum*, *Dasylium berlandieri* (sotol). En el estrato inferior: *Arenaria ludens*, *Nama parvifolium*, *Arenaria lycopodioides*, *Eroneuron* sp.

- d) **Bosques.** En general, los bosques se encuentran ubicados en pendientes con exposición norte y noreste, donde la humedad es mayor favoreciendo la presencia de este tipo de vegetación más vigorosa. Se puede encontrar bosque de pino piñonero, bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino-encino, bosque de ayarin-oyamel-pino.

El bosque de pino piñonero se distingue por la homogeneidad de su estrato arbóreo de 8 a 10 metros de alto formado por *Pinus cembroides* y en algunos cañones con la variedad de *edilus*, entre otras especies. Hay una comunidad muy importante en San Antonio de las Alazanas.

En el bosque de encino se encuentra una gran variedad de especies, entre las cuales se puede mencionar *Quercus sillae* (en regiones cálidas húmedas), *Q. virginiana* var. *fusiformis* (encino bravo), *Q. polymorpha* (encino manzano). En un estrato arbóreo de 10 a 15 metros se encuentra *Q. Rysophylla* (encino de asta), *Q. Canby* (encino molinillo), *Q. Laceyi* (encino memelite), *Q. Laeta*, *Arbutus xalapensis* (madroño), *Junglans mollins* (nogal encarcelado) y *Prunus cerotina* (capullín).

Los bosques de encino-pino se puede considerar como una variante favorecida por los disturbios de los bosques de pino-encino, sin embargo, existen regiones en donde su establecimiento se debe a la interacción de

factores naturales como condiciones microambientales de pequeñas exposiciones sur (secas), cañadas y escurrimientos, exposiciones norte (más húmedas) que se alternan con frecuencia originando mezclas de encino con pino y pequeños manchones de pino. Los elementos dominantes son: en un estrato arbóreo de 10 a 15 metros se encuentra *Q. Rysophylla* (encino de asta), *Q. laeta*, *Q. Graciliformis* (encino molinillo), *Pinus pseudostrobus* y *Arbutus xalapensis*. En un estrato arbustivo de 3 metros hay *Rhus radicans*, *Colubrina greggii*, *Q. sp.* y, finalmente, en un estrato herbáceo de menos de 0.60 metros se observa *Desmodium psilophyllum*, *Llavea cordifolia*, *Hedeoma palmeri* y *Eupatorium sp.*

En el Bosque de pino-encino se encuentran tres estratos generalmente. En el superior de 14 a 17 metros se puede observar *Pinus tecote* (pino chino), *P. pseudostrobus* (pino real), *Pinus greggii*, y *Q. laeta*. En el estrato medio -de dos a cuatro metros- *Rhus toxicodendrum*, *R. Radicans*, *Crataegus greggiana*, y *Senecio seemanii*. En el estrato inferior -menor de 0.80 metros- *Hedeoma palmeri*, *Desmodium psylophyllum*, *Agave aff. zonata*, *Pteridium aquinilum*, *Asplenium resiliens*, entre otras.

En el bosque de ayarín-oyamel-pino se agrupan varias asociaciones con diferentes dominancias, por ejemplo en algunas regiones domina el género *Pinus*, y en otras ocasiones el *Abies*. Hay generalmente dos estratos, pero a veces se presentan cuatro en total debido a factores de disturbio o zonas ecotonales. En el estrato superior encontramos *Peudotsuga flahualti*, *P. macrolepis* (guáyame colorado), *Pinus rudis*, *P. pseudostrobus* var. *estevezii*, *P. montezumae*, entre otros. En el estrato medio suele encontrarse *Ceanothus greggii*, *C. fendleri*, *Garrya laurifolia*, *G. Ovata*, y *Populus tremuloides* (alamillo). En el estrato inferior hay *Chimaphila maculata*, *Chimaphila umbellata*, *Achillea millefolium*, *Amoreuxia wrightii*, entre otras. Y, finalmente, en el estrato rasante suele encontrarse *Hypnum cupressiforme* var. *vacuosum*, *H. Cupressiforme*, *Entodon erythropus*, en su mayor parte.

- e) Los demás tipos de vegetación que se presentan en esta gran sierra plegada son pastizales naturales e inducidos, y vegetación halófila (INEGI, 1986).

2.2 Construcción del Modelo Hidrológico

Los datos hidrológicos espaciales son la información que describe cómo una característica específica (relevante para propósitos hidrológicos) se localiza o se distribuye en el espacio (Olivera *et al.* 2001). En general, el proceso consiste en delinear los escurrimientos y las cuencas basándose en el Modelo Digital de Elevación, calculando características dependientes de la topografía tales como dirección del flujo, longitud del flujo y pendientes, para posteriormente determinar parámetros como el coeficiente de escurrimiento y el escurrimiento total.

En un Sistema de Información Geográfica hay dos maneras de representar los rasgos de la superficie terrestre: los formatos vector y raster. El formato vector se refiere a la manera de representar rasgos mediante puntos, líneas o polígonos. Las superficies continuas se pueden representar usando un *Grid* (malla de celdas) o un modelo Raster. La conexión entre datos raster y vector es crítica en hidrología, tal vez más que en otras áreas. Los ríos se representan como líneas, y las estaciones climatológicas como puntos. Sin embargo, las cuencas que drenan hacia esos puntos se derivan de modelos digitales de elevación que son representaciones raster de las elevaciones de la superficie terrestre considerada como una superficie continua, así como la precipitación, evaporación y otras variables climáticas. La posibilidad de moverse entre uno y otro formato es muy importante en los análisis hidrológicos espaciales.

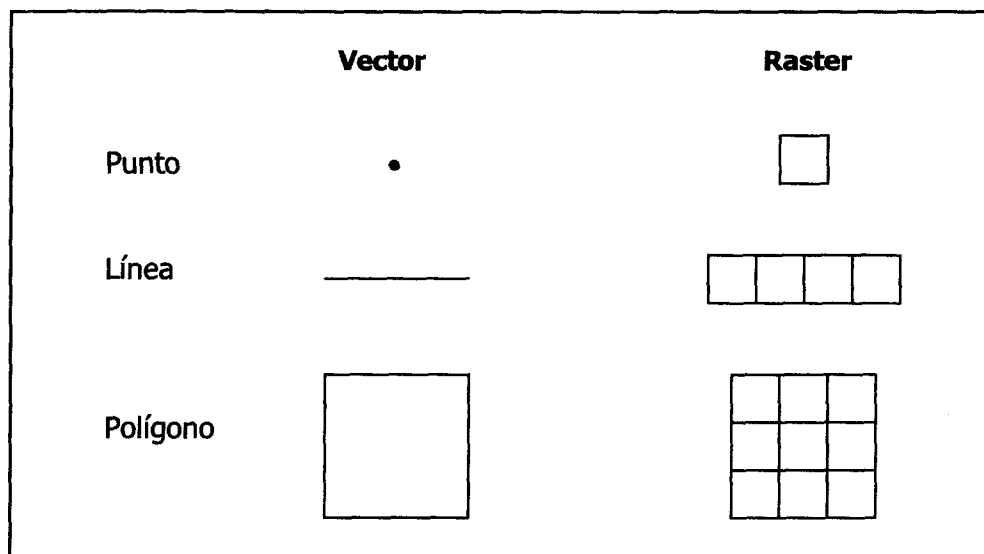


Figura 6. Formatos utilizados en Sistemas de Información Geográfica (Maidment and Engel, 2002).

Como se muestra en la figura 6, un punto representado en formato vector se puede transformar en una celda en una representación raster, una línea como una serie de celdas unidas entre sí, y un polígono como una zona de celdas.

2.2.1 Capas de Información necesarias

La información necesaria para alimentar el modelo es:

- Precipitaciones máximas en 24 horas de cada una de las estaciones climatológicas (información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Río Bravo en Monterrey, y Gerencia Coahuila en Saltillo), algunas de las cuales se encuentran en el Anexo II.
- Cartas de INEGI de 1975 :G14c24, G14c25, G14c26, G14c34, G14c35, G14c36, escala 1:50,000 de edafología, uso de suelo, y climas.
- Tipos de vegetación actualizado para 1995 a partir de la clasificación de una imagen de satélite (Hori, 1998).
- Modelo Digital de Elevación obtenido en INEGI, representando cada celda un área de 50X50 metros.

2.2.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)

El punto de partida es la utilización de un Modelo Digital de Elevación, que es una representación raster de las elevaciones del terreno. Como se aprecia en la Figura 7, cada celda contiene un valor que representa la altura de ese rasgo del terreno. De acuerdo con Hutchinson (2001), en el caso de modelos de distribución espacial de datos hidrológicos se recomienda que el tamaño del pixel sea de 5 a 50 metros. En este trabajo se modeló con una resolución de 50 metros, ya que se obtuvo una buena resolución comparable con los datos de INEGI.

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12

Figura 7. Representación en formato raster de un Modelo Digital de Elevación.

2.2.3 Procedimiento

2.2.3.1 Preparación del DEM

El primer paso es entender cómo el agua fluye a través del terreno y cómo los cambios en éste afectan la dirección del flujo. (ESRI, 1992). Un problema inherente en los modelos hidrológicos basados en datos raster es la presencia de depresiones que son errores en el DEM. El resultado es una red de escurrimientos irregulares, así que se recomienda llenar esas depresiones antes de seguir procesando el modelo. Estas depresiones (Figura 8), están formadas por celdas rodeadas de celdas de mayor elevación. Algunas depresiones son artificiales, mientras que otras representan cuencas interiores de drenaje reales. Es difícil distinguir cuáles depresiones son reales y cuáles no, pero se

recomienda establecer un criterio de profundidad para tomar la decisión (Maidment, 1991).

La función que permite encontrar las depresiones es **SINK**, y para llenarlas se utiliza **FILL** de Arc View. El Grid resultante se llamará **FILLDEM**.



Figura 8. Perfil de un Modelo Digital de Elevación antes y después de llenar una depresión.

2.2.3.2 Dirección del flujo

El siguiente paso es determinar la dirección que tomaría una gota de agua a su paso por cada celda. Utilizando **FLOWDIRECTION** se define que hay 8 posibles direcciones (Figura 9) que están determinadas por la pendiente, la cual se calcula de acuerdo al cambio en la elevación dividido entre la distancia de las celdas en cuestión. Cada una de estas celdas adquiere un valor o código que representa esa dirección.

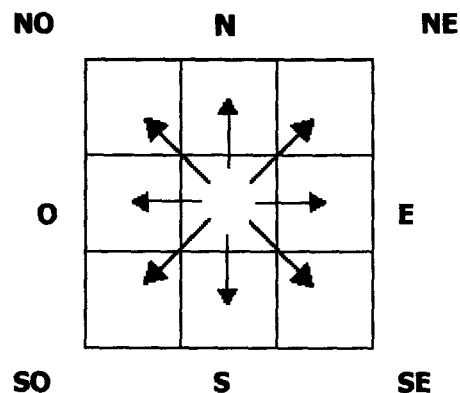


Figura 9. Grid representando las 8 posibles direcciones que puede producir la función de **FLOWDIRECTION**.

Los comandos a utilizar son:

Grid: Flowd = FLOWDIRECTION (FillDEM)

Flowd = *Grid* de dirección de flujo

FLOWDIRECTION = Función para determinar la dirección del flujo

FillDEM = DEM sin depresiones

2.2.3.3 Acumulación del flujo

FLOWACCUMULATION calcula el flujo acumulado en una celda, que proviene de la suma de los valores de las celdas arriba de ella. En este paso, el valor de las celdas pueden ser precipitaciones o escurrimientos. Si no se le asigna ningún valor en particular, entonces el programa calcula un valor que representa el número de celdas que fluyen hacia ese punto, como se observa en la Figura 10.

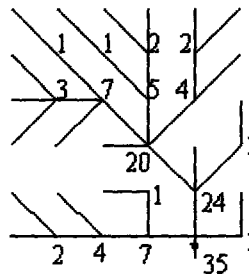


Figura 10. Suma acumulada de los valores de las celdas aplicando la función **FLOWACCUMULATION**.

Grid: Flowacc = FLOWACCUMULATION (Flowd) o bien:

Grid: Flowacc = FLOWACCUMULATION (Flowd, caudal_m³/seg)

Flowacc = Acumulación del flujo

FLOWACCUMULATION = Función para determinar los sitios de acumulación en el DEM

Flowd = Representa la dirección del flujo (producto de la operación anterior)

Caudal_m³/seg = *Grid* que represente el escurrimiento resultado de la estimación obtenida del Método Racional.

2.2.3.4 Subcuencas

Una vez que la dirección y la acumulación se han determinado, se pueden formar las cuencas y las redes de escurrimientos. Las cuencas pueden ser delineadas utilizando el *grid* de **FLOWDIRECTION** como dato de entrada para la función **WATERSHED** o **BASIN**. De esta manera, se buscan las celdas que fluyen hasta cierto punto determinado, el cual será la desembocadura de esa cuenca (Figura 11).

Grid: subcuencas = WATERSHED (Flowd)

Subcuencas = Grid de subcuencas

WATERSHED = Función para construir las subcuencas

Flowd = *Grid* de dirección del flujo

2.2.3.5 Red de Drenaje

La red de escurrimientos se construye utilizando el resultado de **FLOWACCUMULATION** y la función **STREAMNET**, y mediante una función algebraica se forman líneas que representan los escurrimientos (Figura 11). Posteriormente se pueden aplicar las funciones **STREAMORDER** (para jerarquizar los escurrimientos, eligiéndose el Método de Strahler), **STREAMLINK** (que asigna valores a las líneas de escurrimiento), y finalmente **STREAMLINE** (para vectorizar el resultado).

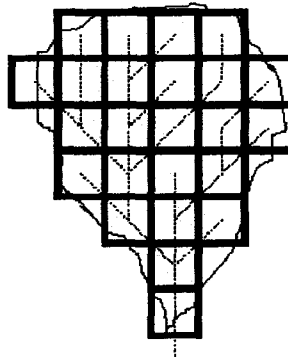


Figura 11. Cuenca y red de drenaje representado en raster.

Grid: `STREAMNET = con (Flowacc > 35, 1)`

`STREAMNET` = Red de escurrimientos

`con` = función condicionante, que en este caso indica que a aquella celda donde converjan 35 celdas, se le da el valor de 1.

Grid: `STREAMORDER (STREAMNET, Flowd, Strahler)`

`STREAMORDER` = Órdenes de corriente

`Flowd` = *Grid* de Dirección del flujo

`Strahler`: Método de jerarquización de los órdenes de corriente

Grid: `streaml = STREAMLINK (STREAMORDER, Flowd)`

`Streaml` = *Grid* de escurrimientos con algún valor asignado

`STREAMLINK` = Función para asignar valores a las conjunciones de cada línea

`Flowd` = *Grid* de Dirección del flujo

Grid: `drenaje = STREAMLINE (streaml, Flowd, orden_h)`

`Drenaje` = Escurrimientos en formato vector

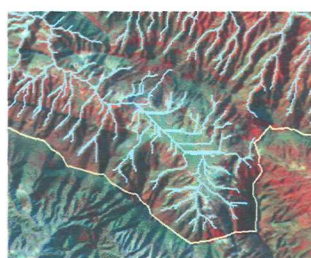
`STREAMLINE` = Función para vectorizar `streaml`

`Streaml` = Producido en el paso anterior

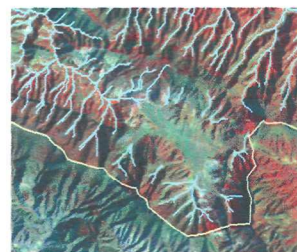
`Flowd` = *Grid* de Dirección del flujo

`Orden_h` = Nombre del campo donde se almacenarán los números que representen los órdenes de corriente.

Finalmente, sólo queda editar el *coverage* recién creado. Las líneas producidas representan los lugares por donde escurre el agua en las laderas, pero en zonas planas se obtienen líneas paralelas que nada tienen que ver con el drenaje real. Eso se considera un error y se recomienda eliminar (Figura 12a y 12b).



a)



b)

Figura 12. Producto del proceso de construcción de las líneas de escurrimiento.

- a) Sin editar, donde el algoritmo dibuja líneas paralelas cuando la topografía es plana
- b) Se eliminan estas líneas

Los pasos para la construcción del modelo hidrológico se muestran en el siguiente diagrama de flujo (Figura 13), de manera simplificada.

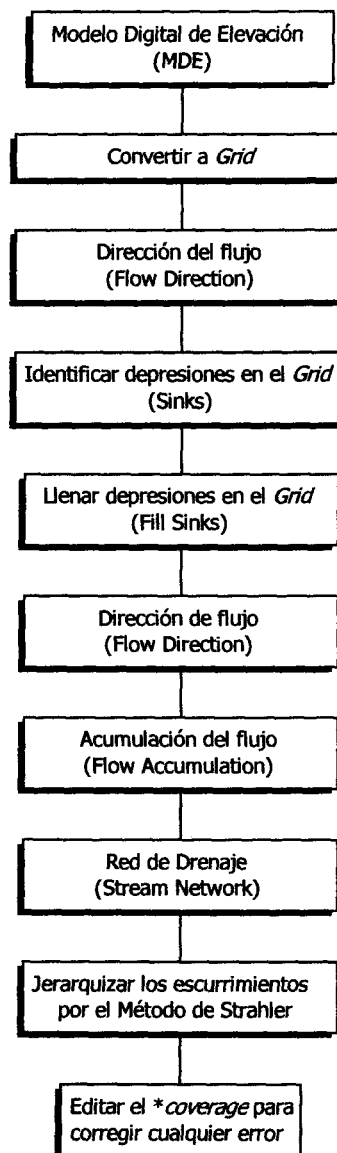


Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento empleado para la construcción del Modelo Hidrológico
**coverage*: capa de información en formato vector

2.2.3.6 Longitud de los cauces principales

Con base en la información que se ha producido, se crean los cauces principales dentro de las subcuencas. Para este propósito se utilizó **FLOWLENGTH**. Ya que esta función es un paso previo para determinar el tiempo de concentración, se requiere el coeficiente de rugosidad de Manning para el área (que se llamará **manning**), el cual se obtuvo a partir de la información de tipos de vegetación y los coeficientes de la Tabla 4 que se presentan a continuación.

Grid: flowl = FLOWLENGTH (Flowd, manning, upstream)

Tabla 4 . Coeficientes de rugosidad de Manning

Tipo de cobertura vegetal	coeficiente
Pastizales	0.20
Agricultura de riego y de temporal	0.12
Matorral micrófilo y rosetófilo	0.13
Chaparral, Bosques y matorral submontano	0.40
Suelos desnudos	0.025

Tomado de:ASCE ,1997.

A manera de breve resumen, la rugosidad de una superficie afecta las características del escurrimiento, ya sea que el agua se encuentre en la superficie de la cuenca o en el cauce. Es importante, ya que retarda el flujo del agua de lluvia en la superficie. En cuanto al escurrimiento superficial, una gran rugosidad retarda el escurrimiento e incrementa el potencial de infiltración. Velocidades menores asociadas con un incremento en la rugosidad disminuyen la cantidad de erosión. El coeficiente de rugosidad de Manning es ampliamente utilizado en la actualidad (McCuen, 1998).

2.2.4 Cálculo de Caudales Máximos

2.2.4.1 Construcción de curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno

La metodología que se empleó para la construcción de las curvas I-D-Tr es la descrita por Guerra (1999) que se encuentra en el Anexo III, y se describe a continuación.

El período de retorno se estableció en 20 años, debido al análisis efectuado en los eventos extraordinarios que se han presentado en la región en los últimos años (comunicación personal de D. Treviño, CNA, Gerencia Regional Río Bravo, 2000).

2.2.4.1.1 Alturas de Precipitación

Se utilizó la metodología de Cheng-Lung Chen (1993) para el cálculo de alturas de precipitación mayores o iguales a diez años de período de retorno, la cual se describe a continuación.

$$P_t^{Tr} = \frac{a * P_{60}^{10} * \log(10^{2-F} * T_r^{F-1}) * t}{60 (t+b)^c}$$

donde:

P_t^{Tr} = Altura de la precipitación en milímetros, para un período de retorno T_r y una duración de la tormenta "t"

T_r = Período de retorno en años

t = Duración de la tormenta en minutos

a, b, c = Parámetros regionales en función de cociente lluvia-duración R, que son a = 21.2861, b = 6.6421, c = 0.7, estimados por el Dr. Daniel F. Campos Aranda.

P_{60}^{10} = Altura de la precipitación en mm para un período de retorno de 10 años y una duración de 60 minutos:

$$P_{60}^{10} = \left[0.35 \ln(10) + 0.76 \right] \left[0.54 (0.60)^{0.25} - 0.5 \right] P_{60}^2$$

F = Cociente de lluvia-período de retorno

$$F = \frac{P_{100}^t}{P_{10}^t} = \frac{P_{1440}^{100}}{P_{1440}^{10}}$$

$$\frac{P_{1440}^{100}}{P_{1440}^{10}} = \frac{\beta - \frac{1}{\alpha} \operatorname{Ln} \left(\operatorname{Ln} \frac{100}{100-1} \right)}{\beta - \frac{1}{\alpha} \operatorname{Ln} \left(\operatorname{Ln} \frac{100}{10-1} \right)}$$

Donde:

P_{1440}^{100} = Altura de la precipitación en mm para un período de retorno de 100 años y una duración de la tormenta de 24 horas en minutos.

P_{1440}^{10} = Altura de la precipitación en mm para un período de retorno de 10 años y una duración de 24 horas en minutos

Los parámetros α y β se determinan a partir de la Distribución de Valores Extremos tipo I de Gumbel, que provee una distribución más aceptable a la información obtenida de las estaciones climatológicas de la cuenca. Se conocen como parámetros de ubicación y de forma, respectivamente, y se estiman de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\sigma y}{s}$$

$$\beta = \frac{\text{media} - \mu y}{\alpha}$$

σy = desviación estándar de la población

media = media aritmética de la población, y se obtiene mediante las fórmulas:

$$\text{media} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \text{media})^2}{n - 1}}$$

n = años de registro de las lluvias máximas en 24 horas y X_i es el i ésimo dato el registro

2.2.4.1.2 Intensidad de la precipitación

La lluvia se presenta en función del tiempo, así que la intensidad de la lluvia es directamente proporcional a la altura de la precipitación e inversamente proporcional al tiempo, por lo cual se define la intensidad de la lluvia "I" en mm/hr en la relación:

$$I_t^{Tr} = P_t^{Tr} / t'$$

donde:

I_t^{Tr} = Intensidad de la lluvia en milímetros/hora para un período de retorno (Tr) en años y una duración t' en horas

P_t^{Tr} = Altura de la precipitación en milímetros para un período de retorno (Tr) en años y una duración de la tormenta en milímetros

t' = Duración de la tormenta en horas

2.2.4.2 Interpolación de las intensidades de lluvia

Una vez calculada la intensidad de la precipitación para cada una de las estaciones climatológicas analizadas, se procede a interpolar los datos espacialmente mediante el método de Promedio de distancias inversas.

Este método toma en cuenta la distancia espacial entre los valores y el punto de interpolación. La estimación se obtiene a partir de los promedios de mayor peso de los valores vecinos. Los promedios de mayor peso son proporcionales a la inversa de estas distancias elevadas a una potencia. Estos pesos son fracciones que se normalizan de tal manera que la suma de todos los pesos es igual o equivalente a 1.0. (Collins, 2001). Se utiliza el *coverage* de puntos de las estaciones climatológicas y se crea un grid de interpolación de las intensidades de la lluvia (mm/hr) calculado en el paso anterior, el cual llamaremos **interpol**.

La fórmula típica para este método es:

$$W_i = 1/d_i^2$$

Donde:

d_i^2 = distancia entre Z_p y Z_i (Surfer, 1994).

2.2.4.3 Método Racional

Son hipótesis para su aplicación: cuencas pequeñas y la uniformidad espacial y temporal de la lluvia. Ya que el área de estudio se considera una cuenca grande, se recomienda dividir en subcuencas para obtener un cálculo más exacto.

La fórmula requiere la creación de un *grid* conteniendo los coeficientes de escurrimiento (**C**) contenidos en la Tabla 6, donde a partir de los *coverages* de uso de suelo y edafología (clases texturales) se determinaron los valores de coeficientes correspondientes.

Tabla 5 . Coeficientes de escurrimiento asociados a períodos de retorno menores de 25 años

Tipo de Uso de suelo	Textura		
	1	2	3
Bosques y matorrales (pendientes + 6%)	0.11	0.12	0.20
Pastizales (pendientes 0-2%)	0.12	0.34	0.30
Suelos desnudos *	0.40		
Zonas Agrícolas (pendientes 0-2%)	0.08	0.14	0.18

Tomado de McCuen, 1998.

*Tomado de Llamas, 1993.

La fórmula para estimar el caudal máximo es:

$$Q(\text{m}^3/\text{seg}) = C * I * A * K$$

Siendo:

I: intensidad de la lluvia (mm/hr)

C: coeficiente de escurrimiento (%)

A= área de la celda en km^2 , es decir, 2500 m^2 equivale a 0.0025 km^2

K= Coeficiente de ajuste 0.278, si A está en km^2

Tomado de Llamas, 1993.

Haciendo una operación algebraica en Grid, se multiplican los grids correspondientes para crear el caudal máximo por celda de acuerdo a la fórmula anterior.

```
Grid: caudal = C * interpol * 0.0025 * 0.278
```

Posteriormente, usando **FLOWACCUMULATION** se calcula el gasto máximo en la cuenca.

```
Grid: caudalf = FLOWACCUMULATION (Flowd, caudal)
```

El último paso es agregar estos valores al grid de STREAMNET creado anteriormente, y vectorizarlo.

```
Arc: copyinfo caudalf.vat caudalf.lut
```

```
Grid: escurr = slice (caudalf, table, caudalf.vat, value, value)
```

```
Grid: caudalg = con (streamnet > 0, value)
```

```
Grid: caudalc = streamline (caudalg, flowd, caudal)
```

Como se explicará en el siguiente capítulo, se compararon los caudales máximos que se obtuvieron a partir de los datos de 1975 y 1995, y se analizaron las diferencias, así como sus posibles causas.

2.3 Índice de Transformación de la cobertura vegetal

Para determinar los cambios de los diferentes tipos de vegetación por unidad de área, se utilizó el Índice de Transformación:

$$IT = \frac{\text{diferencia (has) 1975-1995}}{20 \text{ (años)}}$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

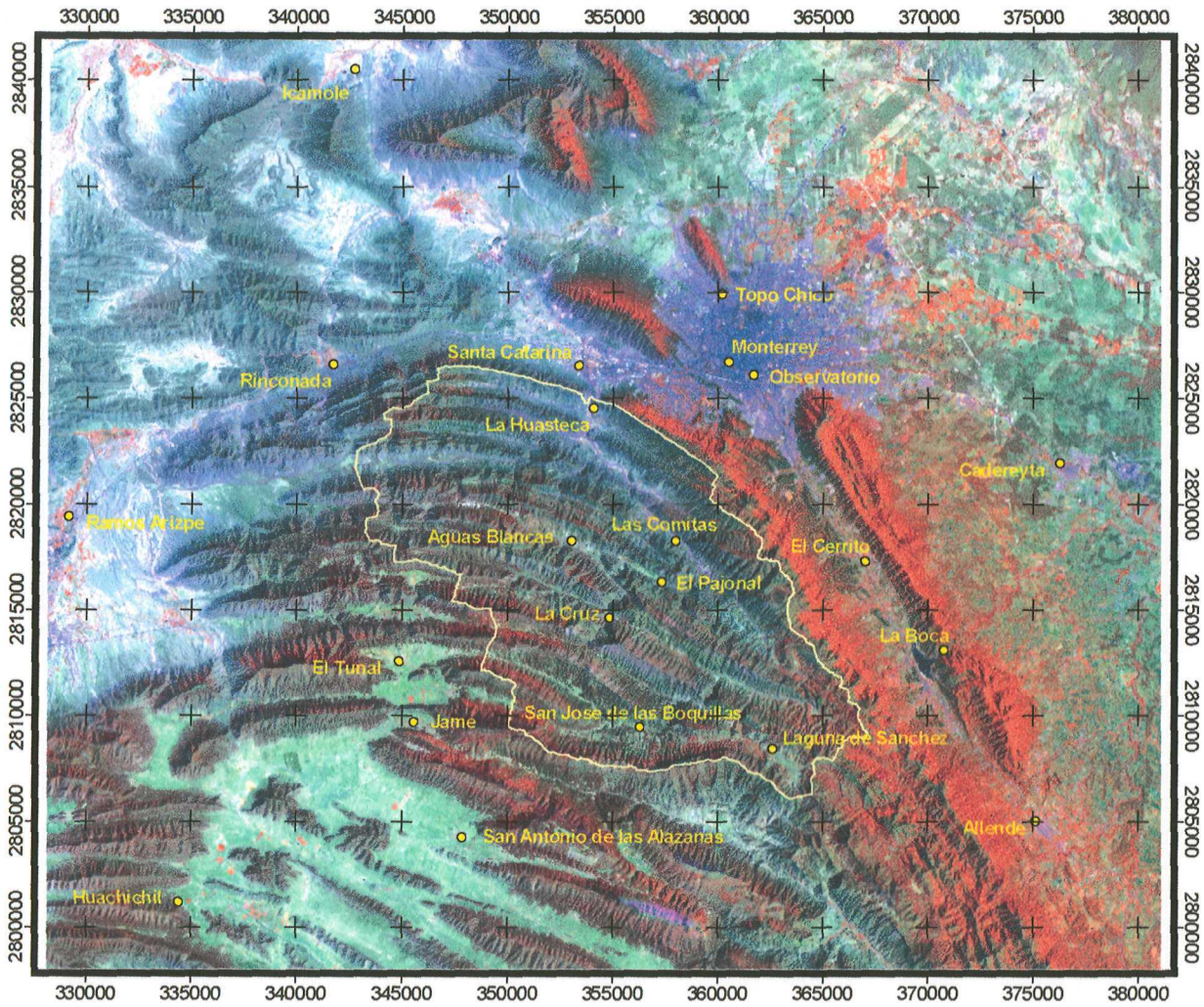
3.1 Estaciones climatológicas

Se recabaron datos de las estaciones que se encuentran localizadas dentro y fuera del área de estudio (Figura 14), cuyos datos principales, como localización geográfica en coordenadas utm, altura en metros sobre el nivel del mar, municipio, estado y período de registro, son especificados en la Tabla 6.

La estación Saltillo, ubicada al oeste, fue eliminada por presentar precipitaciones muy elevadas (incluso mayores que las demás), creando una sospecha en la precisión de los datos. La razón de esto es que la Sierra de Arteaga actúa como barrera para detener la humedad que proviene del Este y Sureste; es decir, del Golfo de México. Otras estaciones quedaron excluidas por estar fuera de funcionamiento, como Túnel de San Francisco, Cola de Caballo, Potrero Redondo, Adjuntas, La Puerta de la Casita, Rancho Cilantrillo y Potrero de Serna.

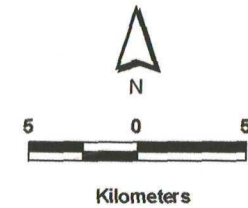
Se creó un *coverage* con las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) de cada estación, asignándole la siguiente proyección geográfica (todos los demás *coverages* tienen la misma proyección):

```
Arc: projectdefine cover estaciones
defineprojection
project: projection utm
project: datum nad27
project: zone 14
project: units meters
project: parameters
```

Simbología

- Limite del área de estudio
- Estaciones climatológicas



Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez



Figura 14 : Estaciones climatológicas utilizadas en el presente estudio.

Tabla 6. Lista de estaciones climatológicas, localización y período de registro (Comisión Nacional del Agua).

NOMBRE	COORDENADAS UTM		Altura m.s.n.m.	MUNICIPIO	ESTADO	PERIODO DE REGISTRO
	X	Y				
Monterrey	369275.06	2839458.5	545	Monterrey	Nuevo León	1960-1999
Santa Catarina	352581.75	2840329	700	Santa Catarina	Nuevo León	1960-1999
Topo Chico	366219.03	2847129	550	Monterrey	Nuevo León	1960-1996
La Huasteca	353931.86	2836305.00	720	Santa Catarina	Nuevo León	1976-1999
La Cruz	355499.09	2816413.5	1700	Santa Catarina	Nuevo León	1960-1999
Rinconada	328966.46	2840450	1000	García	Nuevo León	1960-1999
San José de las Boquillas	358436.36	2805949.74	1850	Santiago	Nuevo León	1988-1999
La Boca	387621.93	2813364	460	Santiago	Nuevo León	1947-1999
Las Comitas	361810.59	2823765	920	Santa Catarina	Nuevo León	1960-1995
El Pajonal	360563	2819751.5	1520	Santa Catarina	Nuevo León	1960-1997
El Cerrito	380075.27	2821798.87	510	Santiago	Nuevo León	1958-1999
Observatorio	366832.75	2840672.75	515	San Nicolás	Nuevo León	1977-1999
Icamole	330966.1	2868335.27	640	García	Nuevo León	1960-1999
Cadereyta	398574	2831056.75	330	Cadereyta	Nuevo León	1985-1999
Aguas Blancas	351887.40	2823710	2290	Santa Catarina	Nuevo León	1983-1999
Laguna de Sánchez	371131.84	2803917.25	1940	Santiago	Nuevo León	1960-1991
Allende	396127.11	2792624.05	474	Allende	Nuevo León	1968-1999
San Antonio de las Alazanas	341376.34	2795517.25	2190	Ramos Arizpe	Coahuila	1968-1999
Huachichil	314367.74	2789344.60	2100	Arteaga	Coahuila	1980-1999
Ramos Arizpe	303684	2825994.5	1400	Ramos Arizpe	Coahuila	1980-1999
El Tunal	335391.62	2812181.49	2260	Arteaga	Coahuila	1981-1999
Jame	336831.04	2806440.58	2280	Arteaga	Coahuila	1983-1999

3.2 Descripción Morfológica de la Subcuenca 24Bf "Monterrey"

3.2.1 Modelo Digital de Elevación

Se realizó el procedimiento descrito en el capítulo anterior para llenar las depresiones en el Modelo, y el resultado se presenta en la Figura 15. Las zonas más oscuras en la parte Sur-Suroeste de la subcuenca representan los puntos de mayor elevación de la Sierra de Arteaga (expresado en metros sobre el nivel del mar), y los sitios de color más claro son las partes bajas (representadas por los cauces de río más importantes), cercanas a la desembocadura principal.

La Tabla 7 resume los datos técnicos del Modelo Digital de Elevación que se utilizó.

Tabla 7. Datos técnicos del Modelo Digital de Elevación

Georreferenciado en coordenadas	UTM zona 14 (Universal Transversal Mercator)
Datum	NAD27 (México)
Nombre del esferoide	Clarke 1866
Coordenadas que delimitan la imagen	
Superior izquierda en X	299921.429000
Superior izquierda en y	2876064.844000
Inferior derecha en X	411321.429000
Inferior derecha en Y	2782864.844000
Tamaño del pixel en X	50 metros
Tamaño del pixel en Y	50 metros

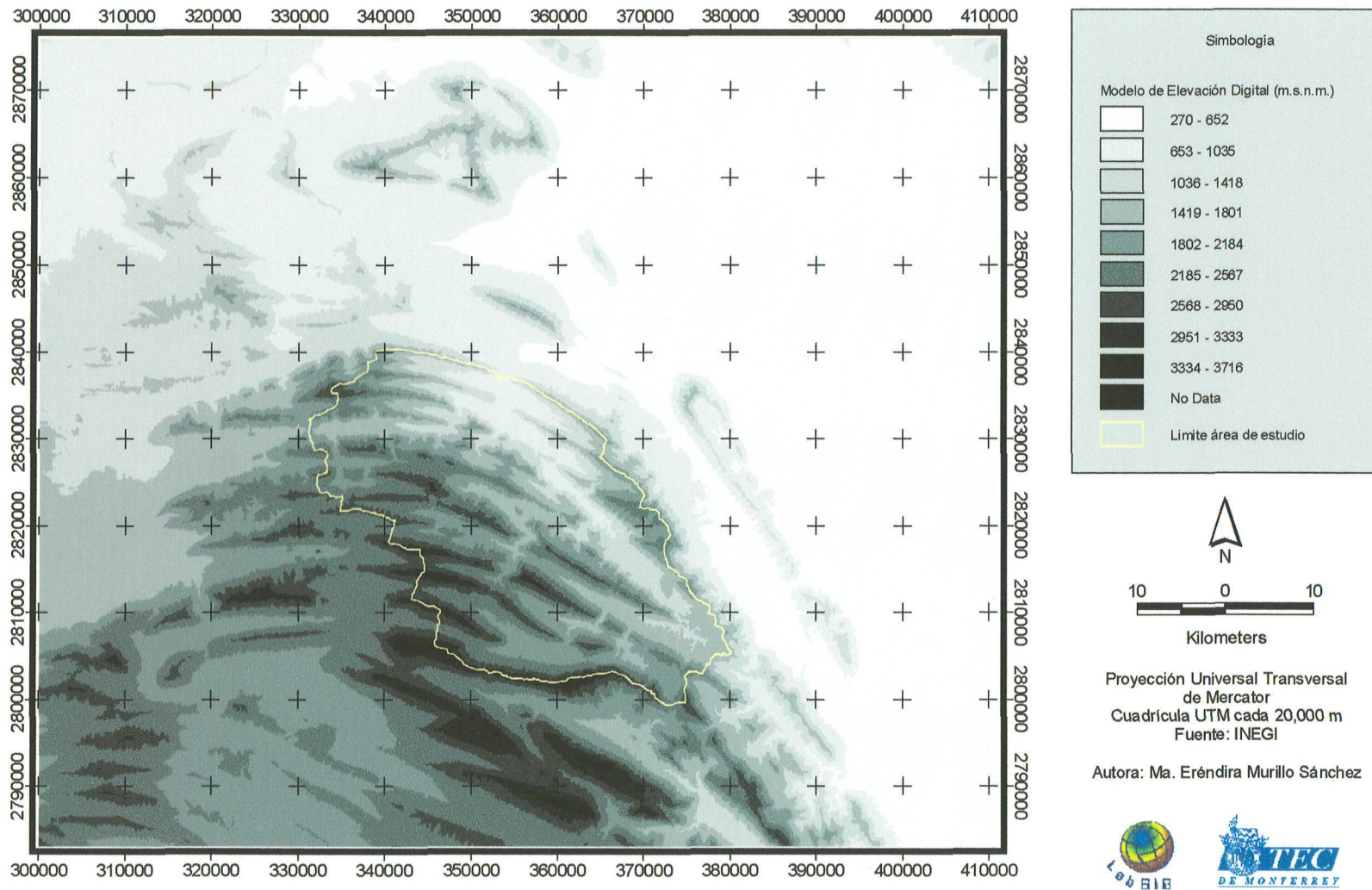


Figura 15. Modelo Digital de Elevación utilizado para construir el Modelo Hidrológico.

3.3 Resultados obtenidos del Modelo Hidrológico

3.3.1 Dirección y Acumulación del flujo

La dirección de los escurrimientos determinada por la pendiente se muestra en la Figura 16. La complejidad del área es obvia; sin embargo, hay características fácilmente distinguibles. Por ejemplo, en las sierras los parteaguas definen las principales direcciones de escurrimiento, que son Norte-Noreste y Sur-Suroeste. Así, se empiezan a trazar las rutas por donde el agua transita hasta llegar al punto de acumulación en los cauces (Figura 17). En este paso se observa ya la definición de los cauces principales y la desembocadura, que es el Cañón de la Huasteca.

3.3.2 Delimitación de las subcuencas

Una cuenca está definida como el área superficial de donde proviene el agua de lluvia acumulada en una tormenta y que se vierte en la desembocadura. Los límites de la cuenca son los puntos más alejados de donde proviene el agua de lluvia. Así, una cuenca está formada por varias subcuencas, cada una con su desembocadura (McCuen, 1998). En este caso, los parteaguas de las sierras marcan los límites entre ellas.

Adicionalmente se obtienen datos precisos de área y perímetro de cada subcuenca (Figura 18 y 19), concluyendo que la 7, 9, 12 y 14 son las de mayor dimensión.

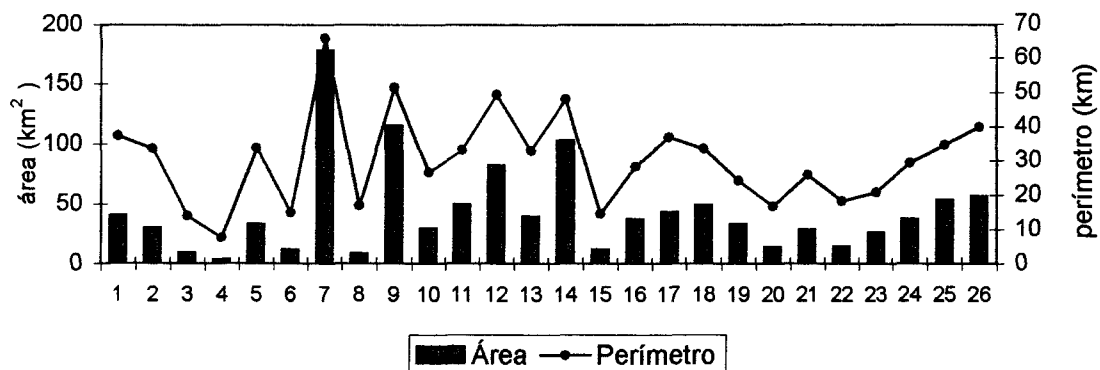
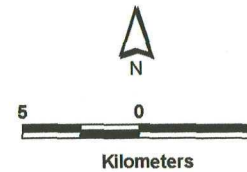
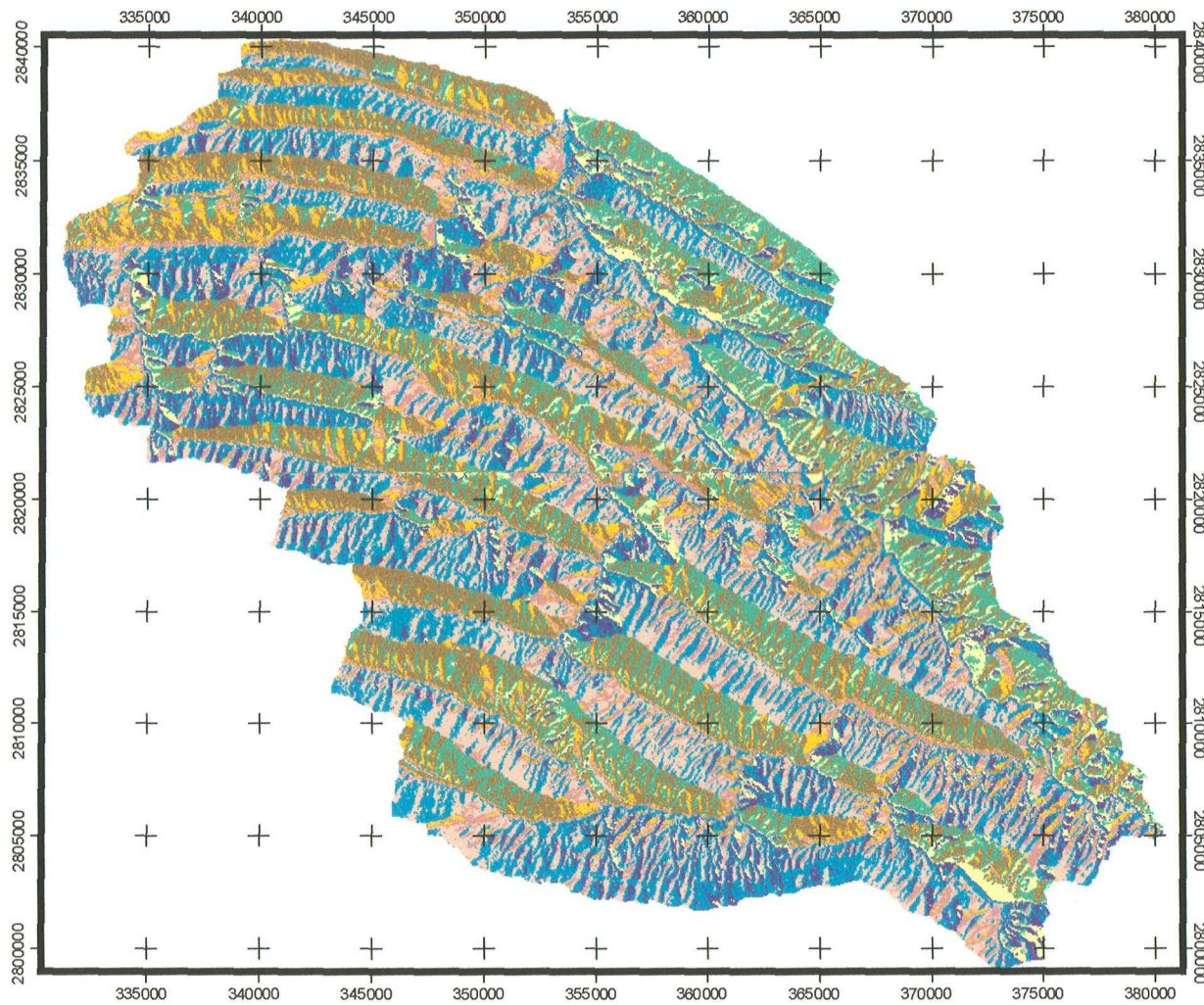


Figura 18. Área y perímetro por subcuenca

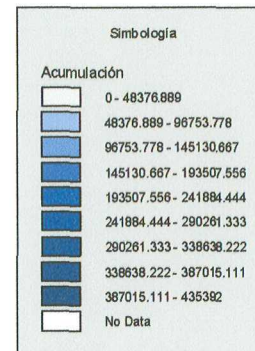
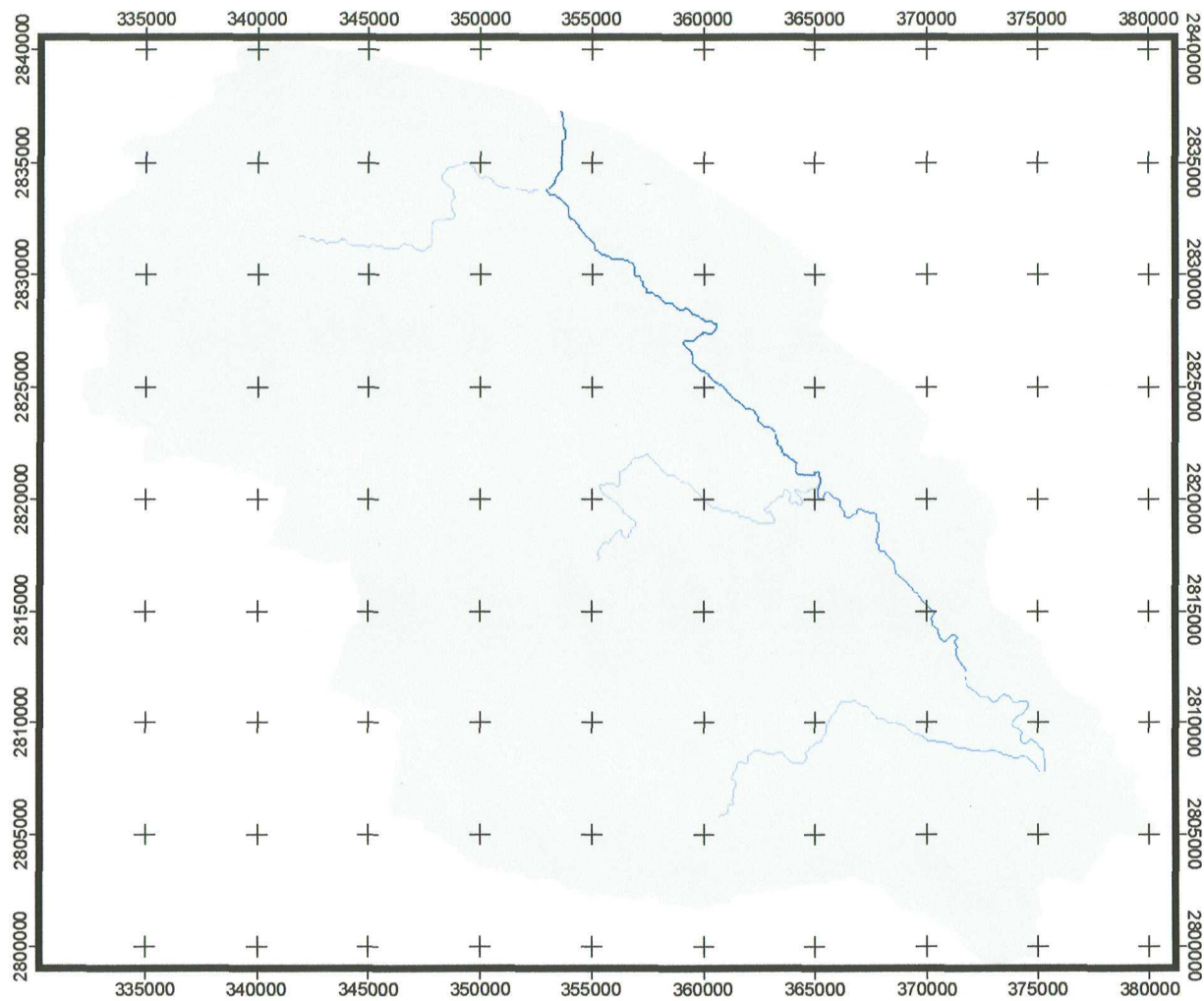


Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez



Figura 16. Dirección del escurrimiento de acuerdo al patrón topográfico.



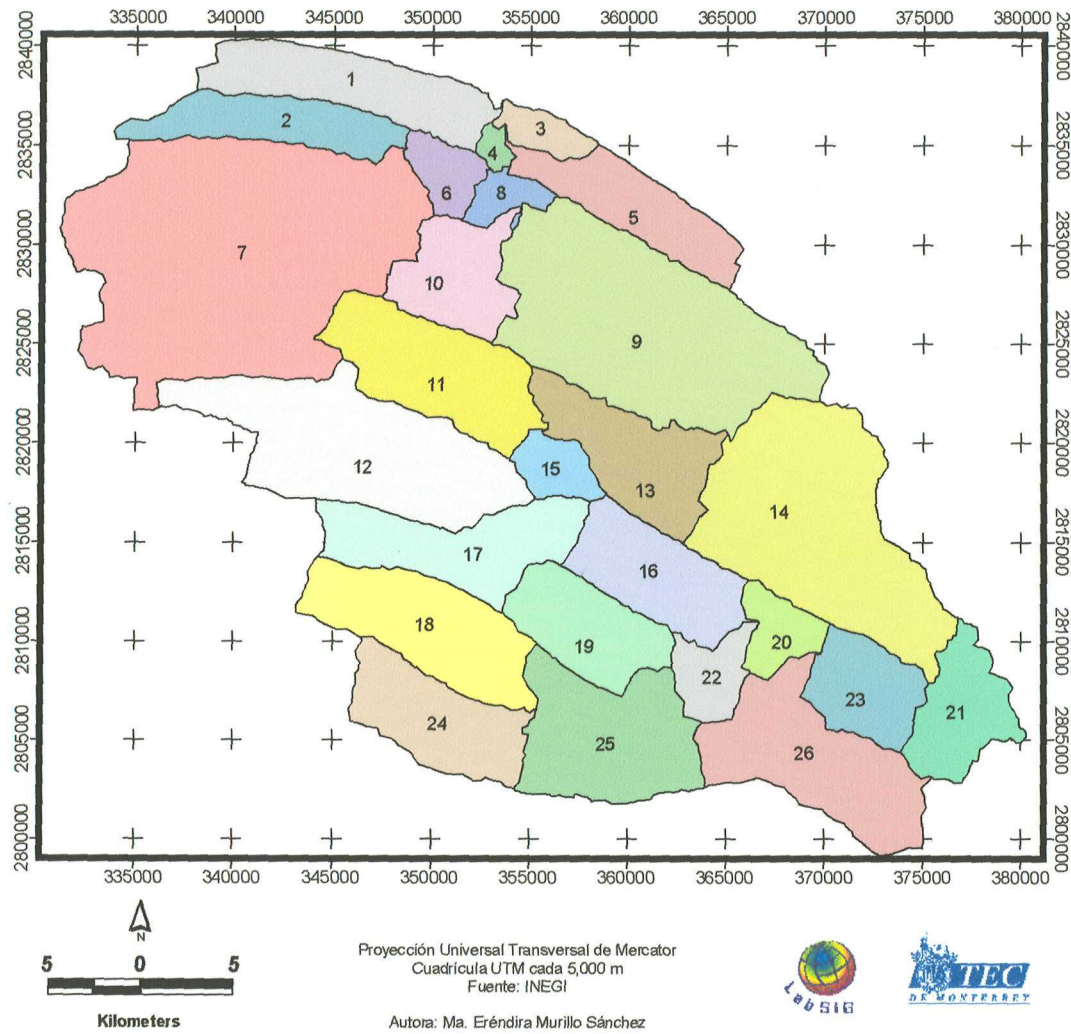
Kilometers

Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5.000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez



Figura 17. Sitios de mayor acumulación del flujo, determinado por el valor de las celdas del grid.



Subcuencas	Perímetro (Km)	Área (km2)
1	37.39	40.46
2	33.57	29.67
3	13.95	8.64
4	7.58	3.04
5	33.74	32.52
6	14.80	11.43
7	65.79	177.85
8	16.84	7.86
9	51.48	115.18
10	26.68	28.98
11	33.30	49.25
12	49.29	82.11
13	33.00	39.24
14	48.09	102.76
15	14.54	11.25
16	28.31	37.05
17	36.90	42.70
18	33.54	48.86
19	24.28	32.59
20	16.65	13.17
21	25.86	27.86
22	18.24	14.11
23	20.75	25.59
24	29.49	37.15
25	34.70	53.10
26	39.89	56.42

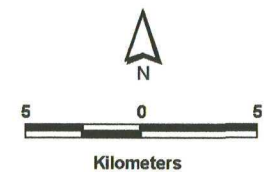
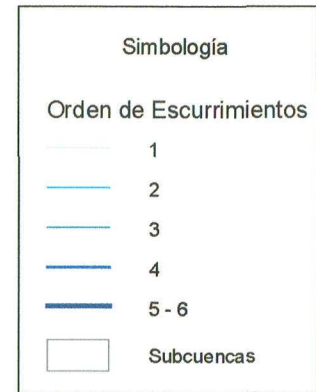
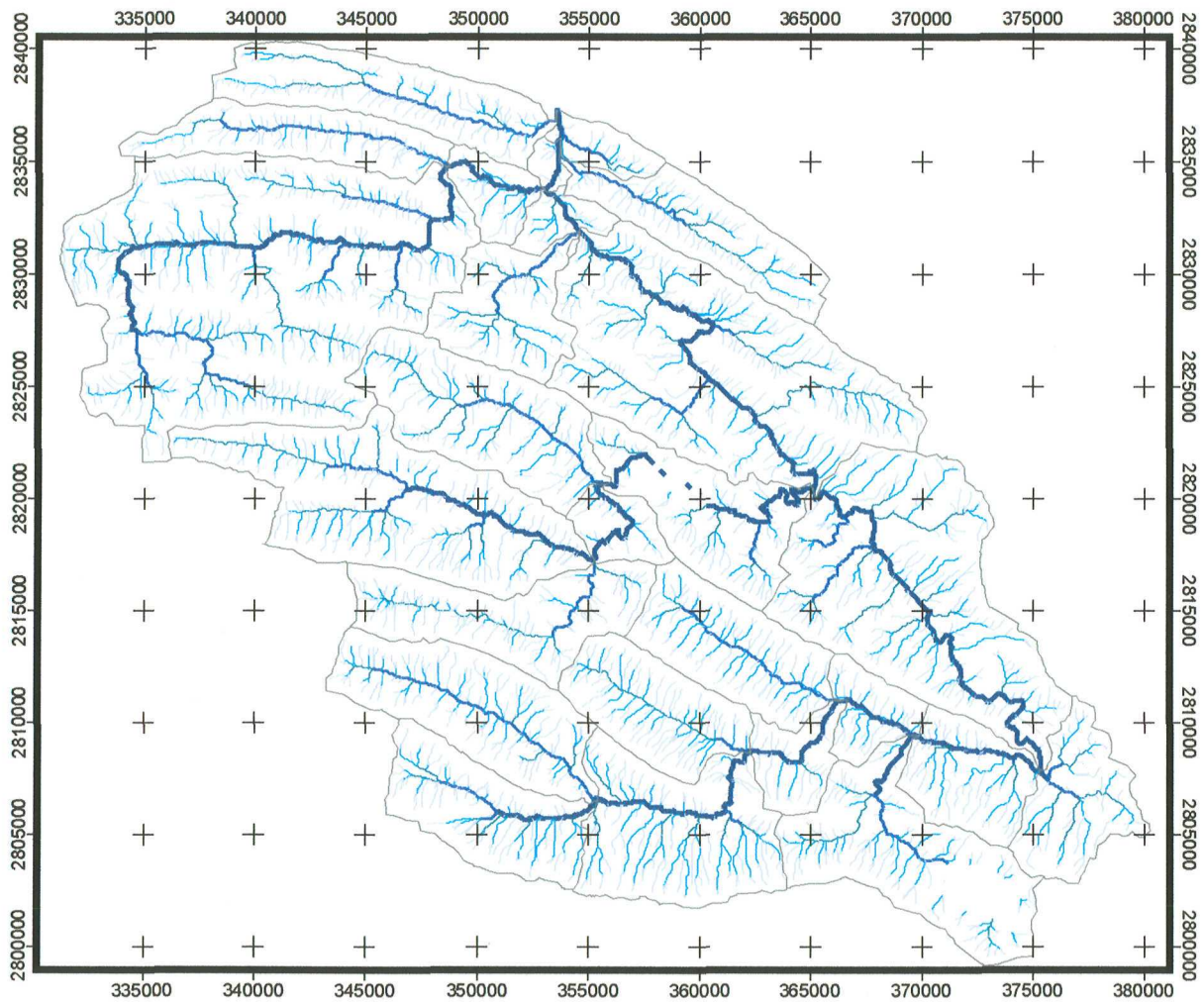
Figura 19. Subcuencas obtenidas, así como perímetro y área de cada una.

3.3.3 Red de Drenaje

La subcuenca presenta un patrón de drenaje dendrítico, caracterizado por numerosos y pequeños tributarios que se unen en ángulo recto a arroyos de mayor jerarquía, formando eventualmente los ríos más grandes. Los tributarios pequeños se presentan en cantidades suficientes, de modo que sólo una pequeña área superficial (unos cientos de metros) no alcanza a ser interceptada por algún arroyo definido (Viessman and Lewis, 1996).

La red de drenaje, así como la definición de los órdenes de corriente, se muestran en la Figura 20. Comparando este resultado con la imagen de satélite Landsat TM de 1993 (Figura 21), se puede observar en general una alta precisión en el trazado de las líneas, así como en la ubicación de las desembocaduras de cada subcuenca. Sin embargo se encontraron áreas muy pequeñas donde las líneas se interrumpen y posteriormente siguen su ruta normal, y esto se debe a que el Modelo Digital de Elevación está compuesto por varias imágenes unidas, pero estas uniones no son perfectas y generan imprecisiones en el resultado. Este problema, inherente en los Modelos Digitales de Elevación, se presenta constantemente.

Se utilizó el método de Strahler para jerarquizar los órdenes de corriente, en donde la longitud de cada corriente es indicada por su orden. Una corriente de primer orden es un tributario sin ramificaciones; una corriente de segundo orden es un tributario formado por una o más corrientes de primer orden, y así sucesivamente. El orden se incrementa sólo cuando corrientes del mismo orden se intersectan; por lo tanto, cuando corrientes de primer y segundo orden se encuentran, el resultado será uno de segundo orden, en vez de tercer orden (McCuen, 1998).



Proyección Universal Transversal de Mercator
 Cuadrícula UTM cada 5,000 m
 Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez



Figura 20. Órdenes de escurrimiento por subcuenca.

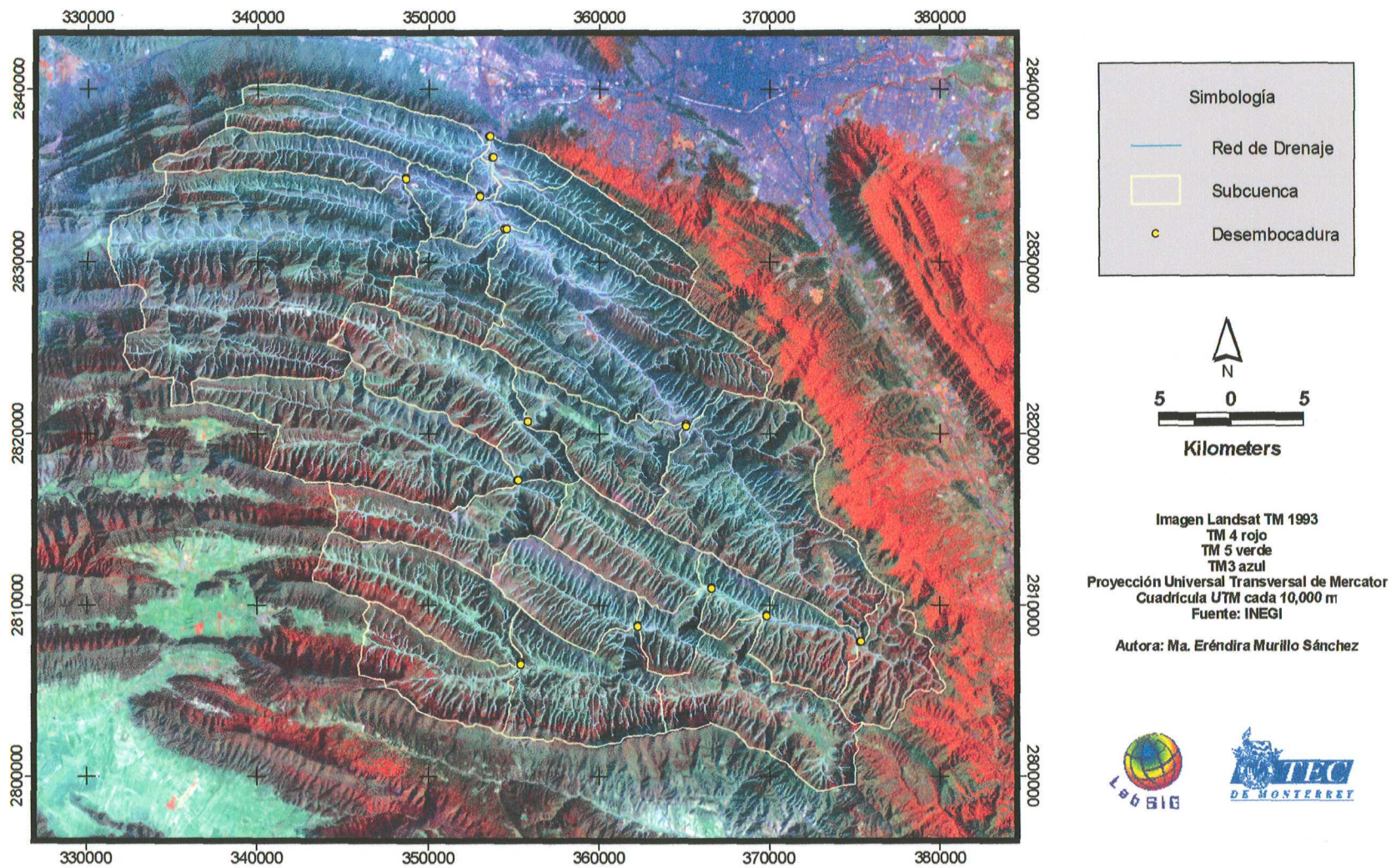


Figura 21. Comparación de los resultados obtenidos en la delineación de los escurrimientos con la imagen Landsat TM de 1993.

3.3.4 Longitud de los cauces

Se obtiene midiendo la distancia a lo largo del cauce principal desde la desembocadura hasta el final del mismo. Para obtener los cauces se usó el coeficiente de rugosidad de Manning (Figura 22), ya que -como se explicó en la metodología- la función **FLOWLENGTH** es un paso previo en Arc Info para la determinación del tiempo de concentración y requiere la rugosidad como dato de entrada. Así se obtuvieron las longitudes de los cauces por subcuenca (Figura 23 y 24). El cauce principal de la subcuenca G14-7f está conformado por los cauces de las subcuencas 3, 4, 8, 9, 14, 23, 20, 22, 25 y 18.

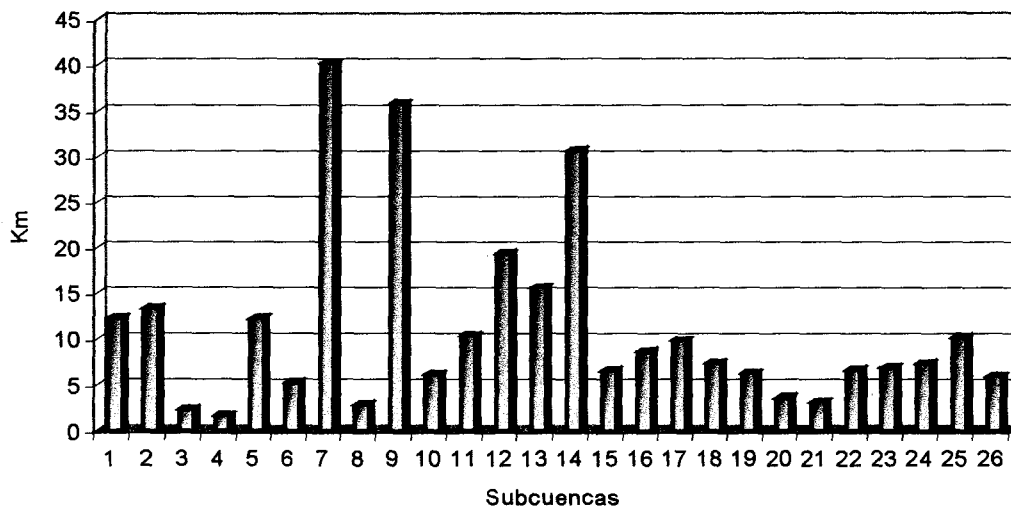


Figura 23. Longitudes de los cauces por subcuenca (km).

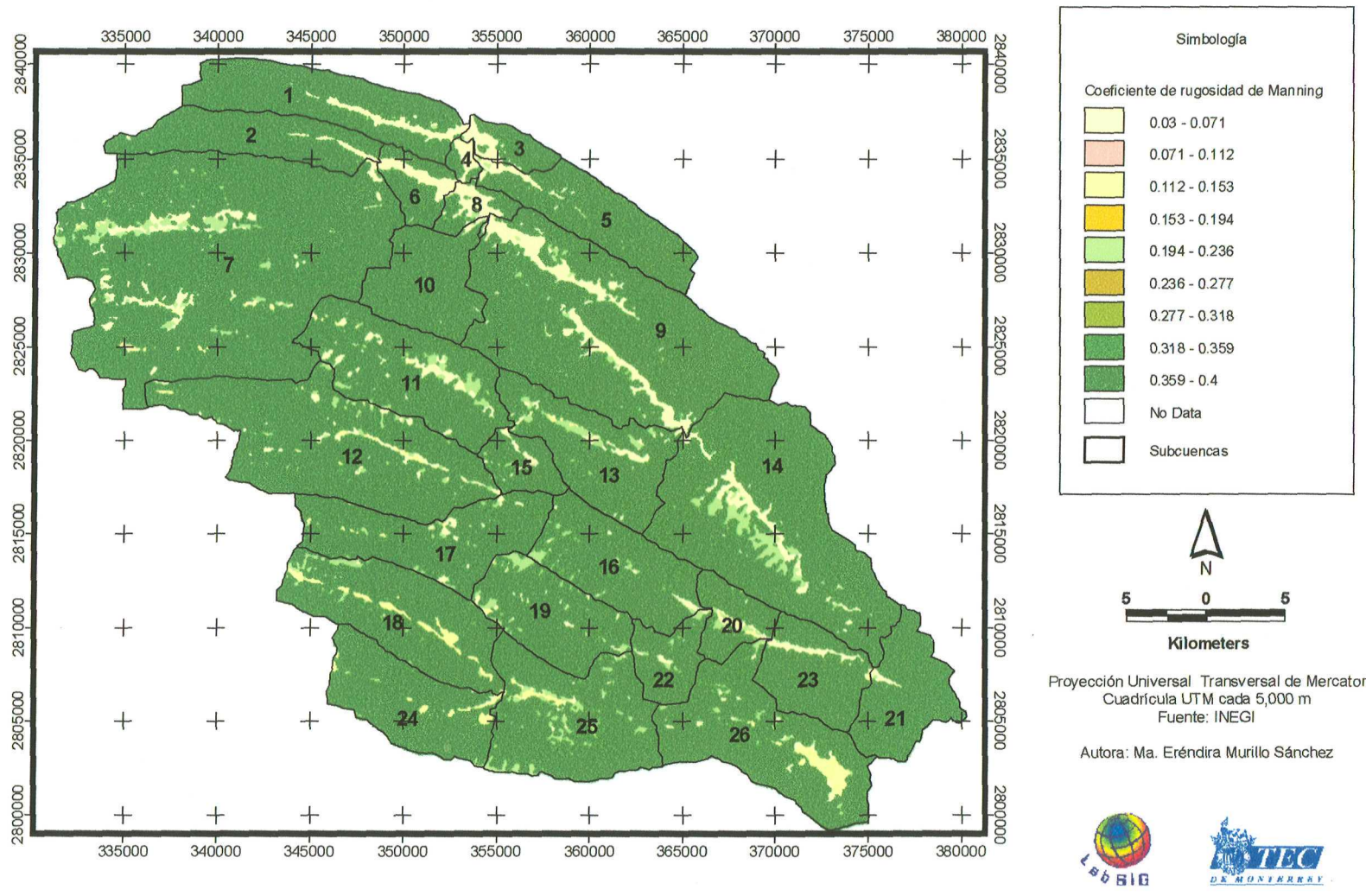
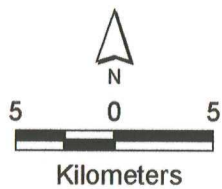
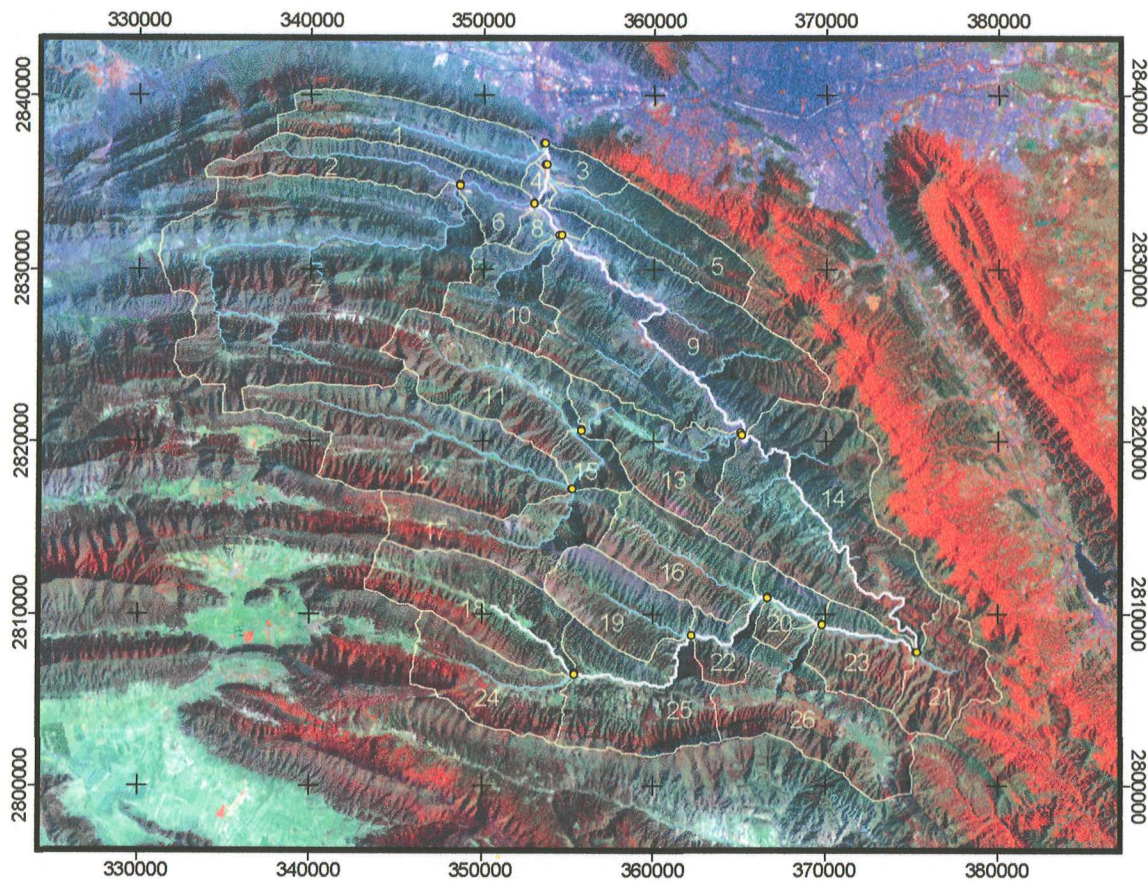


Figura 22. Coeficiente de rugosidad de Manning



Simbología	
	desembocadura
	cauce principal
	cauce secundario
	subcuenca

Imagen Landsat TM 1993
 TM 4 rojo
 TM 5 verde
 TM 3 azul
 Proyección Universal Transversal de Mercator
 Cuadrícula UTM cada 10,000 m
 Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez



Subcuenca	Longitud del Cauce principal (Km)
1	12.22
2	13.33
3	2.34
4	1.65
5	12.22
6	5.24
7	40.17
8	2.83
9	35.74
10	6.11
11	10.36
12	19.36
13	15.59
14	30.66
15	6.60
16	8.64
17	9.87
18	7.36
19	6.28
20	3.62
21	3.12
22	6.65
23	6.91
24	7.31
25	10.19
26	5.94

Figura 24. Longitud de los cauces por subcuenca (km)

Finalmente, en la Tabla 8 se da una breve descripción de las principales características morfométricas de la subcuenca.

Tabla 8. Características morfológicas de la subcuenca

Forma de la cuenca	elíptica
Tipo de cuenca	exorréica
Longitud del cauce principal	107.95 km
Area total de la cuenca	1128.84 km ²
Perímetro total	166.58 km
Longitud máxima	55.95 km
Pendiente media	54.28%
Elevación media	1935.98 m.s.n.m.
Orden de corriente	Sexto
Tiempo de concentración (Fórmula de Kirpich)	7.52 horas

3.4 Análisis de los Caudales Máximos

Desde un punto de vista técnico-económico, la correcta estimación de los caudales de máxima crecida es cada vez más importante para dimensionar correctamente sistemas de desagüe de obras civiles y reducir o evitar daños en cauces fluviales, zonas regables y núcleos urbanos. La existencia de un gran número de procedimientos de cálculo de crecidas, sin que ninguno de ellos se haya adoptado unánimemente, indica la magnitud y complejidad del problema. Lo anterior es consecuencia de la insuficiente extensión de las series hidrológicas, falta de garantía de los datos, irregularidad de los valores extremos, etc. (TRAGSATEC, 1998).

Algunos de estos métodos son los empíricos, los estadísticos y los modelos hidrológicos. La mayoría de las fórmulas empíricas son de aplicación muy simple, normalmente están relacionadas con la morfología de la cuenca, y en su mayor parte no atienden a estudios climáticos; son de ámbito regional, y por ello es necesario estudiar a priori si se pueden aplicar fuera del ámbito de donde proceden. Los métodos estadísticos serían los de mayor garantía para cuantificar el caudal máximo si no fuera porque en la mayoría de los casos no existen series lo suficientemente extensas para que puedan

Finalmente, en la Tabla 8 se da una breve descripción de las principales características morfométricas de la subcuenca.

Tabla 8. Características morfológicas de la subcuenca

Forma de la cuenca	elíptica
Tipo de cuenca	exorréica
Longitud del cauce principal	107.95 km
Area total de la cuenca	1128.84 km ²
Perímetro total	166.58 km
Longitud máxima	55.95 km
Pendiente media	54.28%
Elevación media	1935.98 m.s.n.m.
Orden de corriente	Sexto
Tiempo de concentración (Fórmula de Kirpich)	7.52 horas

3.4 Análisis de los Caudales Máximos

Desde un punto de vista técnico-económico, la correcta estimación de los caudales de máxima crecida es cada vez más importante para dimensionar correctamente sistemas de desagüe de obras civiles y reducir o evitar daños en cauces fluviales, zonas regables y núcleos urbanos. La existencia de un gran número de procedimientos de cálculo de crecidas, sin que ninguno de ellos se haya adoptado unánimemente, indica la magnitud y complejidad del problema. Lo anterior es consecuencia de la insuficiente extensión de las series hidrológicas, falta de garantía de los datos, irregularidad de los valores extremos, etc. (TRAGSATEC, 1998).

Algunos de estos métodos son los empíricos, los estadísticos y los modelos hidrológicos. La mayoría de las fórmulas empíricas son de aplicación muy simple, normalmente están relacionadas con la morfología de la cuenca, y en su mayor parte no atienden a estudios climáticos; son de ámbito regional, y por ello es necesario estudiar a priori si se pueden aplicar fuera del ámbito de donde proceden. Los métodos estadísticos serían los de mayor garantía para cuantificar el caudal máximo si no fuera porque en la mayoría de los casos no existen series lo suficientemente extensas para que puedan

resultar suficientemente representativas. Los modelos hidrológicos son los que tienen un mayor sentido físico e hidrológico, permitiendo estudiar aceptablemente el fenómeno de máxima crecida. Las características morfológicas descritas en la Tabla 8 son parte de los datos necesarios para la alimentación del modelo. Otros factores necesarios son la intensidad y la distribución espacial-temporal de las precipitaciones. Uno de los métodos más utilizados es el Método Racional, ya que sus parámetros tienen un claro sentido físico que favorece el control de los cálculos, y son susceptibles de adaptación para estudios regionales, lo cual facilita su aplicación en casos concretos (TRAGSATEC, 1998).

3.4.1 Precipitaciones máximas

Se obtuvieron los datos por estación climatológica (proporcionados por CNA) -algunas de las cuales se muestran en el Anexo II-, y se preparó una gráfica del comportamiento de la lluvia a través del tiempo. En la Figura 25 se muestran los máximos registros promediados de todas las estaciones climatológicas.

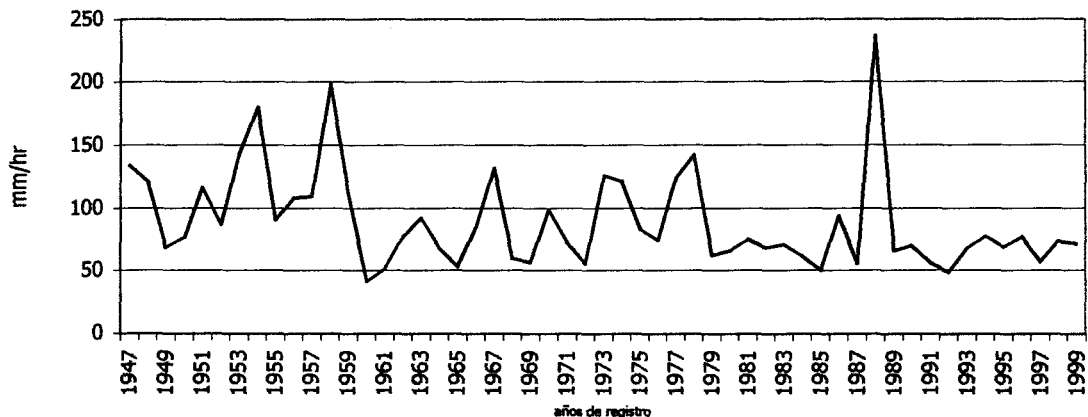


Figura 25. Precipitaciones máximas anuales (mm) de las estaciones climatológicas

Es claramente observable que los registros máximos concuerdan con la presencia de ciclones en el estado -ya sea con nivel de tormenta tropical, depresión tropical o huracán de cualquier categoría- mostradas anteriormente en la Figura 1. El registro máximo se presenta en 1988, con el huracán Gilberto.

resultar suficientemente representativas. Los modelos hidrológicos son los que tienen un mayor sentido físico e hidrológico, permitiendo estudiar aceptablemente el fenómeno de máxima crecida. Las características morfológicas descritas en la Tabla 8 son parte de los datos necesarios para la alimentación del modelo. Otros factores necesarios son la intensidad y la distribución espacial-temporal de las precipitaciones. Uno de los métodos más utilizados es el Método Racional, ya que sus parámetros tienen un claro sentido físico que favorece el control de los cálculos, y son susceptibles de adaptación para estudios regionales, lo cual facilita su aplicación en casos concretos (TRAGSATEC, 1998).

3.4.1 Precipitaciones máximas

Se obtuvieron los datos por estación climatológica (proporcionados por CNA) -algunas de las cuales se muestran en el Anexo II-, y se preparó una gráfica del comportamiento de la lluvia a través del tiempo. En la Figura 25 se muestran los máximos registros promediados de todas las estaciones climatológicas.

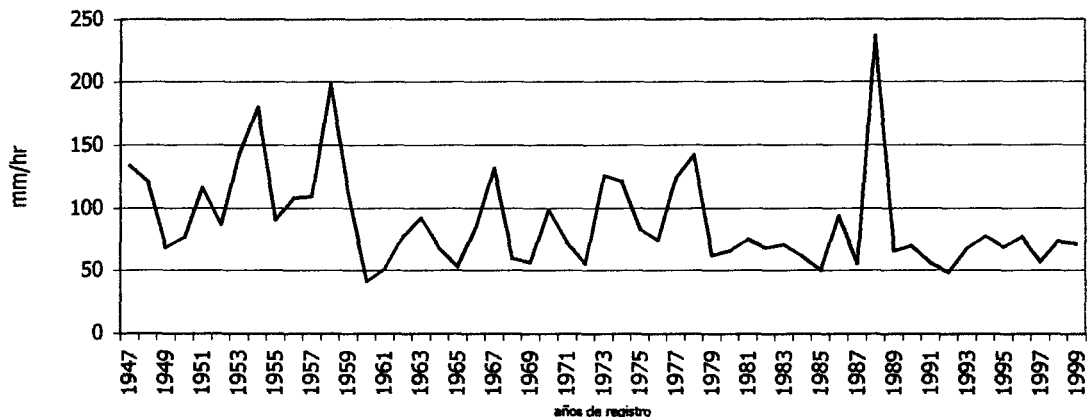


Figura 25. Precipitaciones máximas anuales (mm) de las estaciones climatológicas

Es claramente observable que los registros máximos concuerdan con la presencia de ciclones en el estado -ya sea con nivel de tormenta tropical, depresión tropical o huracán de cualquier categoría- mostradas anteriormente en la Figura 1. El registro máximo se presenta en 1988, con el huracán Gilberto.

3.4.2. Curvas I-D-Tr

Algunos problemas de planeación y diseño hidrológico sólo requieren la estimación del volumen de precipitación. Sin embargo, para propósitos de análisis y diseño hidrológico se requiere obtener la distribución de la lluvia a través del tiempo. Esto es llamado un Hidrograma (Mc Cuen, 1998).

Las tormentas se separan en dos grupos: tormentas actuales y de diseño. El análisis de precipitaciones está basado en las tormentas actuales. Las mediciones durante eventos de tormentas actuales se registran como series de alturas de precipitación que ocurrieron durante intervalos conocidos de tiempo. Casi todos los diseños hidrológicos están basados en lo que se llama tormentas de diseño, que es un hidrograma de la precipitación con características preseleccionadas. Una tormenta de diseño no es en realidad un evento de tormenta registrado; de hecho, una tormenta real idéntica a la tormenta de diseño nunca ha ocurrido, y es poco probable que ocurra. Sin embargo, la mayoría de las tormentas de diseño tienen características que son el promedio de las características de las tormentas que ocurrieron en el pasado, y por lo tanto, de las que ocurrirán en el futuro (Mc Cuen, 1998).

Las siguientes tres características son muy importantes en el análisis y diseño hidrológico:

- a) Duración: La longitud de tiempo en que ocurre la lluvia
- b) Volumen: La cantidad de precipitación durante la tormenta. Está relacionada con la altura (volumen= altura x área de la subcuenca)
- c) Frecuencia: La frecuencia de ocurrencia de eventos que tienen el mismo volumen y duración. Está asociada a un período de retorno, que es la longitud de tiempo promedio entre eventos que tienen la misma altura y duración.
- d) Intensidad: Tasa temporal de la precipitación; es decir, profundidad por unidad de tiempo

(Chow, et al. 1994)

Con estas características determinadas se construye un hidrograma de curvas altura-duración-período de retorno, así como de intensidad-duración-período de retorno, que representan una lluvia o tormenta de diseño específica para una zona; en este caso, la subcuenca.

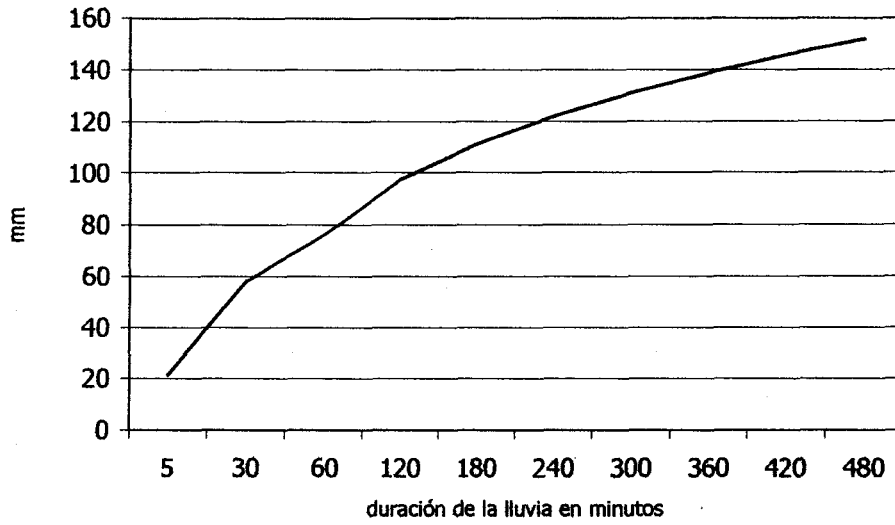
Se construyeron curvas I-D-Tr para cada una de las estaciones climatológicas (Tabla 9 y 10, y Figuras 26 y 27) utilizando un período de retorno único de 20 años, ya que es el período estimado para huracanes de categoría similar al Gilberto para el estado de Nuevo León (comunicación personal del Ing. Doroteo Treviño, Unidad de Hidrometeorología, Subgerencia Técnica, Gerencia Regional Río Bravo), que son los que producen escurrimientos de grandes proporciones en la cuenca.

Tabla 9. Alturas de precipitación (mm) para un período de retorno de 20 años

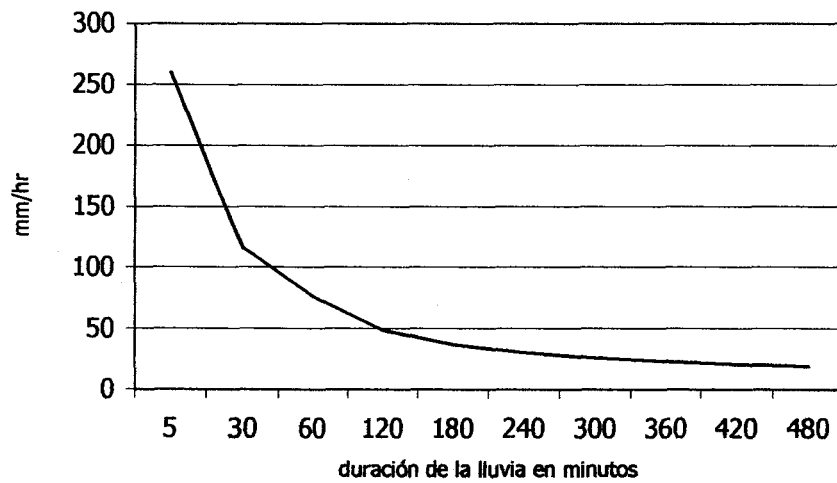
ESTACIONES	Duración en minutos									
	5	30	60	120	180	240	300	360	420	480
El Cerrito	21.55	57.94	76.24	97.28	111.24	122.00	130.96	138.66	145.53	151.68
Allende	22.32	60.02	78.98	100.78	115.23	126.40	135.66	143.64	150.71	157.12
Icamole	7.59	20.40	26.84	34.26	39.15	42.96	46.11	48.84	51.24	53.36
El Pajonal	11.46	30.80	40.53	51.72	59.13	64.88	69.62	73.74	77.35	80.64
Las Comitas	9.20	24.74	32.55	41.54	47.49	52.08	55.91	59.22	62.09	64.72
La Boca	26.10	70.19	92.36	117.84	134.76	147.80	158.65	168.00	176.26	183.68
San José de las B.	10.20	27.43	36.09	46.04	52.65	57.76	61.99	65.64	68.88	71.76
Rinconada	5.24	14.10	18.55	23.66	27.06	29.68	31.86	33.72	35.42	36.88
La Cruz	9.95	26.75	35.19	44.90	51.36	56.32	60.45	64.02	67.20	70.00
La Huasteca	11.53	31.00	40.80	52.06	59.52	65.28	70.08	74.22	77.84	81.12
Topo Chico	15.43	41.50	54.60	69.68	79.65	87.40	93.79	99.30	104.23	108.64
Santa Catarina	14.64	39.36	51.80	66.10	75.57	82.88	88.97	94.20	98.84	103.04
Monterrey	17.35	46.65	61.38	78.32	89.55	98.24	105.44	111.66	117.11	122.08
Laguna de Sánchez	13.34	35.88	47.21	60.24	68.88	75.56	81.10	85.86	90.09	93.92
Observatorio	15.28	41.09	54.07	69.00	78.90	86.52	92.88	98.34	103.18	107.52
Ramos Arizpe	7.47	20.09	26.44	33.74	38.58	42.32	45.41	48.06	50.47	52.56
Huachichil	10.23	27.50	36.19	46.18	52.80	57.92	62.16	65.82	69.09	72.00
Jame	7.32	19.69	25.91	33.06	37.80	41.48	44.51	47.10	49.42	51.52
El Tunal	5.38	14.46	19.03	24.28	27.75	30.44	32.69	34.62	36.33	37.84
San Antonio de las A.	22.87	61.51	80.93	103.26	118.08	129.52	139.02	147.18	154.42	160.96
Cadereyta	18.10	48.67	64.04	81.72	93.42	102.48	110.00	116.46	123.48	127.36
Aguas Blancas	6.78	18.24	24.00	30.62	35.01	38.40	41.22	43.62	45.78	47.76

Tabla 10. Intensidad de precipitación (mm/hr) para un período de retorno de 20 años

ESTACIONES	Duración en minutos									
	5	30	60	120	180	240	300	360	420	480
El Cerrito	259.61	115.88	76.24	48.64	37.08	30.50	26.19	23.11	20.79	18.96
Allende	268.93	120.04	78.98	50.39	38.41	31.60	27.13	23.94	21.53	19.64
Icamole	91.40	40.80	26.84	17.13	13.05	10.74	9.22	8.14	7.32	6.67
El Pajonal	138.01	61.61	40.53	25.86	19.71	16.22	13.92	12.29	11.05	10.08
Las Comitas	110.84	49.48	32.55	20.77	15.83	13.02	11.18	9.87	8.87	8.09
La Boca	314.50	140.38	92.36	58.92	44.92	36.95	31.73	28.00	25.18	22.96
San José de las B.	122.88	54.85	36.09	23.02	17.55	14.44	12.40	10.94	9.84	8.97
Rinconada	63.17	28.20	18.55	11.83	9.02	7.42	6.37	5.62	5.06	4.61
La Cruz	119.84	53.49	35.19	22.45	17.12	14.08	12.09	10.67	9.60	8.75
La Huasteca	138.92	62.01	40.80	26.03	19.84	16.32	14.02	12.37	11.12	10.14
Topo Chico	185.94	83.00	54.60	34.84	26.55	21.85	18.76	16.55	14.89	13.58
Santa Catarina	176.37	78.73	51.80	33.05	25.19	20.72	17.79	15.70	14.12	12.88
Monterrey	209.02	93.30	61.38	39.16	29.85	24.56	21.09	18.61	16.73	15.26
Laguna de Sánchez	160.77	71.76	47.21	30.12	22.96	18.89	16.22	14.31	12.87	11.74
Observatorio	184.12	82.19	54.07	34.50	26.30	21.63	18.58	16.39	14.74	13.44
Ramos Arizpe	90.02	40.18	26.44	16.87	12.86	10.58	9.08	8.01	7.21	6.57
Huachichil	123.23	55.00	36.19	23.09	17.60	14.48	12.43	10.97	9.87	9.00
Jame	88.23	39.38	25.91	16.53	12.60	10.37	8.90	7.85	7.06	6.44
El Tunal	64.80	28.93	19.03	12.14	9.25	7.61	6.54	5.77	5.19	4.73
San Antonio de las A.	275.59	123.02	80.93	51.63	39.36	32.38	27.80	24.53	22.06	20.12
Cadereyta	218.07	97.34	64.04	40.86	31.14	25.62	22.00	19.41	17.64	15.92
Aguas Blancas	81.71	36.48	24.00	15.31	11.67	9.60	8.24	7.27	6.54	5.97



Figuras 26. Altura de la precipitación (mm) para un período de retorno de 20 años.
Estación: El Cerrito.



Figuras 27. Intensidad de la precipitación (mm/hr) para un período de retorno de 20 años.
Estación: El Cerrito

En las gráficas anteriores se puede observar que la altura de la precipitación aumenta a medida que transurre el tiempo; lo contrario sucede con la intensidad, que disminuye hasta llegar al último intervalo. Este es un comportamiento común en las tormentas de diseño. Las demás estaciones presentan el mismo patrón gráfico, y por eso son omitidas.

3.4.3 Interpolación de la intensidad de la precipitación

En el *coverage* de **estaciones** se integraron las intensidades de precipitación durante los primeros 5 minutos y se interpolaron los datos (Figura 28). Se utilizó el Método de las Distancias Inversas Promediadas (Inverse Distance Weighted), comúnmente utilizado para interpolar datos climatológicos (Legates and Willmont, 1990) por ser un método sencillo y efectivo. Es necesario especificar que, en general, cualquier método es aceptable a medida que la precisión, densidad, distribución y variabilidad espacial de los datos es mayor (Collins, 2001).

Las subcuencas que mayor intensidad de lluvia presentan son la 14, 21, 23, y 26; y en menor proporción, la 3, 4, 5, 6, 8 y 13 (Figura 29). Los valores de las demás son muy bajos en proporción. Esto se debe a que las precipitaciones producidas por las tormentas de verano provenientes del Golfo de México son detenidas por la Sierra Madre Oriental, disminuyendo su magnitud e intensidad a medida que avanza el meteoro. Así, las mayores intensidades se dan en las subcuencas localizadas al Este, Sureste, Noreste y Norte.

En el Anexo IV se describen detalladamente los datos obtenidos por subcuenca.

En las gráficas anteriores se puede observar que la altura de la precipitación aumenta a medida que transurre el tiempo; lo contrario sucede con la intensidad, que disminuye hasta llegar al último intervalo. Este es un comportamiento común en las tormentas de diseño. Las demás estaciones presentan el mismo patrón gráfico, y por eso son omitidas.

3.4.3 Interpolación de la intensidad de la precipitación

En el *coverage* de **estaciones** se integraron las intensidades de precipitación durante los primeros 5 minutos y se interpolaron los datos (Figura 28). Se utilizó el Método de las Distancias Inversas Promediadas (Inverse Distance Weighted), comúnmente utilizado para interpolar datos climatológicos (Legates and Willmont, 1990) por ser un método sencillo y efectivo. Es necesario especificar que, en general, cualquier método es aceptable a medida que la precisión, densidad, distribución y variabilidad espacial de los datos es mayor (Collins, 2001).

Las subcuencas que mayor intensidad de lluvia presentan son la 14, 21, 23, y 26; y en menor proporción, la 3, 4, 5, 6, 8 y 13 (Figura 29). Los valores de las demás son muy bajos en proporción. Esto se debe a que las precipitaciones producidas por las tormentas de verano provenientes del Golfo de México son detenidas por la Sierra Madre Oriental, disminuyendo su magnitud e intensidad a medida que avanza el meteoro. Así, las mayores intensidades se dan en las subcuencas localizadas al Este, Sureste, Noreste y Norte.

En el Anexo IV se describen detalladamente los datos obtenidos por subcuenca.

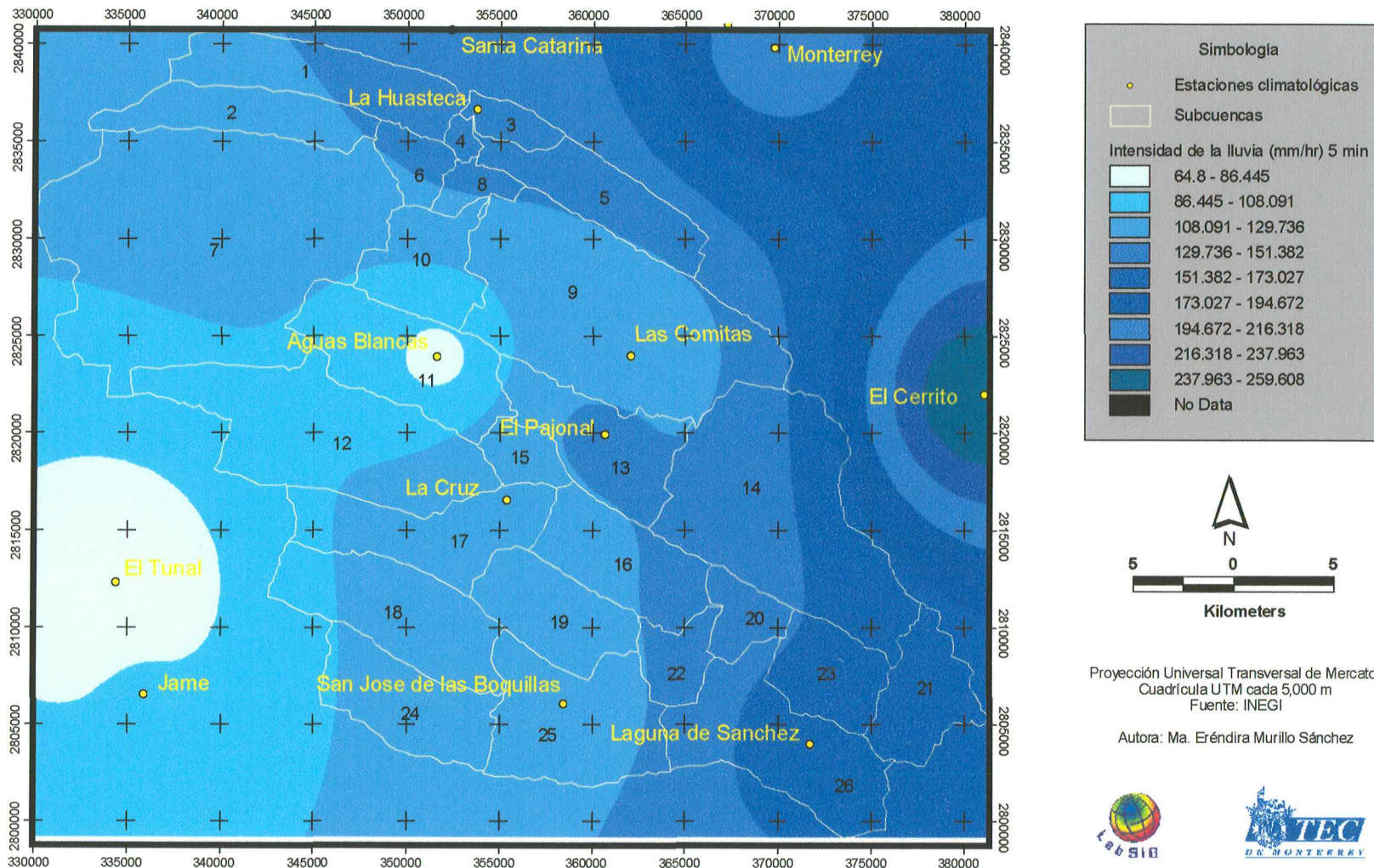


Figura 28. Interpolación de la intensidad de la lluvia (mm/hr) para una duración de 5 minutos y un período de retorno $T_r = 20$ años

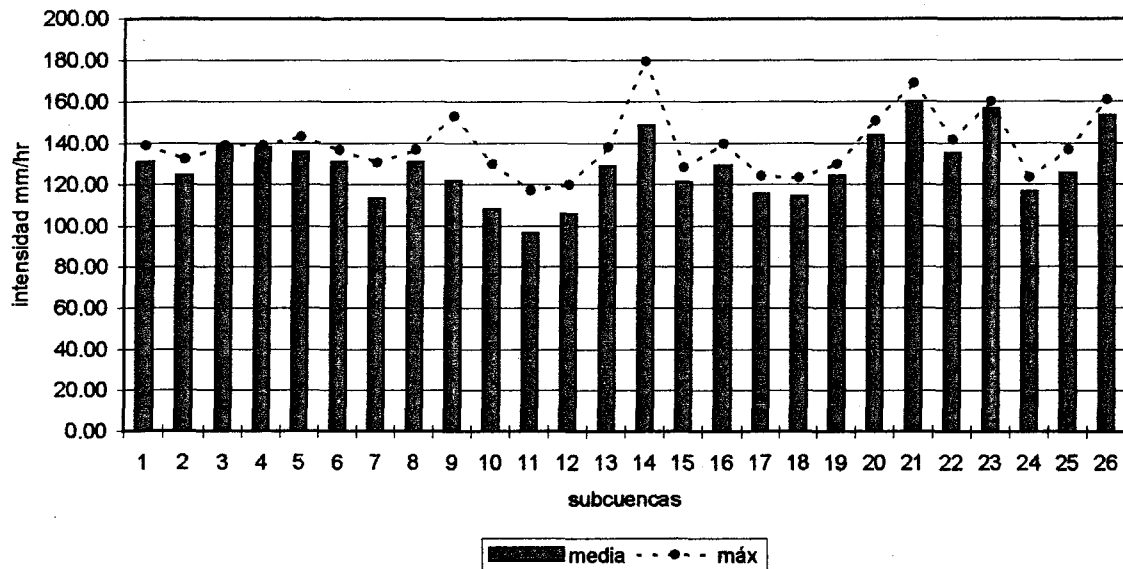


Figura 29. Media y datos máximos de la intensidad de la lluvia por subcuenca, para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.

3.4.5 Uso del suelo

En los mapas de uso del suelo de 1975 y 1995 (Figuras 30 y 31) se puede observar que, en general, las áreas comprendidas por Bosques y Matorrales ocupan la mayor parte. Las diferencias entre ambos mapas se muestran en la Tabla 11 y en la Figura 32, donde hay una disminución de la vegetación primaria (Bosques y Matorral Submontano) mientras el Chaparral aumenta de manera significativa, lo cual indica un disturbio. El Matorral Desértico Rosetófilo, Pastizal y Zonas Agrícolas no cambian significativamente. Finalmente, el Matorral Desértico Micrófilo presenta un ligero aumento que, en proporción con el área, no es importante. Más adelante se explicarán en profundidad éstos cambios y cómo afectan el escurrimiento.

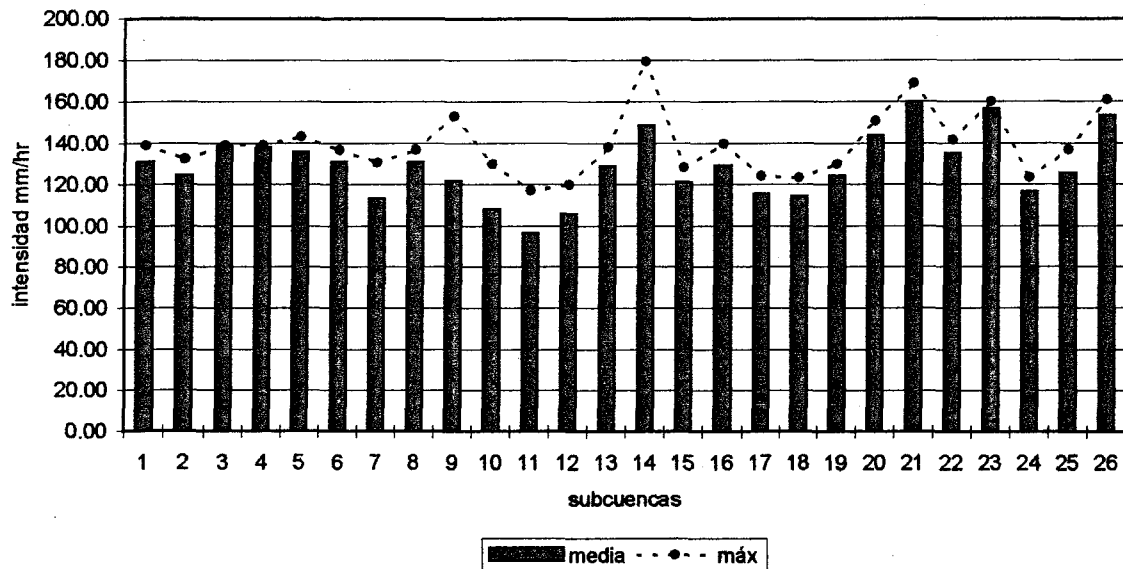
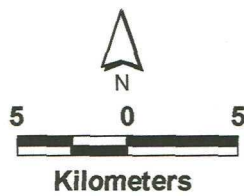
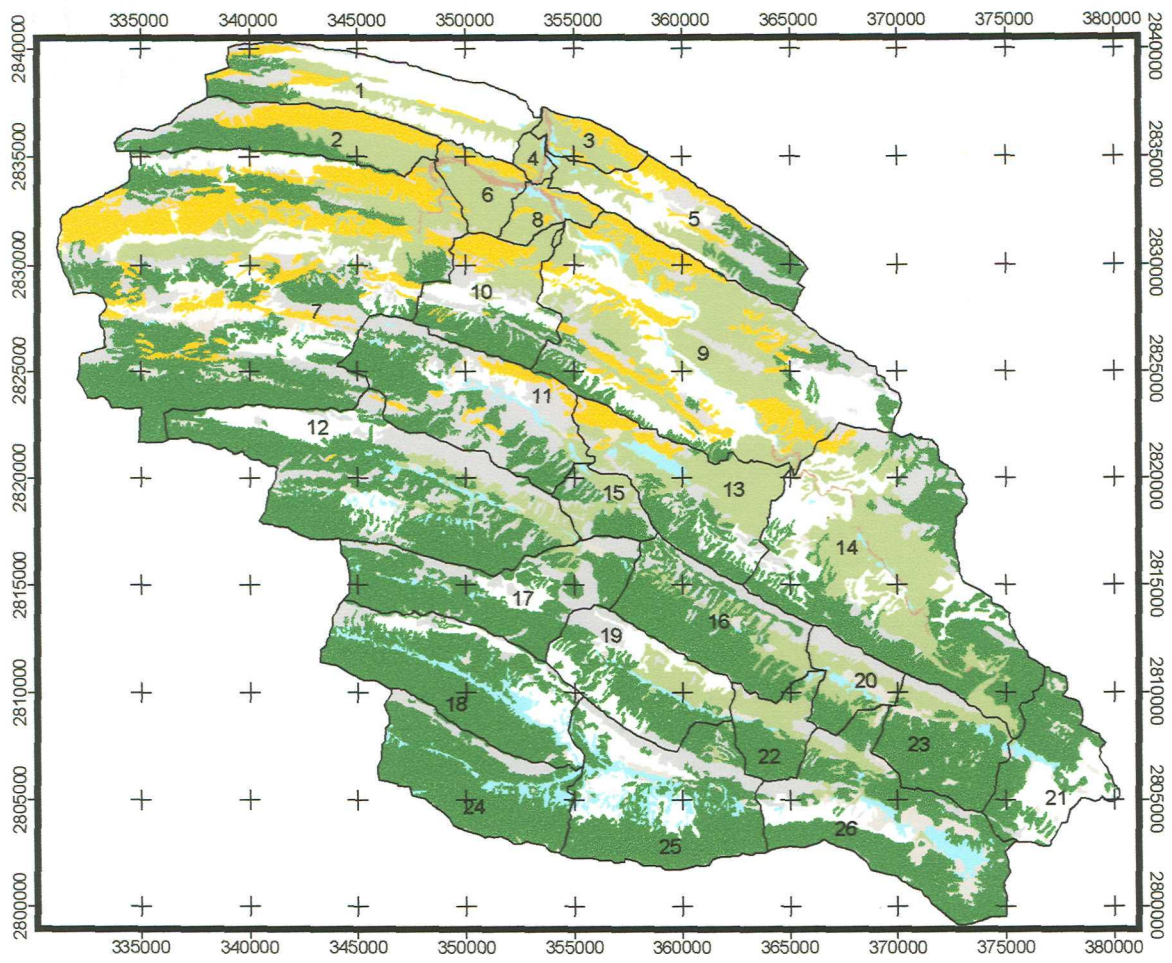


Figura 29. Media y datos máximos de la intensidad de la lluvia por subcuenca, para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.

3.4.5 Uso del suelo

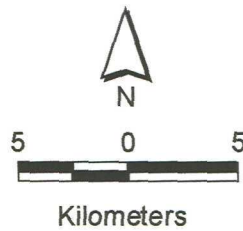
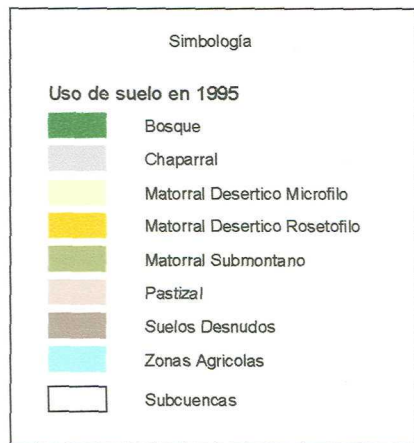
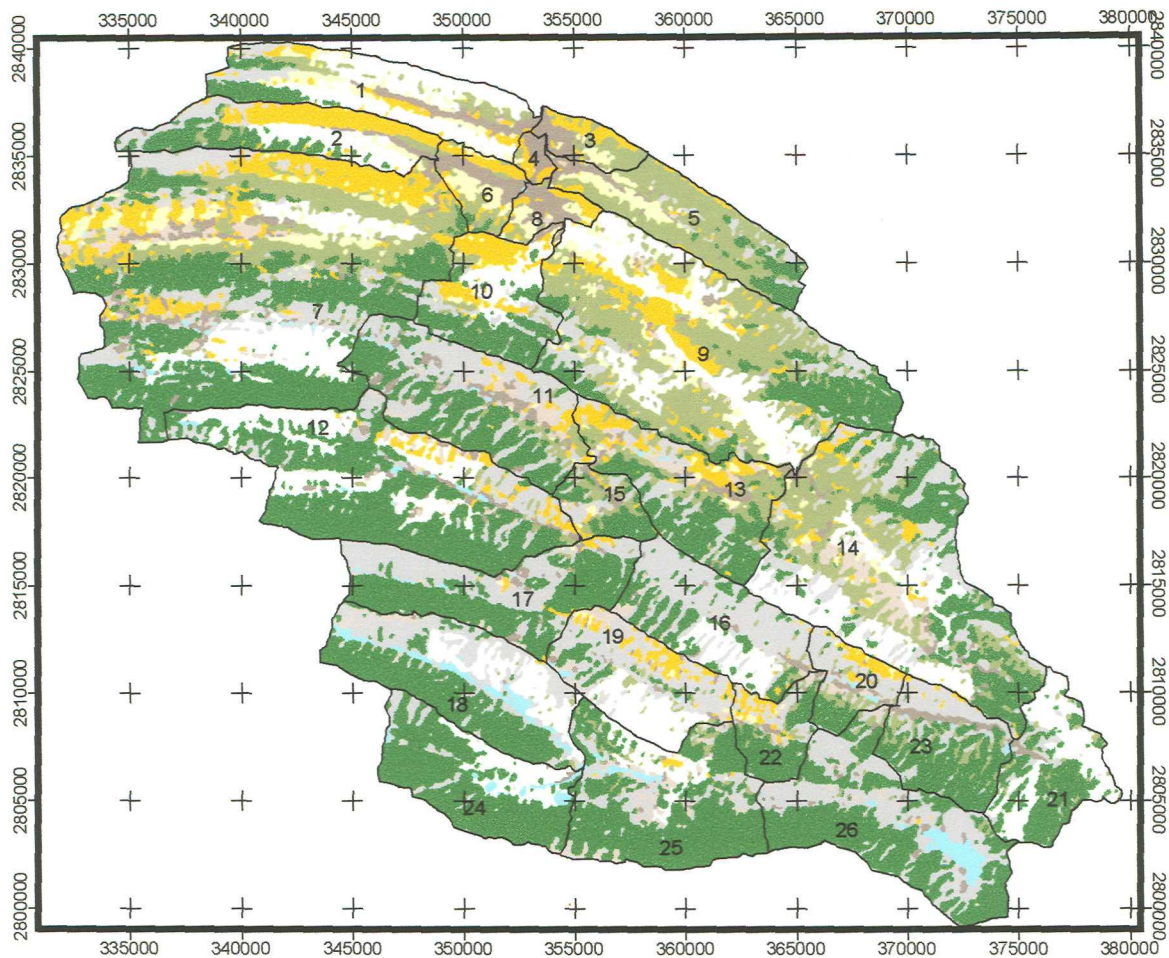
En los mapas de uso del suelo de 1975 y 1995 (Figuras 30 y 31) se puede observar que, en general, las áreas comprendidas por Bosques y Matorrales ocupan la mayor parte. Las diferencias entre ambos mapas se muestran en la Tabla 11 y en la Figura 32, donde hay una disminución de la vegetación primaria (Bosques y Matorral Submontano) mientras el Chaparral aumenta de manera significativa, lo cual indica un disturbio. El Matorral Desértico Rosetófilo, Pastizal y Zonas Agrícolas no cambian significativamente. Finalmente, el Matorral Desértico Micrófilo presenta un ligero aumento que, en proporción con el área, no es importante. Más adelante se explicarán en profundidad éstos cambios y cómo afectan el escurrimiento.



Proyección Universal Transversal de Mercator
 Cuadrícula UTM cada 5,000 m
 Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez

Figura 30. Uso de suelo obtenido de las cartas de INEGI (1975)



Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

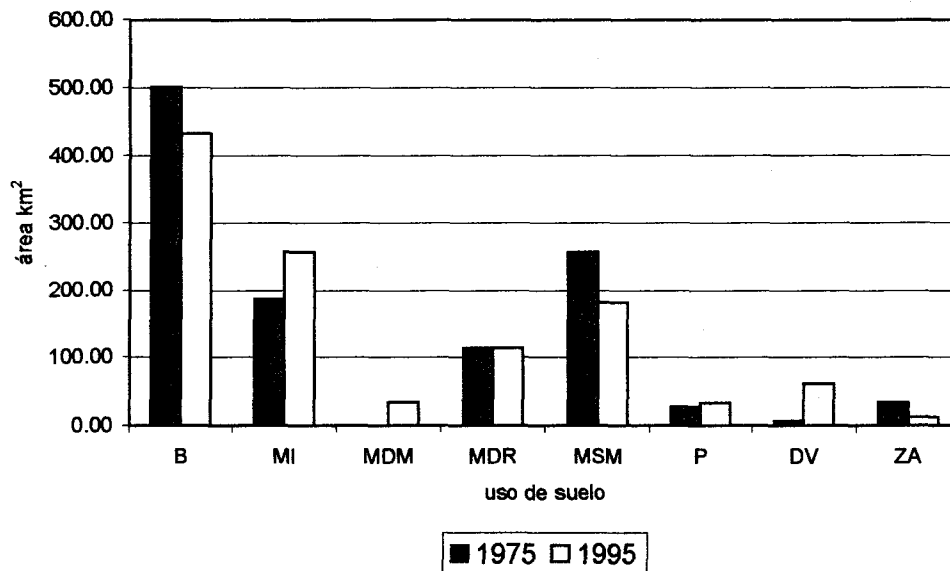
Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez

Figura 31. Uso de suelo originado de la clasificación de la imagen Landsat de 1995.

Tabla 11. Tipos de Uso del suelo en 1975 y 1995

Uso de suelo	Área km ²				* diferencia de porcentajes
	1975	%	1995	%	
Bosque	501.40	44.42	432.82	38.36	6.06
Chaparral	186.53	16.52	257.16	22.79	-6.27
Matorral Desértico Micrófilo	0.27	0.02	34.70	3.08	-3.06
Matorral Desértico Rosetófilo	114.41	10.13	113.94	10.10	0.03
Matorral Submontano	256.92	22.76	182.35	16.16	6.6
Pastizal	27.59	2.44	33.29	2.95	-0.51
Suelos Desnudos	7.20	0.64	61.78	5.48	-4.84
Zonas Agrícolas	34.55	3.06	12.35	1.09	1.97

* Nota: Los números positivos indican una disminución en el área, y los negativos un aumento.



Nota: B: Bosque
 MDM: Matorral Desértico Micrófilo
 MSM: Matorral Submontano
 DV: Suelos Desnudos
 MI: Chaparral
 MDR: Matorral Desértico Rosetófilo
 P: Pastizal
 ZA: Zonas Agrícolas

Figura 32. Cambios en el uso del suelo por área (km²) de 1975 a 1995

3.4.5 Textura del suelo

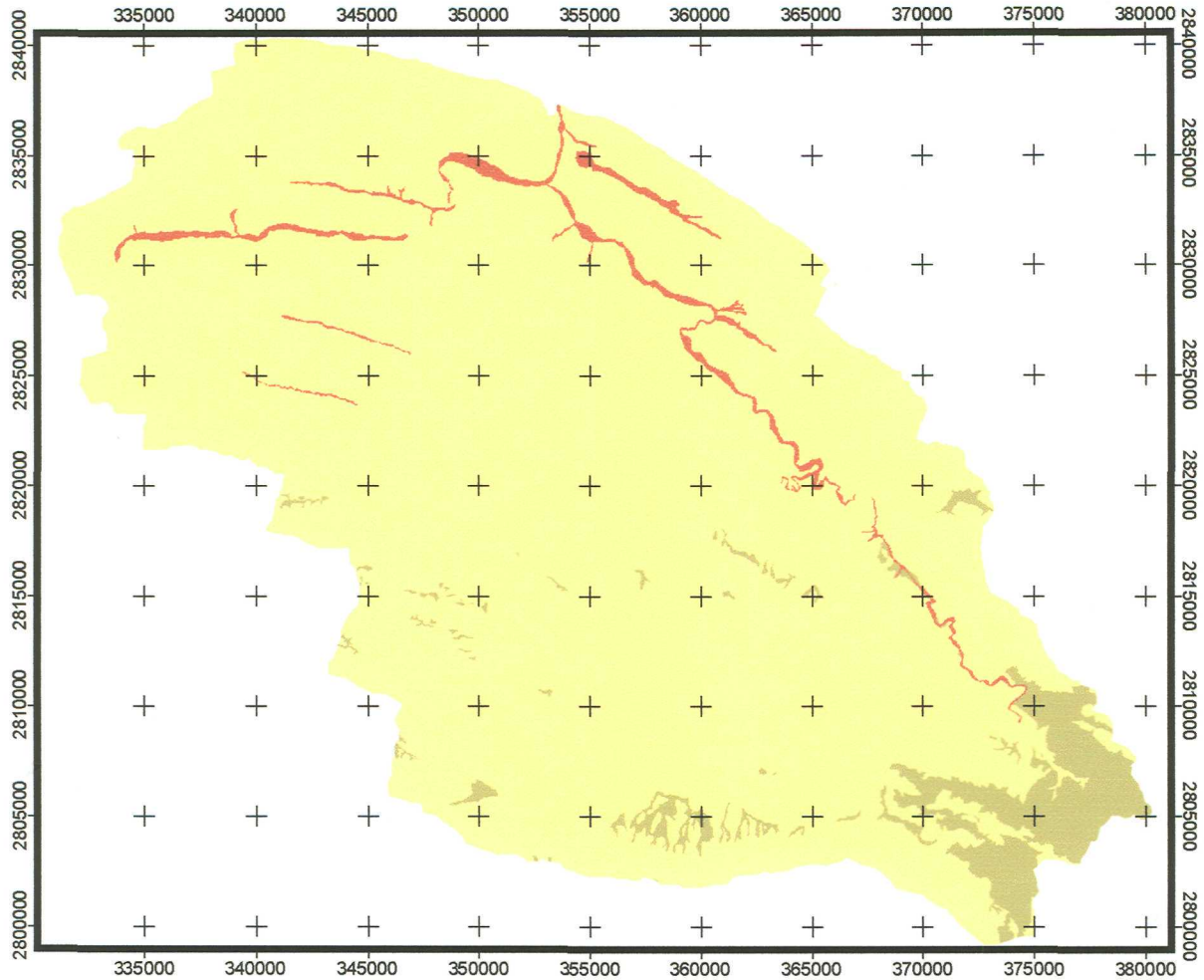
La textura del suelo es una característica física que se refiere al tamaño de las partículas minerales y la fracción de las partículas en diferentes clases de tamaños. Las partículas del suelo pueden separarse en tres clases basadas en el diámetro promedio (d) en milímetros, que es la clasificación utilizada en las cartas edafológicas de INEGI:




Tabla 12. Clases Texturales de suelos representadas en las cartas edafológicas de INEGI (McCuen, 1998).

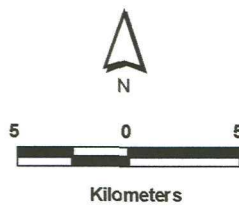
Partículas de Suelos	Tamaño	Textura
Arena	$0.02 \leq d \leq 2 \text{ mm}$	1
Limo	$0.002 \leq d \leq 0.02 \text{ mm}$	2
Arcilla	$d < 0.002 \text{ mm}$	3

La textura del suelo es un factor importante en la determinación de las características de retención de agua del suelo y, por lo tanto, la capacidad de infiltración de una capa de suelo. A medida que el diámetro de la partícula de suelo se incrementa, los espacios entre los poros también incrementan su tamaño, lo cual aumenta la capacidad de paso y almacenamiento del agua a través del perfil del suelo (McCuen, 1998).

En la Figura 33, que representa las clases texturales, se observa que la textura 1 se encuentra básicamente en los cauces de los ríos, la textura 2 es la predominante en las sierras (que es casi toda el área de la subcuenca) y las zonas agrícolas, y los pastizales presentan la textura 3.



Simbología	
Textura	
	1
	2
	3



Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez

Figura 33. Clases texturales presentes en el área de estudio.

3.4.6 Caudales máximos.

El caudal máximo estimado para una subcuenca es el resultado de la suma acumulativa de las subcuencas localizadas aguas arriba que desembocan en ella. Así, el caudal en la subcuenca 3 (la desembocadura final de toda la subcuenca) es el total estimado para el área (Figuras 34 y 35). Las subcuencas que presentan caudales mayores son las que por su contribución forman parte del cauce principal de la subcuenca G14-7f, y que son la 3, 4, 8, 9 14, y 23. La subcuenca 6 también presenta un caudal muy grande (Figura 36) aunque no pertenece al cauce principal sino a una ramificación menor, pero este valor se da porque es la suma acumulativa de la subcuenca 7, que ocupa un área mayor que todas las demás, captando una gran cantidad de lluvia y por lo tanto generando escurrimiento en grandes proporciones.

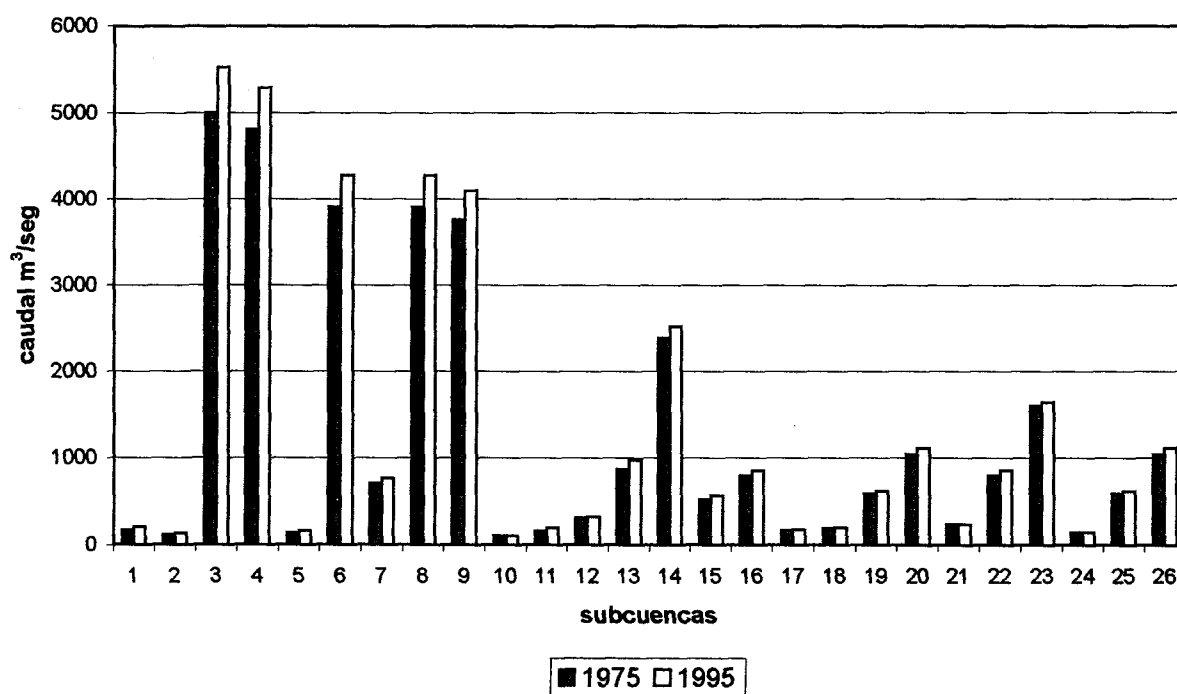


Figura 36. Caudales máximos estimados por subcuenca en 1975 y 1995 para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.

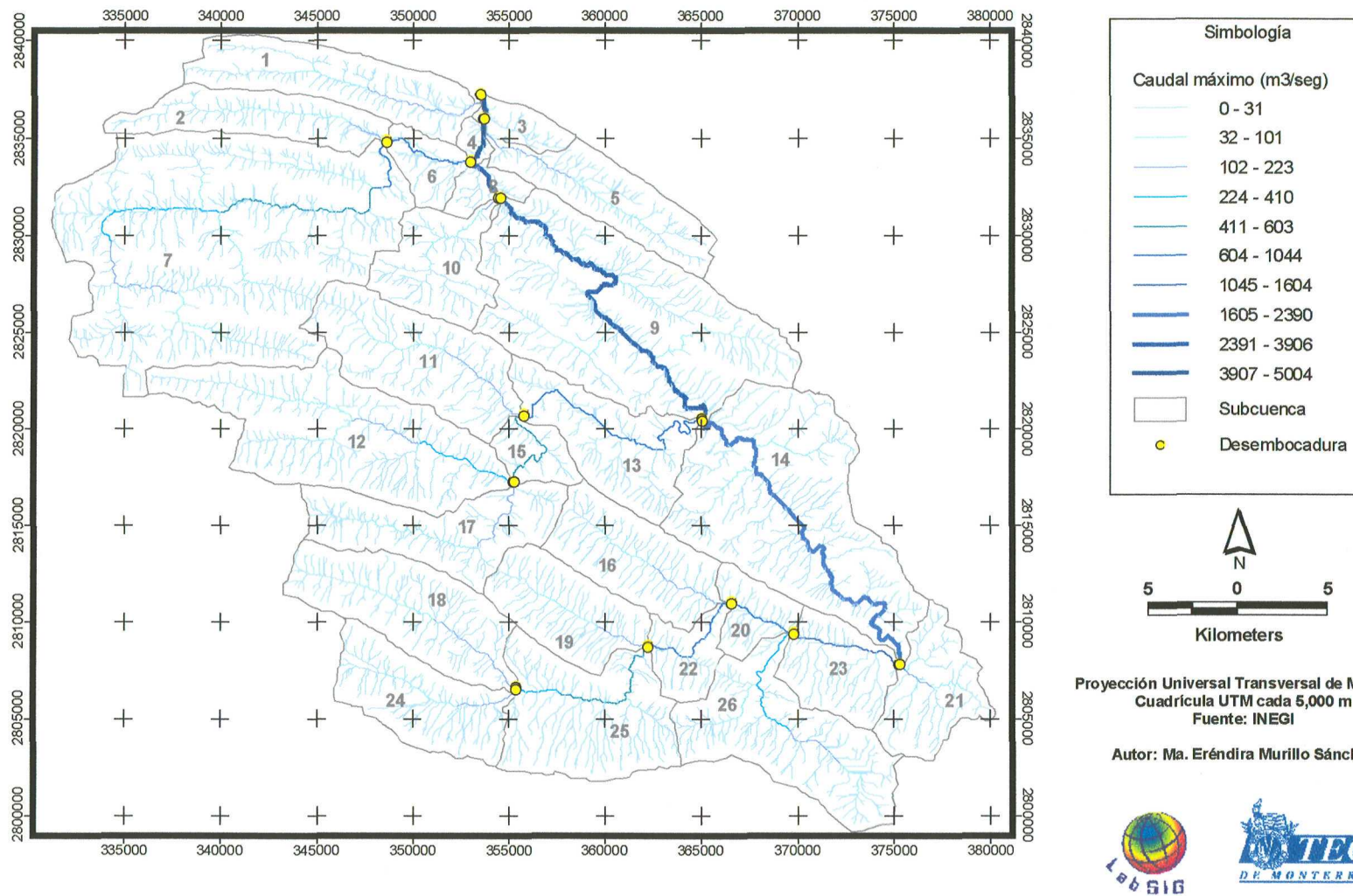


Figura 34. Caudal máximo por subcuenca obtenido a partir de los datos de 1975.

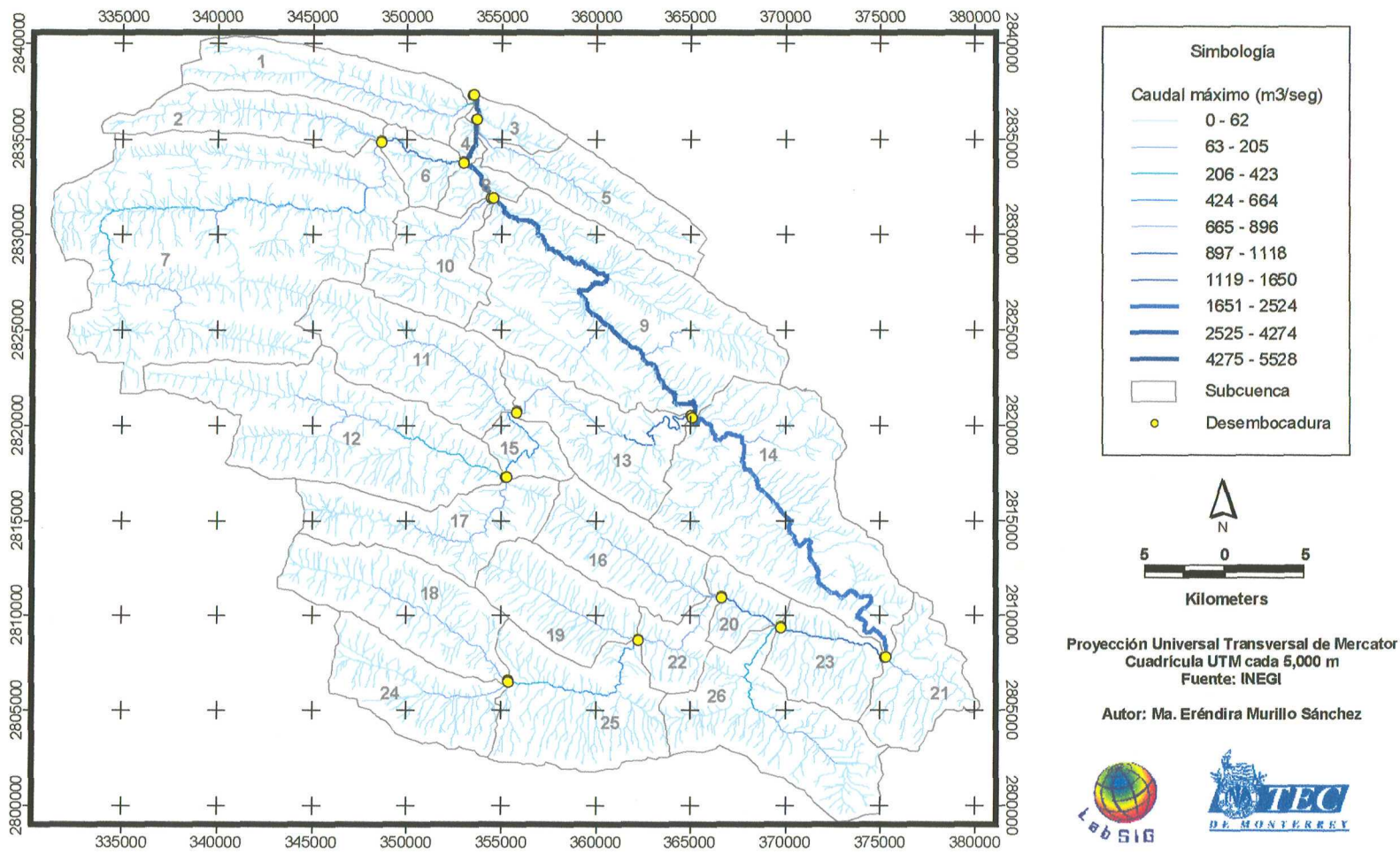


Figura 35. Caudal máximo por subcuenca obtenido a partir de los datos de 1995.

En la Tabla 13 se muestran las diferencias entre los caudales obtenidos para la modelación de 1975 y 1995. La Comisión Nacional del Agua reportó un caudal máximo de 4800 m³/seg durante el huracán Gilberto, y los datos que se obtuvieron para 1975 (5004 m³/seg) y para 1995 (5528 m³/seg), fueron similares por lo que se concluye que el modelo es una buena aproximación a la realidad. El aumento total del caudal entre un año y otro fué de 524 m³/seg. Las posibles causas de esto se discutirán en la siguiente sección.

Tabla 13: Caudal total acumulado por subcuenca (m³/seg) para una duración de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.

Subcuenca	caudal m ³ /seg			
	1975	1995	Incremento total	Incremento %
1	175	212	37	17.45
2	122	134	12	8.96
3	5004	5528	524	9.48
4	4814	5292	478	9.03
5	146	169	23	13.61
6	3906	4274	368	8.61
7	707	772	65	8.42
8	3906	4274	368	8.61
9	3761	4097	336	8.20
10	104	108	4	3.70
11	166	199	33	16.58
12	308	330	22	6.67
13	871	978	107	10.94
14	2390	2524	134	5.31
15	526	571	45	7.88
16	800	858	58	6.76
17	171	185	14	7.57
18	194	201	7	3.48
19	595	624	29	4.65
20	1044	1118	74	6.62
21	241	236	-5	-2.12
22	800	858	58	6.76
23	1604	1650	46	2.79
24	149	152	3	1.97
25	595	624	29	4.65
26	1044	1118	74	6.62

La subcuenca 21 presenta valores negativos que no son significativos como para indicar un decremento real en el caudal máximo.

3.5 Disturbios en las comunidades vegetales y su relación con el aumento en el coeficiente de escurrimiento

Los cambios sucesionales en la vegetación pueden ser parte de un proceso natural en una determinada comunidad vegetal, sin embargo hay disturbios antropogénicos que cambian el aspecto y composición de la comunidades.

En la subcuenca 24Bf "Monterrey" hay registros de diferentes tipos de disturbio, destacándose los incendios como los más frecuentes, de acuerdo a datos proporcionados por INEGI (1998) que se muestran en la Tabla 14 y su localización en la Figura 37. Sin embargo, las actividades de explotación (ganadera y forestal) así como las plagas, también tienen un impacto bastante significativo.

En los bosques, la similitud de las exigencias ecológicas de los pinares y encinares da como resultado que los dos tipos de bosques ocupen nichos muy similares y -en ciertos casos-, se presenten como bosques mixtos (Figura 38). En la sierra madre oriental predominan los encinos ya que prefieren los suelos de origen calcáreo como los litosoles, lo contrario sucede en bosques de la sierra madre occidental donde los suelos ácidos de origen volcánico dan lugar al predominio de los pinos. Según Rzedowski (1978), el grueso de la masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 m. A elevaciones mayores, los pinares constituyen el único tipo de bosque que alcanza el límite superior de la vegetación arbórea (Figura 39).

La subcuenca 21 presenta valores negativos que no son significativos como para indicar un decremento real en el caudal máximo.

3.5 Disturbios en las comunidades vegetales y su relación con el aumento en el coeficiente de escurrimiento

Los cambios sucesionales en la vegetación pueden ser parte de un proceso natural en una determinada comunidad vegetal, sin embargo hay disturbios antropogénicos que cambian el aspecto y composición de la comunidades.

En la subcuenca 24Bf "Monterrey" hay registros de diferentes tipos de disturbio, destacándose los incendios como los más frecuentes, de acuerdo a datos proporcionados por INEGI (1998) que se muestran en la Tabla 14 y su localización en la Figura 37. Sin embargo, las actividades de explotación (ganadera y forestal) así como las plagas, también tienen un impacto bastante significativo.

En los bosques, la similitud de las exigencias ecológicas de los pinares y encinares da como resultado que los dos tipos de bosques ocupen nichos muy similares y -en ciertos casos-, se presenten como bosques mixtos (Figura 38). En la sierra madre oriental predominan los encinos ya que prefieren los suelos de origen calcáreo como los litosoles, lo contrario sucede en bosques de la sierra madre occidental donde los suelos ácidos de origen volcánico dan lugar al predominio de los pinos. Según Rzedowski (1978), el grueso de la masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 m. A elevaciones mayores, los pinares constituyen el único tipo de bosque que alcanza el límite superior de la vegetación arbórea (Figura 39).

Tabla 14. Lista de disturbios presentes en la subcuenca 24Bf "Monterrey" y unidades vegetales afectadas (INEGI, 1998)

CLAVE	FECHA 1	FECHA 2	DISTURBIO
Mlr-Pi	1991	0	Incendio
(MI)	1991	0	Incendio
(Mlr)	1991	0	Incendio
(Mlr)	1991	0	Incendio
Pi-(Mrl)	1989	0	Incendio
(Mrl)	1987	0	Incendio
(MI)	1987	0	Incendio
Bopa-(MI)	1991	0	Aprovechamiento Forestal
(MI)	1987	0	Incendio
(MI)	1993	0	Incendio
(Mrl)-Pi	1993	0	Incendio
(MI)	1984	0	Incendio
(MI)	1988	0	Incendio
Bpoa-(MI)	1985	0	Incendio
(MI)-BPOA	1985	0	Incendio
(Mrl)	1984	0	Incendio
(Mrl)-Pi	1994	0	Reincendio
Bpq-(MI)	1988	0	Incendio
(Mrl)	1988	0	Incendio
(Mrl)	1984	0	Incendio
(MI)-BPQ	1988	0	Incendio
(BP)-Pi	1977	1977	Deterioro por plaga, sucesión vegetal 20años
Bpq-Pi	1977	0	Deterioro por Plagas 20 años
(MI)	1995	0	Incendio
(BP)	1977	1977	Deterioro por plaga, sucesión vegetal 20años
(BP)-Pi	1977	0	Deterioro por plagas 20 años
(MI)-BP	1995	0	Transformacion de la cubierta
(MI)-BOAP	1993	0	Aprovechamiento Forestal
(MI)	1993	0	Incendio
Bopa	1993	0	Aprovechamiento Forestal
(BP)-Pi	1977	0	Deterioro por plagas 20 años
(MI)-BPQ	1987	1993	Incendio, Reincendio
(BP)-Pi	1977	0	Deterioro por plagas 20 años
(MI)-BPQ	1987	1993	Incendio, Reincendio
(MI)	1993	0	Incendio
Bapo	1993	0	Aprovechamiento Forestal
Bpao-Mj	1993	0	Aprovechamiento Forestal
(MI)-BPQ	1993	0	Incendio

Continuación Tabla 15			
(MI)-BPQ	1987	1993	Incendio, Reincendio
(BP)-Pi	1977	0	Deterioro por plagas 20 años
(MI)	1993	0	Incendio
Bpo	1986	0	Aprovechamiento Forestal
Bpo	1986	0	Aprovechamiento Forestal
Bpo-Mj	1986	0	Aprovechamiento Forestal
Bpo-Mj	1986	0	Aprovechamiento Forestal
(MI)-BPOA	1979	0	Incendio
(MI)	1987	0	Incendio
(MI)	1992	0	Incendio
(MI)-BPOA	1992	0	Incendio
(MI)-BPOA	1992	0	Incendio
(MI)	1992	0	Incendio
(MI)	1992	0	Incendio
(MI)	1992	0	Incendio
(MI)-BPOA	1992	0	Incendio
Bpoa-(MI)	1992	0	Incendio
(MI)-BPOA	1992	0	Incendio
(MI)-BPOA	1987	0	Incendio
Bpq	1977	0	Deterioro por plagas 20 años
(MI)	1992	0	Incendio
(MI)-BPOA	1987	0	Incendio
(Mrl)	1992	0	Incendio
Bpq	1977	0	Deterioro por plagas 20 años
(MI)-BPOA	1987	0	Incendio
(MI)-BPOA	1987	0	Incendio

Nota: B: bosque
P: pino
Q: encino
BPOA: bosque de pino-oyamel-otras especies
MI: chaparral
Mrl: matorral crasi-rusifolio espinoso con chaparral
Mj: matorral de coníferas

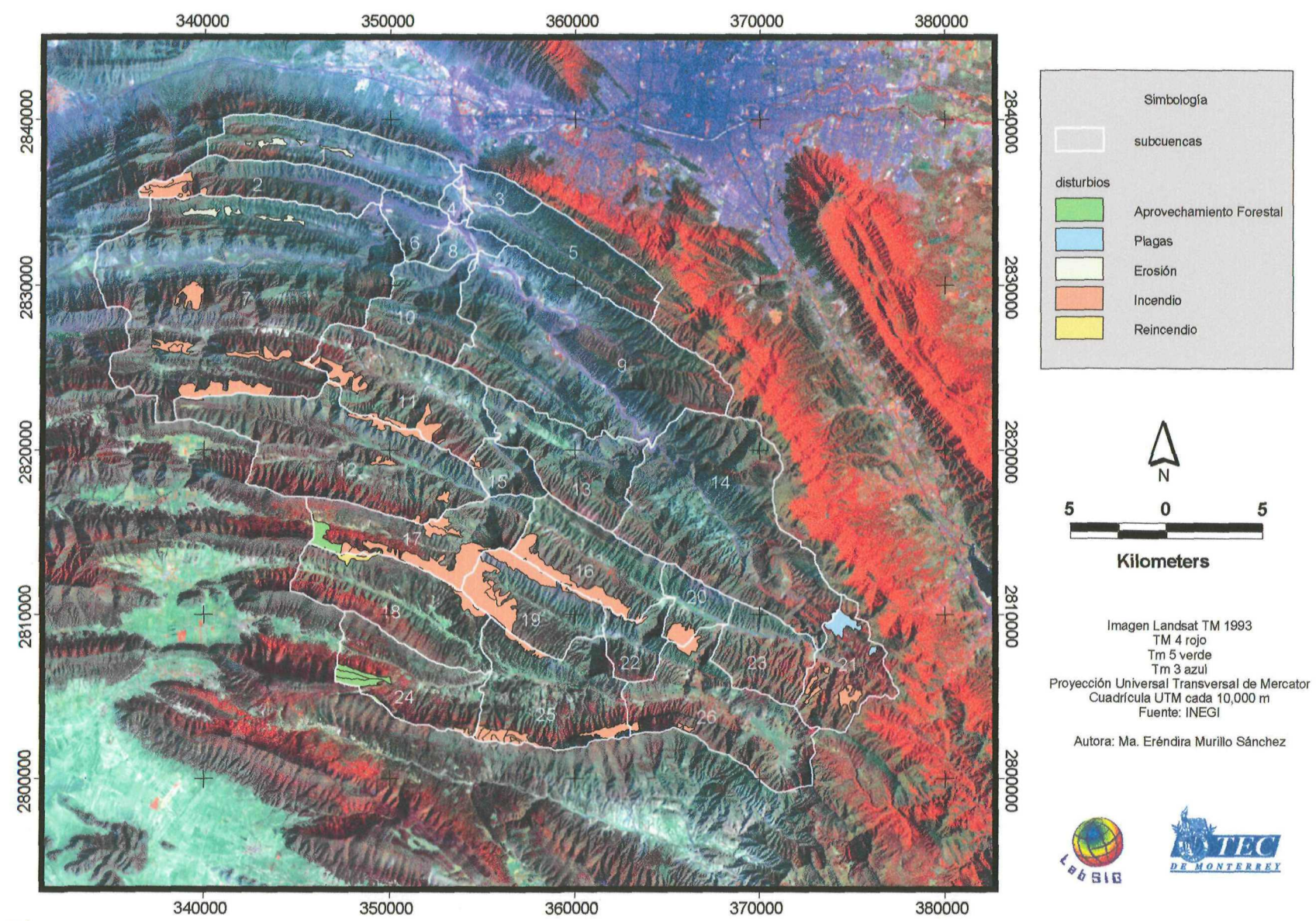


Figura 36. Tipos de disturbios presentes en la zona de estudio



Figura 38. Comunidad de pino-encino localizado en la sierra "El Álamo", municipio de Santiago, Nuevo León.



Figura 39. Bosque de pino. Ubicado en "El Tarillal", municipio de Santiago, Nuevo León.

Rzedowski (1978), menciona que el género *Quercus* es muy poco explotado pues generalmente son árboles bajos y de troncos delgados. Localmente la madera se utiliza como combustible o para cercas y muebles. En algunas partes de la subcuenca persiste la explotación forestal y áreas antes cubiertas por encinares, pinares o la combinación de ambos; ahora se utilizan para la ganadería y la agricultura (Figura 40), siendo los cultivos más frecuentes cebada, trigo y avena; así como árboles frutales como el manzano.



Figura 40. Bosques alternados con pastizales en "El Tarillal", municipio de Santiago, Nuevo León.

Generalmente los incendios se producen en épocas secas y calurosas, y como en otros tipos de vegetación, el fuego provoca cambios en la composición y estructura de las comunidades, cambios que varían en su profundidad y en función de la periodicidad

y fuerza de los incendios. Muchos árboles mueren por completo, ya sea porque no resisten los incendios, o bien porque no se reproducen los árboles dominantes y a la larga el bosque no puede perpetuarse. Bajo este mecanismo se convierten en otros tipos de bosques, matorrales o pastizales secundarios (Figura 41).



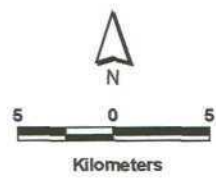
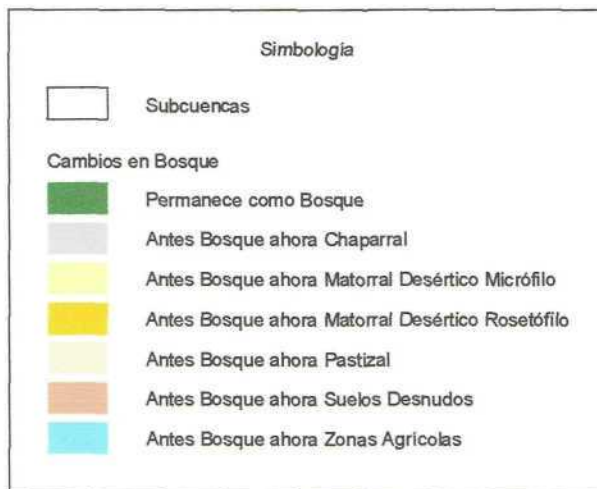
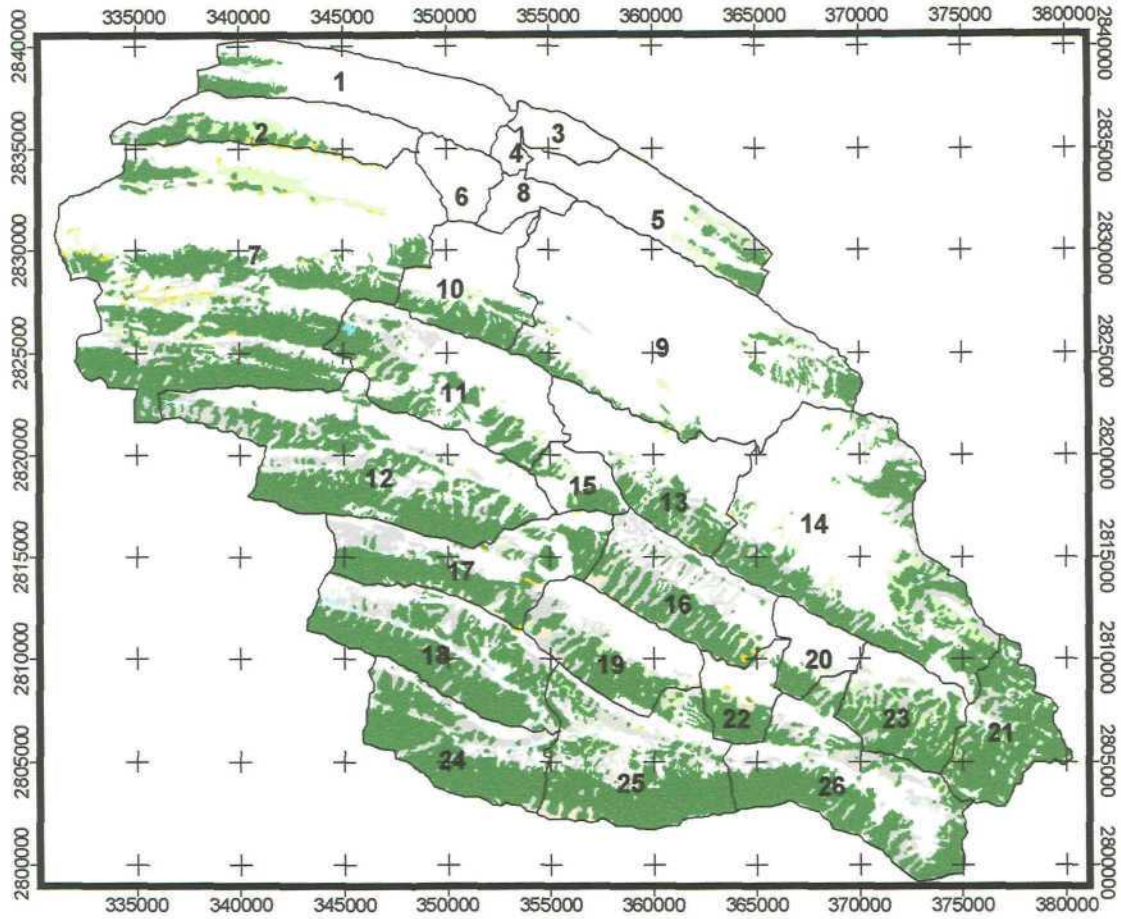
Figura 41. Zona incendiada ahora ocupada por chaparral, donde aún se observan los troncos de árboles que originalmente crecían. El grado de erosión en la superficie del suelo es muy alto. Ubicado en la sierra "El Álamo", municipio de Santiago, Nuevo León.

Sin embargo, hay zonas en la sierra donde no hay explotación de ningún tipo, y las zonas afectadas por incendios anteriores se regeneran por sí solas, o bien; si el incendio tiene un grado de afectación muy alto la regeneración es demasiado lenta, pues la superficie del suelo se encuentra sin protección de la cubierta vegetal (Figura 42). Lo que sobreviene es la falta de absorción y almacenaje de agua de los suelos, predominando el escurrimiento sobre la infiltración, desencadenándose una rápida erosión.



Figura 42. Ladera en la sierra "El Álamo", (municipio de Santiago, Nuevo León) afectada por un incendio, en la parte inferior se distingue una franja de pinos que no fueron afectados

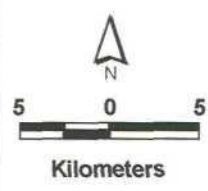
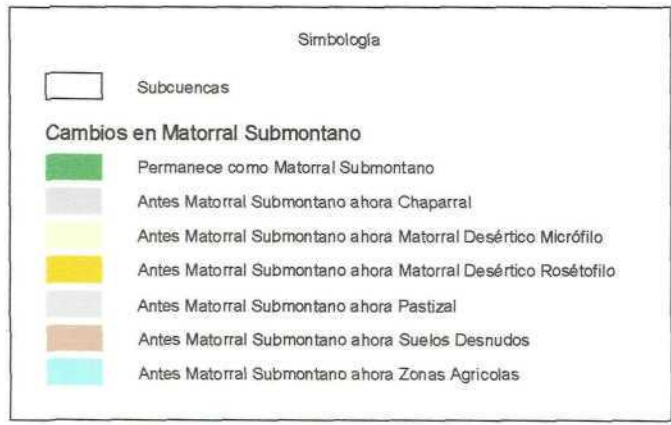
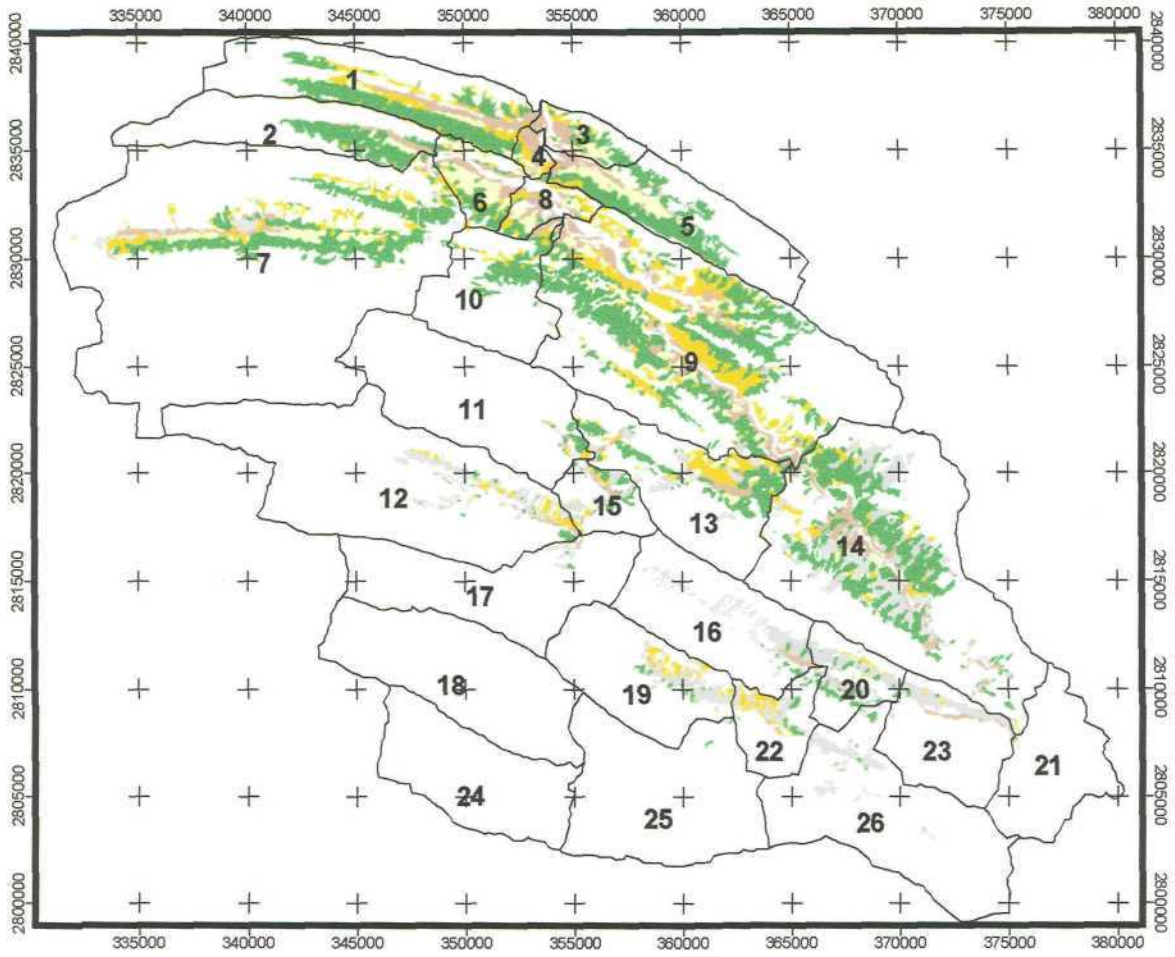
A pesar de que son diversos los factores que provocan un cambio en el escurrimiento como lo son la intensidad de la lluvia, textura, pendiente y uso de suelo, éste último afecta directamente el coeficiente de escurrimiento de acuerdo a los resultados obtenidos. Se detectaron los cambios de vegetación comparando los mapas de uso del suelo de 1975 y 1995, haciendo énfasis en la vegetación que -por su abundancia, cobertura y biomasa- puede influir directamente en un cambio en el escurrimiento si es sustituida. Es, en orden de importancia, Bosque, Matorral Submontano y Chaparral. En las Figuras 43, 44 y 45 se muestran las áreas que conservan el mismo tipo de uso del suelo presente en 1975, así como el cambio sufrido hasta 1995.



Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez

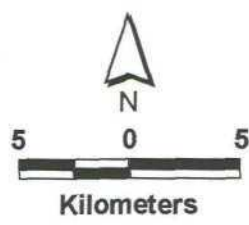
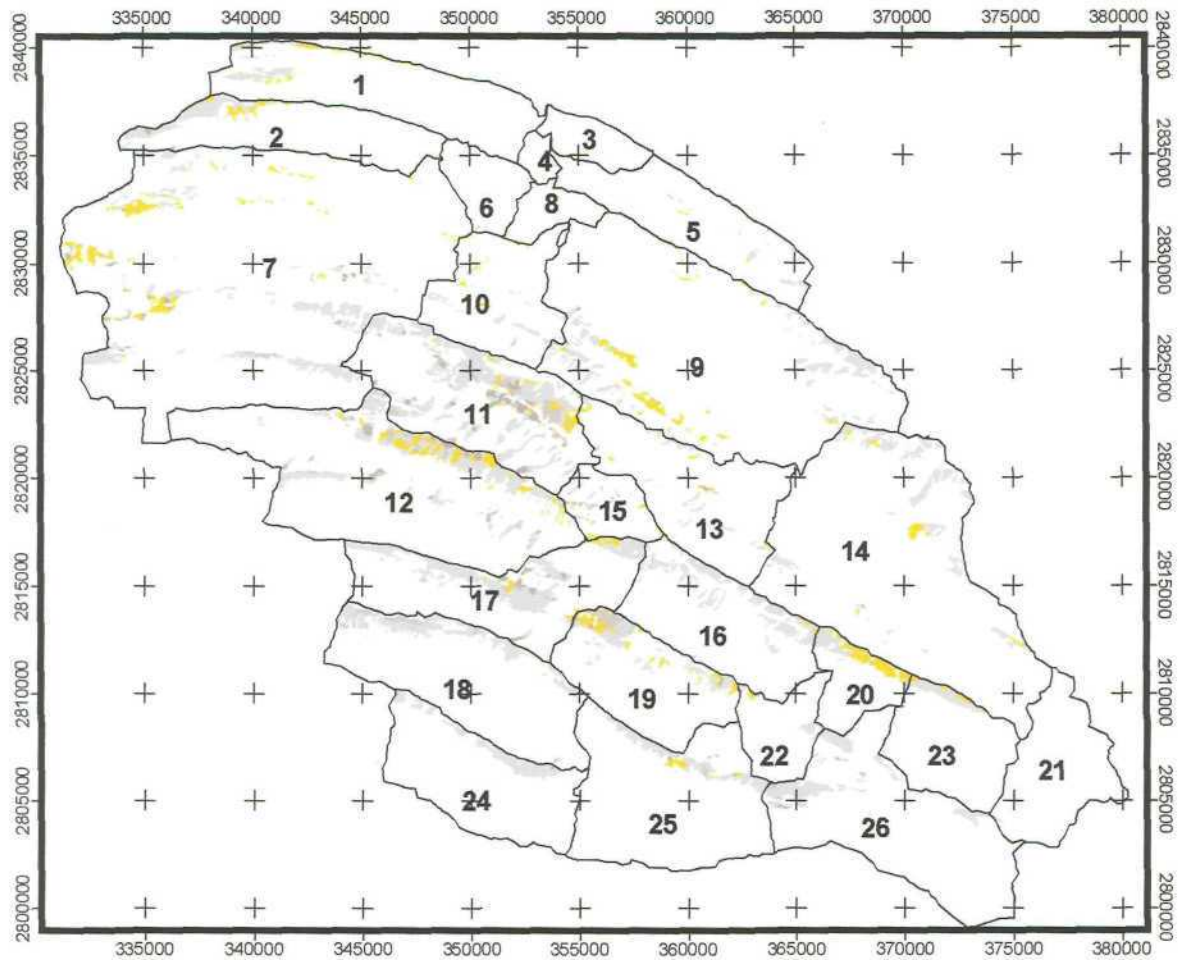
Figura 43 . Cambios detectados en las zonas cubiertas por bosque.



Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez

Figura 44 . Cambios detectados en las zonas cubiertas por Matorral Submontano



Proyección Universal Transversal de Mercator
Cuadrícula UTM cada 5,000 m
Fuente: INEGI

Autora: Ma. Eréndira Murillo Sánchez

Figura 45. Cambios detectados en zonas cubiertas por Chaparral.

La tendencia general es el cambio de Bosques a Chaparral (Figura 46), de Matorral Submontano a Chaparral, Matorral Desértico Rosetófilo y suelos desnudos (Figura 47), y finalmente de Chaparral a Matorral Desértico Rosetófilo (Figura 48). Esto se debe principalmente a disturbios que provocan que la vegetación primaria, como Bosques y Matorral Submontano, sea sustituida por vegetación secundaria o indicadora de disturbio, como el Chaparral.

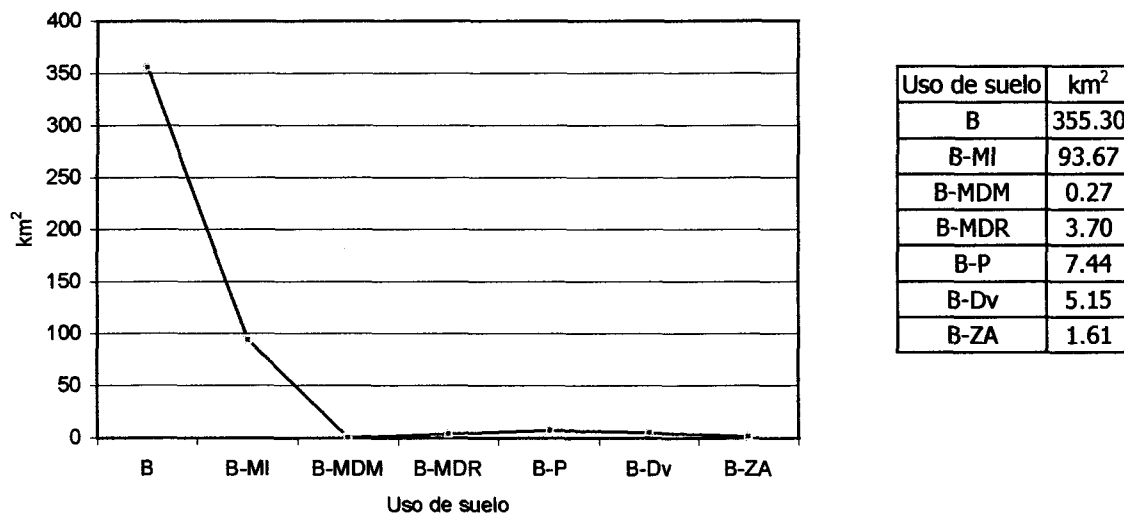
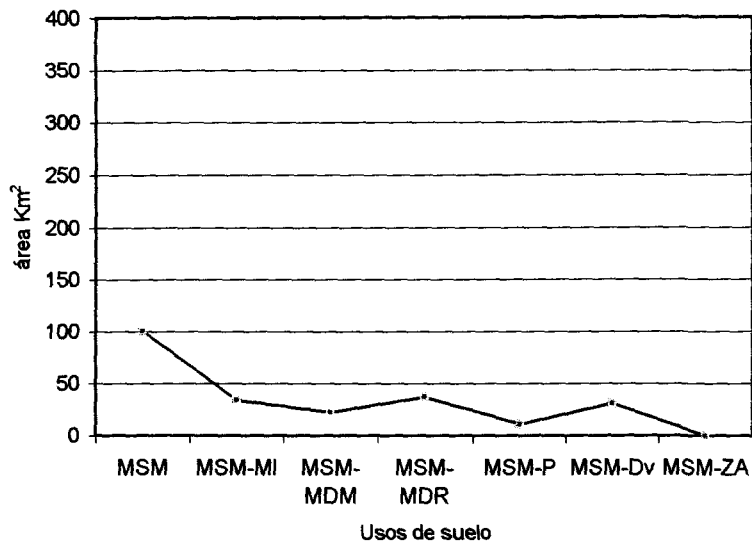
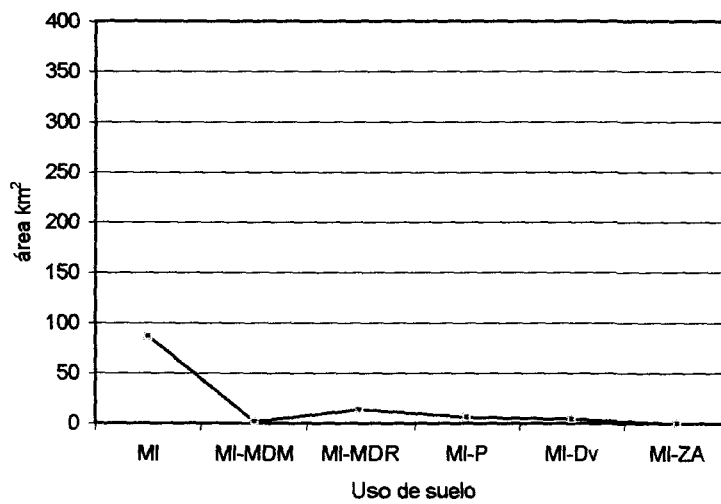


Figura 46. Cambios de Bosque a cualquier otro uso de suelo 1975-1995*



Uso de suelo	km²
MSM	100.52
MSM-MI	34.35
MSM-MDM	22.50
MSM-MDR	37.16
MSM-P	10.72
MSM-Dv	31.11
MSM-ZA	0.26

Figura 47. Cambio de Matorral Submontano a cualquier otro tipo de uso de suelo 1975-1995*



Uso de suelo	km²
MI	86.69
MI-MDM	2.10
MI-MDR	14.09
MI-P	6.19
MI-Dv	4.71
MI-ZA	0.13

Figura 48. Cambios de Chaparral a cualquier otro tipo de uso de suelo 1975-1995*

- * B: Bosque
 MDM: Matorral Desértico Micrófilo
 MSM: Matorral Submontano
 DV: Suelos Desnudos
 MI: Chaparral
 MDR: Matorral Desértico Rosetófilo
 P: Pastizal
 ZA: Zonas Agrícolas

Para determinar cuánto está cambiando la vegetación por año, se estimó el Índice de Transformación (IT) y se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 15. Índice de Transformación de la cubierta vegetal.

Uso de suelo	hectáreas			IT ha/año
	1975	1995	Diferencia *	
Bosque	50140	43282	6858	342.9
Chaparral	18653	25716	-7063	353.15
Matorral Desértico Micrófilo	27	3470	-3443	172.15
Matorral Desértico Rosetófilo	11441	11394	47	2.35
Matorral Submontano	25692	18235	7457	372.85
Pastizal	2759	3329	-570	28.5
Suelos Desnudos	720	6178	-5458	272.9
Zonas Agrícolas	3455	1235	2220	111

* Nota: Los números positivos indican una disminución en el área, y los negativos un aumento

De acuerdo a la tabla 15, se transforman a otro tipo de vegetación 342.9 ha/año de bosque y 372.85 ha/año de matorral submontano, un ritmo bastante acelerado. Las zonas agrícolas también se han incrementado (111 ha/año), así como el matorral desértico rosetófilo (2.35 ha/año) aunque no se compara con los dos primeros. Los valores de chaparral (-353.15 ha/año) y suelos desnudos (-272.9 ha/año) indican que se está incrementando su área de distribución en la zona de manera muy rápida, -especialmente el chaparral- y a un ritmo menor el pastizal (-28.5 ha/año) así como el matorral desértico micrófilo (-172.15 ha/año), concluyéndose que los disturbios antes mencionados, están produciendo este cambio.

Estos disturbios originan que el coeficiente de escurrimiento se incremente. Para comprobar esta última aseveración se comparó la media de los coeficientes de 1975 y 1995 (Figura 49), y además se calculó la diferencia entre los coeficientes de escurrimiento (Figura 50, 51; y Tabla 16), donde los valores negativos muestran un incremento del coeficiente. Esto indica que la proporción de la lluvia que escurre por la

superficie de la subcuenca se incrementó en ese período de tiempo, aumentando el volumen de las avenidas súbitas. En definitiva, el factor que ayudó a este aumento es el cambio de uso del suelo y la erosión de la superficie del suelo, que favorece escurrimientos de mayores proporciones.

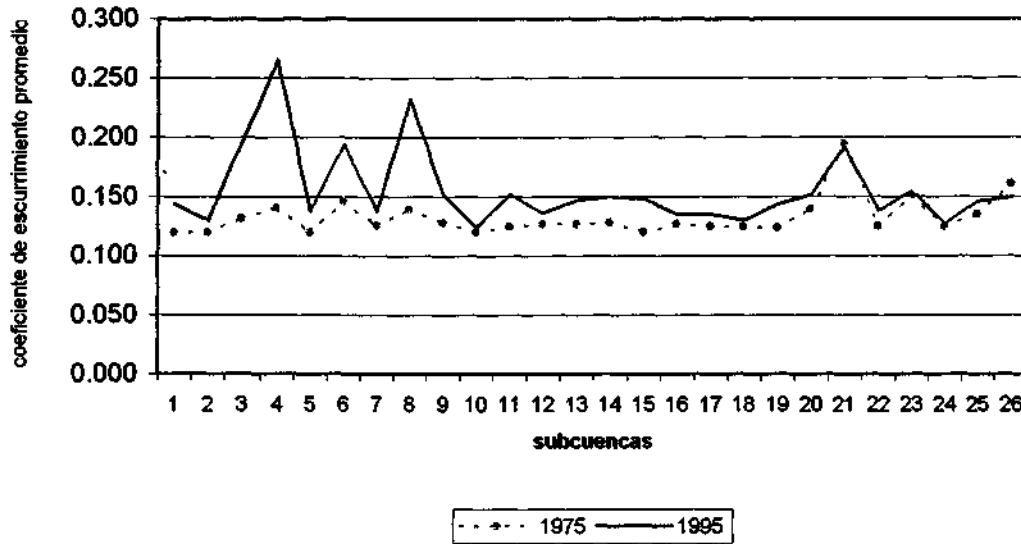


Figura 49. Media de coeficientes de escurrimiento de 1975 y 1995

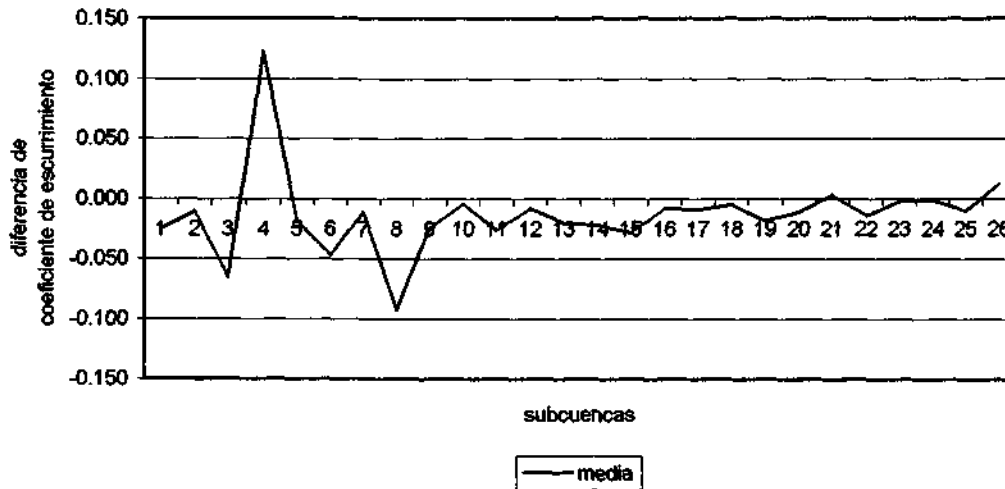


Figura 50. Cambio en el coeficiente de escurrimiento de 1975 a 1995

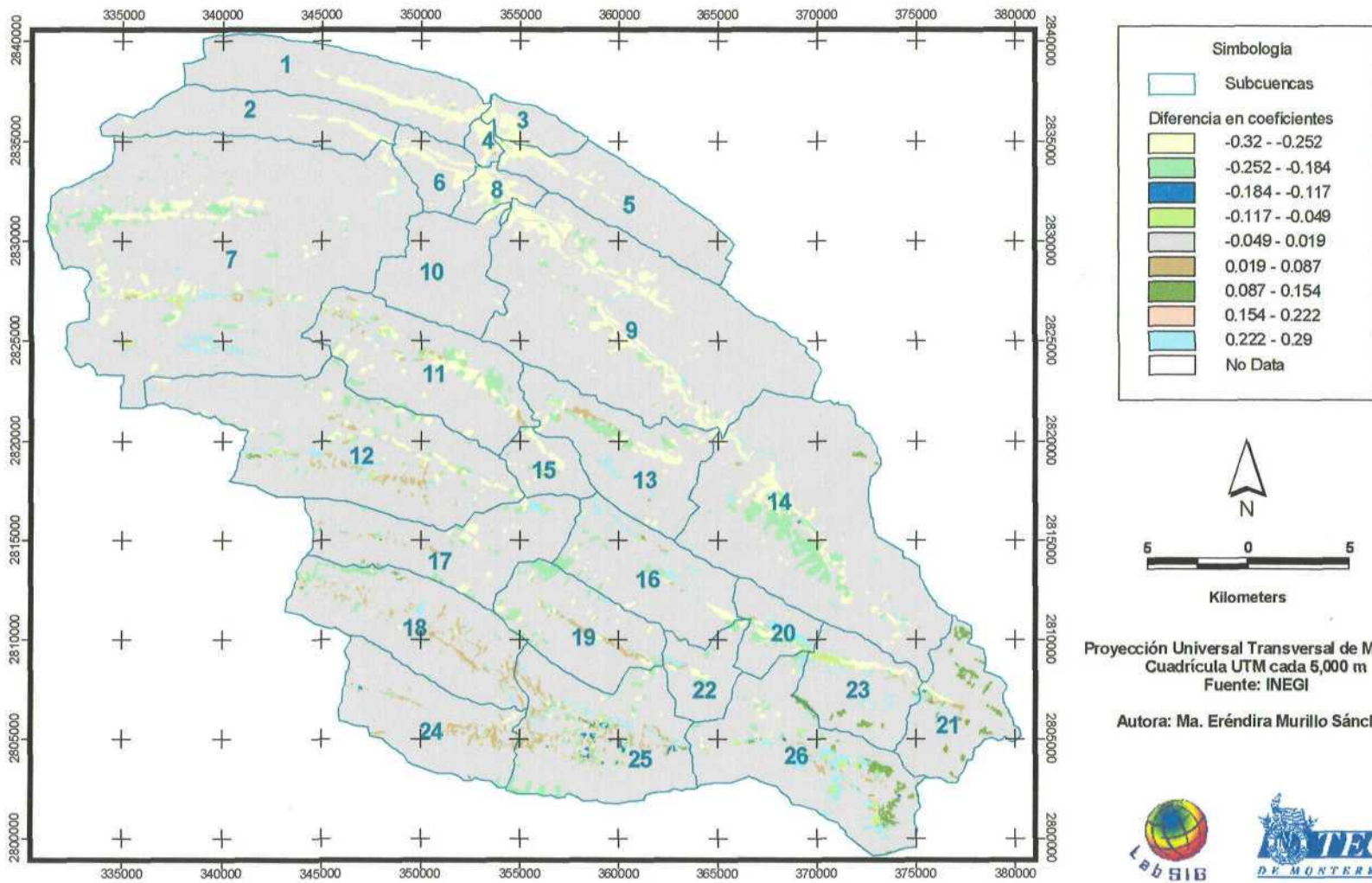


Figura 51. Diferencias entre coeficientes de escurrimiento de 1975 y 1995.

Tabla 16. Cambios en el coeficiente de escurrimiento de 1975 a 1995, expresado por la diferencia entre los datos de ambos grids.

Subcuencas	Coeficiente de escurrimiento		
	1975	1995	*diferencia
1	0.120	0.144	-0.025
2	0.120	0.130	-0.011
3	0.132	0.197	-0.065
4	0.141	0.265	-0.123
5	0.120	0.138	-0.018
6	0.146	0.194	-0.047
7	0.126	0.138	-0.011
8	0.140	0.232	-0.092
9	0.128	0.152	-0.024
10	0.120	0.124	-0.004
11	0.125	0.152	-0.026
12	0.127	0.136	-0.008
13	0.127	0.147	-0.020
14	0.128	0.150	-0.022
15	0.120	0.148	-0.028
16	0.127	0.135	-0.008
17	0.125	0.135	-0.009
18	0.125	0.130	-0.005
19	0.124	0.143	-0.018
20	0.140	0.152	-0.011
21	0.195	0.192	0.003
22	0.125	0.138	-0.014
23	0.152	0.155	-0.002
24	0.125	0.127	-0.001
25	0.135	0.146	-0.010
26	0.161	0.149	0.012

* Nota: Los números positivos indican una disminución en el escurrimiento, y los negativos un aumento

Por lo tanto, es importante darle importancia a la conservación de la subcuenca enfocado a proyectos de restauración. Los beneficios de conservar la cubierta vegetal y de sus restos en relación con el control de la erosión hídrica son:

1. La disminución de la energía cinética de la gota de lluvia al caer al suelo por intercepción
2. La disminución de la velocidad del escurrimiento por los obstáculos que se originan y las microredes que se presentan sobre el terreno
3. La retención del suelo que realizan las raíces de la propia vegetación
4. El aumento de la infiltración originada por la mayor porosidad del suelo a causa del incremento de materia orgánica, de los huecos producidos por las raíces, etc.(TRAGSATEC, 1988).

Se ha investigado sobre la reducción del caudal en cuencas boscosas. En un estudio hecho por la Oficina de Restauración de Tierras (Bureau of Land Reclamation) de Estados Unidos (1986), se estableció que la reducción del caudal máximo para la hipótesis de una cuenca cubierta de bosque es de 59% en relación a la dedicada al cultivo, y a un 65% el volumen total desaguado. En la cuenca del arroyo Mape (en Vizcaya, España) de 750 ha y sólo un 20% de superficie arbolada actualmente, se encontró que para una precipitación de 150 mm en seis horas, el caudal máximo queda reducido al 34% y el volumen total desaguado al 45% si se supone una cubierta boscosa del 100% (López Cadenas de Llano, 1990).

Como resumen de lo anteriormente expuesto, la vegetación en general y el bosque en particular, como sistema más evolucionado, crea un ecoclima menos xerófilo, favorece la economía y calidad de las aguas, regula las avenidas transformando los escurrimientos superficiales en dotaciones hídricas del suelo, mejora y conserva el suelo, además de proporcionar paisajes y ambientes óptimos.

Así pues, la corrección del fenómeno torrencial no puede quedar circunscrita a meras actuaciones en el propio cauce de pequeñas obras hidráulicas, sino que es preciso actuar en la subcuenca con otras acciones mecánicas y biológicas.

IV. CONCLUSIONES

La aplicación adecuada de la Hidrología Espacial puede ser una herramienta poderosa para analizar los escurrimientos causados por lluvias torrenciales, así como los efectos producidos en el ciclo hidrológico por el cambio de uso de suelo.

Específicamente se concluye que:

1. La utilización de DEM's para la modelación de la red hidrológica utilizando el Software Arc Info 8.0 y Spatial Analyst 3.1 de Arc View, produce mapas de escurrimientos con muy buena resolución para cuencas montañosas, como la 24Bf. Estos mapas muestran muchas similitudes con los de INEGI.
2. La definición de las subcuencas, puntos de desembocadura de cada subcuenca, cauces y los rasgos morfológicos en general, coinciden con estudios realizados en 1994 por el departamento de Hidráulica del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, lo que confirma la precisión del Modelo Hidrológico construido.
3. El caudal máximo obtenido para 1975 es de 5004 m³/seg y para 1995 es de 5528 m³/seg. En 20 años hubo un aumento de 524 m³/seg, lo que representa el 10.47% de total.
4. Las perturbaciones en la zona como incendios, plagas, desmonte, aprovechamiento forestal, etc., están provocando la disminución en la vegetación primaria (bosques y matorral submontano) y un aumento en la vegetación secundaria (chaparral) así como los suelos desnudos, y como consecuencia la erosión del suelo.

5. Comparando las diferencias entre coeficientes de escurrimiento de 1975 y 1995, se puede observar que el coeficiente aumentó debido estas perturbaciones en un período de 20 años, lo cual provoca el incremento en el caudal máximo total.
6. Mediante estudios como el presente, se ayuda a la toma de decisiones sobre el control de avenidas en cuencas perturbadas. Sin embargo, es importante que múltiples disciplinas e instituciones involucradas en el control de avenidas torrenciales aporten ideas, experiencias y soluciones, haciendo énfasis en la restauración de la vegetación como medida a largo plazo.

V. RECOMENDACIONES

- El uso de coeficientes de escurrimiento obtenidos específicamente para el sitio de estudio, proveerán resultados más confiables en el volúmen del caudal pico.
- Aunque los resultados obtenidos son de mucha utilidad, es necesario comparar diferentes modelos para la estimación de caudales máximos. Hay varios softwares en el mercado que realizan cálculos hidrológicos como Storm Water Management System (SWMM), Watershed Modelling System (WMS) que ofrece la interface entre Sistemas de Información Geográfica y calculos hidrológicos, y Surfer, entre otros. Muchos ofrecen modelos más modernos de acuerdo a las necesidades del sitio, como el TR-55, HEC-1, y TR-20.
- Otro aspecto muy importante de estudiar es el arrastre de sedimentos por los cauces en la subcuenca, así se podría entender de manera más general los efectos del escurrimiento en la pérdida del suelo.
- El estudio más a fondo de los cambios en la vegetación ayudará a comprender el aumento en el escurrimiento, se recomienda analizar por subcuenca los cambios y estudiar en cuáles de estas existe mayor erosión.

ANEXO I

GLOSARIO

afluente *sin. tributario.* Curso de agua que desemboca en un curso mayor o en un lago.

agua superficial. Agua que fluye o se almacena en la superficie del terreno.

aguas abajo. En la dirección de la corriente en un río o curso de agua.

aguas arriba. En dirección hacia la cabecera de un río.

almacenamiento en depresiones. Volumen de agua necesario para llenar las pequeñas depresiones naturales hasta su cota de rebose.

altitud. Distancia medida en vertical desde el nivel medio del mar a un nivel, un punto o un objeto considerado como un punto.

altura de escurrimiento (total). Volumen de escurrimiento de una cuenca dividida por su área para un tiempo dado.

año húmedo (lluvioso). Año en que la precipitación o el caudal es significativamente superior a lo normal.

avenida *sin. crecida, inundación.*

1) Elevación, generalmente, rápida en el nivel de las aguas de un curso, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor.

2) Flujo relativamente alto medido como nivel o caudal.

características morfológicas de una cuenca. Características de una cuenca, por ejemplo superficie de la cuenca, perfil longitudinal de la corriente, etc.

caudal máximo *sin.* **caudal máximo instantáneo.** Caudal máximo instantáneo para un hidrograma dado.

coeficiente de escurrimiento (también método racional)

- 1) Relación entre la escorrentía y la precipitación (ambas expresadas en altura de agua).
- 2) Coeficiente utilizado en la fórmula del método racional (adimensional).

crecida repentina. Crecida de corta duración con un caudal máximo relativamente elevado.

cuenca. Área de drenaje de un curso de agua, río o lago.

desembocadura. Punto más bajo en el límite de un sistema de drenaje.

escurrimiento. Parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo en un curso de agua.

escurrimiento superficial *sin.* **flujo superficial.** Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo.

exorréico. Que drena en el océano.

hidrología

- 1) Ciencia que estudia las aguas superficiales y subterráneas de la Tierra, y su aparición, circulación y distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, sus propiedades biológicas, químicas y físicas, sus reacciones con el entorno, incluyendo su relación con los seres vivos.
- 2) Ciencia que estudia los procesos que rigen el agotamiento y recarga de los recursos hídricos continentales, y que trata las diversas fases del ciclo hidrológico.

infiltración. Movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo. La infiltración es igual a la precipitación total menos las pérdidas debidas a la interceptación por la vegetación, a la retención en depresiones, a la evaporación y a la escorrentía superficial

intensidad de la precipitación. Cantidad de agua recogida durante un intervalo de tiempo dado.

lecho del río. Parte inferior de un valle fluvial, conformada por el flujo de agua, y a lo largo de la cual se mueven la mayor parte del caudal y los sedimentos, en los períodos intercrecida.

limnógrafo *sin* registrador de nivel de agua. Instrumento que registra los niveles de agua en el tiempo.

orden de corriente. Número que expresa el orden de ramificación de un curso de agua en un sistema hidrográfico.

precipitación. Hidrometeoro constituido por una agregación de partículas acuosas, líquidas o sólidas, que cae de una nube o grupo de nubes y que llega a alcanzar la superficie de la tierra. Las unidades de precipitación son los milímetros o las pulgadas (sistemas decimal o inglés, respectivamente). En algunos documentos, la precipitación se presenta en litros por metro cuadrado, que numéricamente es igual a la altura en milímetros

río. Corriente de agua de grandes dimensiones que sirve de canal natural de drenaje en una cuenca de drenaje.

sequía (también sequía hidrológica). Ausencia prolongada o escasez acusada de precipitación.

tiempo de concentración .Tiempo necesario para que el escurrimiento de un chubasco llegue hasta el desagüe desde el punto de la cuenca con mayor tiempo de recorrido.

ANEXO II



**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
GERENCIA REGIONAL RIO BRAVO
SUBGERENCIA TÉCNICA
UNIDAD DE HIDROMETEOROLOGÍA**

DATOS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS MENSUALES EN mm.

ESTACIÓN: MONTERREY

MUNICIPIO: MONTERREY

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁXIMA ANUAL
1960	2.5	20.5	5.5	8.0	2.3	1.8	9.5	29.7	53.8	13.6	24.2	8.9	53.8
1961	3.1	2.4	42.0	20.5	7.5	40.0	14.0	32.0	32.0	48.0	8.0	2.0	48.0
1962	2.5	0.0	3.0	3.0	6.5	58.5	0.0	15.5	147.5	49.5	7.5	14.5	147.5
1963	2.0	3.5	32.5	52.0	20.5	15.0	26.4	17.5	103.7	8.3	0.5	6.2	103.7
1964	7.0	2.1	4.2	26.4	20.0	11.5	12.0	26.5	140.0	44.5	24.5	10.4	140.0
1965	5.6	15.0	9.1	7.8	25.0	4.4	1.1	49.0	44.5	32.0	12.0	12.0	49.0
1966	8.0	40.0	8.1	39.5	68.0	32.0	1.0	32.0	105.0	31.5	74.5	0.0	105.0
1967	7.0	13.5	59.3	11.5	46.5	4.0	53.0	102.0	143.0	27.0	12.0	1.0	143.0
1968	12.0	5.0	9.5	9.0	19.5	17.0	55.0	35.5	71.0	73.0	5.0	0.0	73.0
1969	0.0	4.0	3.0	5.4	29.0	33.0	35.0	47.5	64.0	31.5	25.0	10.5	64.0
1970	8.0	60.0	1.8	28.0	18.0	20.0	48.0	10.0	71.0	8.0	0.0	4.0	71.0
1971	5.5	2.5	0.0	0.0	13.0	24.0	23.5	60.0	82.0	28.0	20.0	5.0	82.0
1972	5.0	6.5	2.0	4.0	30.6	72.0	35.0	19.5	60.0	38.7	6.0	1.0	72.0
1973	10.5	13.0	0.0	7.3	6.0	140.0	10.0	50.0	19.0	70.0	13.0	8.1	140.0
1974	2.0	0.0	15.0	2.7	15.0	36.4	4.5	16.5	148.0	44.5	1.5	2.3	148.0
1975	6.3	10.0	2.5	12.0	10.0	4.6	94.5	17.3	38.0	2.5	1.4	21.0	94.5
1976	2.7	2.3	4.8	18.5	12.8	49.3	101.5	28.5	35.5	25.7	57.0	4.0	101.5
1977	7.3	8.0	4.3	15.8	20.1	2.6	3.0	31.4	103.3	18.0	0.0	4.0	103.3
1978	4.8	4.9	0.0	17.2	35.0	27.0	13.3	180.0	120.0	46.0	4.2	4.0	180.0
1979	1.7	1.7	15.5	18.0	18.0	49.0	46.0	27.0	63.5	0.0	6.5	24.8	63.5
1980	5.0	5.3	0.0	11.0	41.0	16.8	33.5	26.2	43.0	38.5	20.0	4.0	43.0
1981	13.0	22.5	26.0	110.5	56.0	59.5	39.8	18.5	29.7	3.5	20.0	0.0	110.5
1982	0.0	5.5	21.5	19.5	21.0	8.5	2.0	27.5	30.0	SD	11.0	48.5	48.5
1983	4.0	0.0	8.0	0.0	109.0	4.7	SD	27.0	68.5	54.0	2.7	3.0	109.0
1984	42.0	0.0	0.0	0.0	40.0	17.5	38.6	4.0	53.0	5.1	17.0	1.8	53.0
1985	8.0	8.0	57.0	42.5	52.5	54.5	14.5	61.0	10.5	39.8	20.0	2.3	61.0
1986	1.0	0.6	3.7	20.0	47.2	25.8	2.8	22.0	156.5	41.5	21.0	24.5	156.5
1987	5.7	14.0	21.5	20.0	20.0	21.5	31.0	0.0	47.0	15.8	2.4	1.0	47.0
1988	12.0	8.0	2.3	9.2	26.4	68.5	13.5	44.3	183.9	28.0	0.0	0.0	183.9
1989	17.6	8.3	2.1	21.5	16.4	1.0	54.0	20.0	78.0	6.3	4.0	17.9	78.0

Continuación

1990	2.0	3.0	10.0	12.8	12.3	12.5	12.5	19.5	52.5	100.5	6.5	0.0	100.5
1991	3.7	10.0	2.8	36.3	22.0	49.4	9.0	45.3	33.5	3.6	14.9	30.6	49.4
1992	15.0	7.8	3.0	19.0	38.0	12.0	0.8	22.0	24.5	33.0	10.3	6.2	38.0
1993	20.0	8.8	4.5	11.6	51.2	77.7	3.2	36.8	46.0	8.2	5.2	3.2	77.7
1994	59.0	6.5	24.0	12.8	39.0	8.0	1.7	2.3	46.0	16.0	31.0	13.0	59.0
1995	4.0	8.0	8.4	3.5	28.0	9.0	0.0	27.0	9.9	11.3	15.0	10.9	28.0
1996	8.6	3.3	7.5	8.0	4.1	14.0	20.5	125.2	2.0	73.0	3.2	0.0	125.2
1997	2.5	5.5	45.0	17.0	10.5	38.0	5.5	5.8	33.0	38.0	23.5	22.0	45.0
1998	0.0	10.0	13.5	2.5	0.0	13.0	4.8	36.0	41.0	44.0	23.0	2.0	44.0
1999	0.0	0.5	8.5	20.0	14.5	63.7	74.4	30.4	40.0	12.5	0.0	9.9	74.4



**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
GERENCIA REGIONAL RIO BRAVO
SUBGERENCIA TÉCNICA
UNIDAD DE HIDROMETEOROLOGÍA**

DATOS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS MENSUALES EN mm.

ESTACIÓN: SANTA CATARINA

MUNICIPIO: SANTA CATARINA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁXIMA ANUAL
1960	1.0	12.0	1.2	9.4	4.5	11.0	4.0	40.5	26.0	4.2	5.7	4.0	40.5
1961	3.2	0.0	4.0	9.6	1.0	6.0	7.2	12.4	40.0	4.2	3.0	SD	40.0
1962	SD	2.0	2.0	3.4	1.1	49.5	SD	16.0	84.0	8.2	4.2	9.0	84.0
1963	SD	2.5	SD	7.8	45.0	33.0	13.5	12.0	57.0	22.0	6.5	12.0	57.0
1964	8.0	0.0	2.0	6.8	23.0	6.3	15.0	3.0	97.5	10.0	23.0	10.0	97.5
1965	10.0	12.0	5.0	68.0	25.0	18.0	6.0	10.0	34.0	18.0	23.0	18.0	68.0
1966	10.0	18.0	4.0	6.0	24.0	22.0	2.0	44.0	35.0	42.0	11.0	3.0	44.0
1967	5.0	8.0	20.0	3.0	1.5	10.0	23.0	90.0	15.5	38.0	1.5	SD	90.0
1968	2.0	6.0	4.2	12.0	4.0	22.0	40.0	40.0	65.0	43.0	21.0	0.0	65.0
1969	0.0	10.0	0.0	0.0	6.0	28.0	7.0	47.0	45.0	6.0	SD	SD	47.0
1970	SD	SD	15.0	28.0	49.0	14.0	15.5	15.2	60.8	2.3	SD	0.0	60.8
1971	8.1	0.0	0.5	0.0	11.5	12.0	16.5	69.5	41.0	11.5	5.5	4.0	69.5
1972	2.0	3.0	1.0	SD	9.5	23.0	30.0	21.0	22.0	42.5	8.0	2.0	42.5
1973	10.0	10.0	SD	SD	6.5	87.0	100.0	35.0	6.0	35.0	SD	SD	100.0
1974	4.0	0.0	13.0	3.5	39.0	20.0	13.5	8.0	151.5	SD	SD	0.0	151.5
1975	SD	SD	SD	SD	SD	SD	6.2	13.5	62.1	6.0	0.0	12.0	62.1
1976	2.7	0.0	5.0	8.5	15.4	19.3	67.0	18.0	21.2	29.2	68.2	3.9	68.2
1977	9.5	4.2	3.5	6.0	4.8	7.9	1.0	27.0	80.1	40.2	0.5	0.0	80.1
1978	7.9	8.1	9.0	8.0	10.0	23.0	6.1	44.4	93.5	22.0	5.0	6.2	93.5
1979	3.0	1.0	2.8	0.5	15.5	45.0	2.8	13.0	59.0	5.0	0.0	25.0	59.0
1980	0.0	9.0	0.0	0.0	35.0	11.0	59.5	21.5	SD	SD	SD	0.0	59.5
1981	17.5	11.5	18.0	20.0	29.7	35.3	14.2	55.5	61.4	7.0	1.2	0.0	61.4
1982	0.0	6.3	5.8	10.4	14.8	3.7	SD	11.2	16.2	48.9	8.0	17.4	48.9
1983	15.2	11.7	12.5	0.0	40.0	10.8	SD	SD	107.5	34.0	0.0	0.0	107.5
1984	40.0	SD	SD	0.0	29.2	3.2	34.2	7.2	39.2	7.2	7.5	3.5	40.0
1985	13.2	18.8	5.3	25.8	30.0	52.0	0.0	12.5	9.2	16.2	0.0	0.0	52.0
1986	0.0	1.5	0.0	12.5	41.0	17.2	1.3	28.0	84.4	19.0	6.2	23.0	84.4
1987	15.2	14.0	13.0	21.0	13.3	19.0	0.0	SD	70.7	10.2	2.2	0.0	70.7
1988	11.0	4.2	1.5	10.8	9.7	10.0	12.0	57.7	SD	SD	SD	SD	57.7
1989	SD	5.5	2.0	16.5	0.0	15.5	5.5	53.0	77.4	2.3	3.0	18.0	77.4
1990	0.0	5.9	5.3	15.8	9.0	0.0	16.0	31.0	44.0	90.1	1.3	0.5	90.1
1991	2.0	9.8	1.7	13.5	28.5	40.0	31.3	3.8	57.5	11.3	3.3	27.0	57.5
1992	13.8	7.6	23.0	12.8	11.4	20.0	0.0	17.0	20.0	9.0	6.0	8.3	23.0
1993	2.3	6.9	5.8	0.0	27.0	31.0	0.0	26.0	105.0	64.4	4.6	0.8	105.0
1994	12.8	0.5	26.0	9.6	20.6	23.0	3.8	11.6	63.0	17.0	7.6	7.5	63.0
1995	5.5	2.8	4.5	1.2	4.5	13.3	5.8	60.7	10.0	6.6	6.8	10.0	60.7

Continuación													
1996	10.3	0.0	3.3	2.0	4.8	4.6	0.8	43.0	7.0	52.9	2.0	0.0	52.9
1997	7.8	5.0	9.0	31.5	54.5	7.8	1.3	4.5	60.0	65.2	24.0	2.8	65.2
1998	0.0	5.0	7.6	1.0	0.0	8.6	4.8	45.3	69.5	14.0	8.0	0.0	69.5
1999	0.0	0.0	7.8	2.6	0.0	14.0	69.8	82.0	35.0	13.0	0.0	3.4	82.0



**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
GERENCIA REGIONAL RIO BRAVO
SUBGERENCIA TÉCNICA
UNIDAD DE HIDROMETEOROLOGÍA**

DATOS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS MENSUALES EN mm.

ESTACIÓN: TOPO CHICO

MUNICIPIO: MONTERREY

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁXIMA ANUAL
1960	0.0	3.0	5.0	20.0	0.0	10.0	13.0	50.0	31.0	30.0	10.0	10.0	50.0
1961	6.0	0.0	6.0	0.5	0.0	91.0	9.0	18.0	30.0	62.0	9.0	0.0	91.0
1962	0.0	0.0	9.0	0.0	16.0	50.0	0.0	19.0	107.0	47.0	5.5	4.0	107.0
1963	0.0	6.0	3.4	60.0	33.5	19.0	36.0	19.0	28.0	0.0	1.5	1.9	60.0
1964	0.0	5.0	9.5	28.0	13.0	0.0	0.0	0.0	95.0	0.0	0.0	6.0	95.0
1965	4.0	8.0	6.0	17.0	17.0	6.0	9.0	22.0	48.0	6.0	0.0	17.0	48.0
1966	14.0	4.0	13.0	16.0	47.0	37.0	0.0	43.5	8.5	42.0	0.0	0.0	47.0
1967	5.0	8.0	0.0	42.0	68.0	28.0	65.0	116.0	121.0	60.5	12.0	1.0	121.0
1968	0.0	4.0	12.0	34.0	24.0	21.0	38.0	36.0	38.0	33.0	5.0	0.0	38.0
1969	2.0	6.5	0.0	10.0	17.5	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	17.5
1970	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	19.0	60.6	17.0	SD	2.0	60.6
1971	2.5	SD	SD	SD	12.0	21.0	20.0	6.6	93.0	11.0	5.0	5.0	93.0
1972	3.0	2.5	5.5	7.5	37.0	67.5	40.0	11.0	60.0	34.0	6.5	1.0	67.5
1973	12.0	14.0	0.0	5.0	5.0	134.0	15.0	49.0	31.0	57.0	12.8	9.0	134.0
1974	5.0	0.0	18.0	3.0	15.0	63.0	0.0	0.0	120.0	31.0	SD	SD	120.0
1975	8.5	SD	SD	8.5	30.0	3.0	91.0	41.5	21.0	18.0	1.5	22.0	91.0
1976	2.5	2.5	4.0	24.0	16.0	35.0	31.5	45.0	48.0	23.0	54.0	4.5	54.0
1977	7.0	16.0	5.5	23.0	49.0	10.0	2.0	61.0	90.0	124.0	0.0	4.0	124.0
1978	4.0	6.5	2.5	12.0	17.5	38.0	7.5	110.0	92.0	47.5	7.5	4.0	110.0
1979	2.0	SD	8.0	9.0	9.0	48.0	17.0	29.0	32.5	0.0	10.5	25.5	48.0
1980	2.0	5.5	0.0	4.5	43.0	14.5	12.0	83.5	32.5	40.0	27.0	4.0	83.5
1981	21.0	10.5	11.5	88.5	41.0	37.5	15.5	26.0	51.2	16.3	3.0	0.0	88.5
1982	0.0	4.5	SD	41.5	20.0	SD	20.0	7.5	35.5	34.5	17.5	37.5	41.5
1983	15.0	20.0	10.0	0.0	50.3	8.5	35.0	7.5	86.0	SD	SD	3.0	86.0
1984	40.0	0.0	0.0	SD	19.5	23.0	31.0	2.5	10.5	5.0	15.0	8.0	40.0
1985	9.0	18.0	22.0	48.5	27.0	56.5	11.5	16.0	6.0	20.5	3.0	4.5	56.5
1986	0.0	1.0	0.0	21.7	32.0	16.4	0.0	0.0	180.0	30.0	10.0	24.5	180.0
1987	11.8	13.0	18.5	25.5	12.0	34.0	20.0	27.0	31.0	25.0	7.3	1.9	34.0
1988	15.0	6.5	5.0	23.0	17.0	32.0	94.0	29.0	313.0	26.0	6.5	0.0	313.0
1989	10.0	8.0	3.0	24.5	8.0	7.2	88.0	24.0	31.0	2.0	4.5	19.0	88.0
1990	2.0	3.0	12.8	20.0	12.4	16.5	8.5	33.0	67.5	75.5	7.4	0.0	75.5
1991	3.4	3.0	3.0	24.0	31.0	69.0	7.0	14.0	40.0	42.0	15.0	31.5	69.0

Continuación													
1992	15.3	8.0	7.0	8.5	60.0	1.5	4.8	28.5	22.0	24.5	12.2	21.0	60.0
1993	6.4	6.0	5.0	3.3	68.0	44.2	0.0	6.0	65.2	15.0	4.2	2.0	68.0
1994	35.0	3.6	25.7	8.6	48.0	1.9	5.5	20.0	171.6	10.8	24.0	28.0	171.6
1995	4.5	3.0	3.0	2.0	30.0	SD	SD	0.0	0.0	1.5	16.0	8.0	30.0
1996	6.0	0.0	6.0	7.0	4.0	13.5	1.5	134.5	3.5	58.0	6.0	0.0	134.5

ANEXO III

Construcción de las curvas Intensidad - Duración – Período de retorno a partir de lluvias máximas

MC. VICTOR HUGO GUERRA COBIAN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Introducción

La *precipitación* es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico, proveniente de la atmósfera; es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua.

Los dispositivos empleados en la medición de la precipitación, son los *pluviómetros* y los *pluviógrafos* (ver fig. 1), aunque los mas comúnmente utilizados en el estado son los pluviómetros, los cuales registran lluvias máximas acumuladas en veinticuatro horas, y las lecturas son tomadas todos los días a las 8:00 a.m. como altura de lamina de agua en mm. Estos dispositivos se encuentran localizados a todo lo largo y ancho del estado y forman parte del equipo de las *estaciones climatológicas*.

En el estado de Nuevo León, existen 150 estaciones climatológicas, las cuales registran la precipitación, temperaturas (máxima y mínima) y *humedad relativa* básicamente.

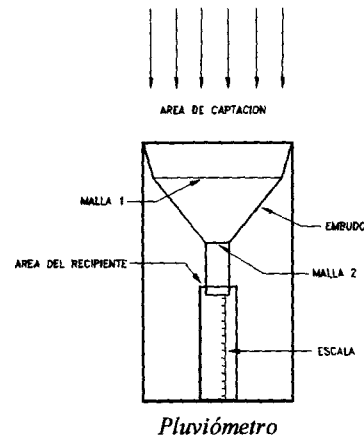
La *Comisión Nacional del Agua* a través de la *Gerencia Estatal* en Nuevo León es la encargada de recabar, capturar y procesar esta información.

Curvas I-D-Tr

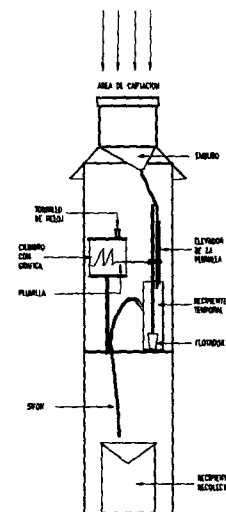
Ya que la *nieve* o el *granizo* no son muy frecuentes en el estado, podemos considerar que la precipitación en su totalidad esta formada por la *lluvia*, la cual se puede definir mediante tres variables: *magnitud*, *duración* y *frecuencia*. La magnitud de la lluvia es la precipitación total ocurrida (en milímetros) en la duración de la tormenta; la frecuencia se expresa por el *periodo de retorno* de la lluvia (1).

Las *Curvas I-D-Tr* representan una forma conjunta de las tres variables con las cuales se define la lluvia. La relación de la magnitud (*Intensidad*), duración y periodo de retorno, es un elemento básico e indispensable en el cálculo de las *Avenidas de Diseño*. Las cuales a su vez se utilizan en el dimensionamiento de estructuras hidráulicas tales como: puentes, alcantarillas, bordos, presas, drenajes pluviales urbanos, cunetas,

contracunetas, canales, determinación de los niveles de inundación en las márgenes de los ríos, etc.



Pluviómetro



Pluviógrafo
figura 1

Cociente Lluvia - Duración

Debido a la escasez de registros de lluvia de corta duración, ha surgido la necesidad de utilizar las relaciones promedio entre lluvias encontradas en otros países, las cuales se pueden aplicar a la República Mexicana (2).

Los registros de lluvias de corta duración son escasos en México; sin embargo, los de lluvias máximas diarias tienen gran densidad y períodos de registro aceptables, por lo cual, la lluvia con una duración de una hora y un período de retorno de dos años, se podrá evaluar con una relación a la de veinticuatro horas con igual período de retorno, denominada *cociente R* (ver tabla).

Valores del cociente "R" en 33 pluviógrafos de la República Mexicana

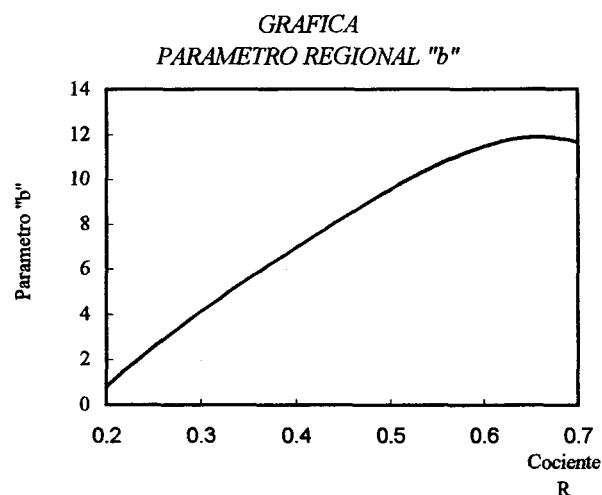
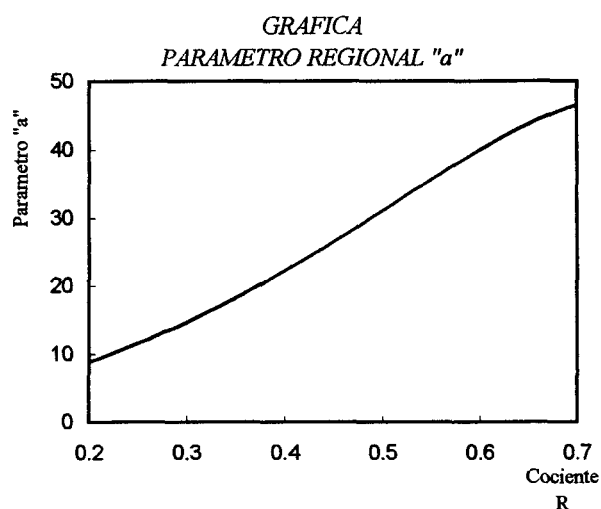
No	Estación	Estado	"R"
1	Magicaltzin	Tam.	0.4814
2	Tampico	Tam.	0.3360
3	Santa Rita	Gto.	0.6000
4	Colotlán	Jal.	0.4545
5	Guadalajara	Jal.	0.5747
6	Tepic	Nay.	0.2037
7	Tarsabaca	Slp.	0.2976
8	El Tuito	Jal.	0.4094
9	Tierra Blanca	Slp.	0.3947
10	Chinco Tepec	Ver.	0.3961
11	Mtz. De La Torre	Ver.	0.3835
12	Tecamachalco	Pue.	0.5871
13	Molino Blanco	Mex.	0.4500
14	San Pedro Nexapa	Mex.	0.6458
15	Tula	Tam.	0.4513
16	Presa La Angostura	Son.	0.6250
17	El Palmito	Dgo.	0.5038
18	Guamúchil	Sin.	0.6313
19	Armería	Col.	0.2843
20	Aguacaliente	Bcn.	0.2864
21	Monterrey	N.L.	0.3882
22	Vigas	Slp.	0.4967
23	Jasso	Hgo.	0.5072
24	Tula	Hgo.	0.6250
25	El Salto	Hgo.	0.6060
26	Cd. Sahagún	Hgo.	0.6140
27	Huejúcar	Jal.	0.3968
28	Durango Obs.	Dgo.	0.5555
29	J. Salomé Acosta	Dgo.	0.5043
30	Cazadero	Zac.	0.6140
31	Aguascalientes	Ags.	0.3833
32	Cañón Fernández	Dgo.	0.5637
33	Cd. Lerdo	Dgo.	0.5416

Cociente Lluvia - Período de Retorno

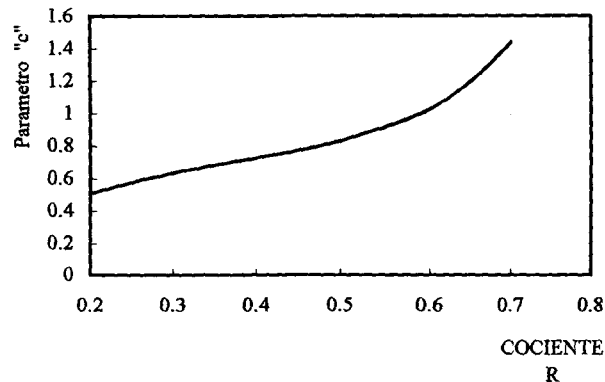
El *cociente F* lluvia - período de retorno, relaciona una lluvia de cien años de período de retorno y una duración de veinticuatro horas, con una lluvia de 10 años de período de retorno y una duración de veinticuatro horas. Esta relación es aplicable a la fórmula de Cheng-Lung Chen (3) para el cálculo de *alturas de precipitación* con períodos de retorno mayores o iguales a diez años.

Parámetros Regionales

Los parámetros regionales a, b, y c, aplicables a la fórmula de Cheng-Lung Chen para el cálculo de alturas de precipitación, se determinan en función del cociente lluvia - duración, de los siguientes gráficos:



GRAFICA
PARAMETRO REGIONAL "c"



Distribución de Probabilidades

Los registros con los datos de las lluvias máximas, se les puede dar un tratamiento desde el punto de vista probabilístico y estadístico, para dar una distribución mas aceptable a la información obtenida de las estaciones climatológicas. Dentro de las principales distribuciones de probabilidad aplicables a los registros de datos de lluvias están:

- 1.- Normal
- 2.- Log Normal
- 3.- Exponencial
- 4.- Gamma
- 5.- Pearson tipo III
- 6.- Log - Pearson tipo III
- 7.- Valores Extremos

La distribución de valores extremos a su vez se divide en:

- a) Tipo I (Gumbel)
- b) Tipo II (Frechet)
- c) Tipo III (Weibull)

Utilizando la Distribución de Valores Extremos Tipo I

Supóngase que se tienen N muestras, cada una de las cuales contiene "n" eventos. Si se selecciona el máximo "x" de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar (4) que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidades de x tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha * e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]}$$

donde α y β son los parámetros de la función, también se conocen como parámetro de ubicación y de forma, respectivamente.

Los parámetros α y β se estiman (5) como:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s}$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha}$$

Donde s es la *desviación estándar* de la población y \bar{x} es la *media aritmética* de la población y se obtienen mediante las siguientes fórmulas:

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

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

Donde n son los años del registro de las lluvias máximas en veinticuatro horas y x_i es el i-esimo dato en el registro.

Para muestras relativamente pequeñas σ_y y μ_y se obtienen de la siguiente tabla:

n	μ_y	σ_y
10	0.4952	0.9496
15	0.5128	1.0206
20	0.5236	1.0628
25	0.5309	1.0914
30	0.5362	1.1124
35	0.5403	1.1285
40	0.5436	1.1413
45	0.5463	1.1518
50	0.5485	1.1607
55	0.5504	1.1682
60	0.5521	1.1747
65	0.5535	1.1803
70	0.5548	1.1854
75	0.5559	1.1898
80	0.5569	1.1938
85	0.5578	1.1974
90	0.5586	1.2007
95	0.5593	1.2037
100	0.5600	1.2065

Calculo de las Alturas de Precipitación

El cálculo de las alturas de precipitación se puede realizar en base a los dos métodos siguientes (1):

a) Método de *Bell* para el cálculo de alturas de precipitación menores o iguales a diez años de período de retorno (6):

$$P_t^{Tr} = (0.35 \ln(Tr) + 0.76) (0.54(t)^{0.25} - 0.5) P_{60}^2$$

donde:

P_t^{Tr} = Altura de precipitación en mm. Para un período de retorno Tr y una duración de la tormenta t .

Tr = Período de retorno en años.

t = Duración de la tormenta en minutos.

El valor de P_{60}^2 se calcula despejándolo del cociente lluvia - duración R (1):

$$R = \frac{P_{60}^2}{P_{1440}^2}$$

$$P_{60}^2 = (R) (P_{1440}^2)$$

donde:

R = Cociente lluvia - duración.

P_{60}^2 = Altura de precipitación en un período de retorno de dos años y una duración de la tormenta de sesenta minutos.

P_{1440}^2 = Altura de precipitación para un período de retorno de dos años y una duración de la tormenta de veinticuatro horas en minutos, y se calcula (4):

$$P_{1440}^2 = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right)$$

b) Método de *Cheng-Lung Chen* para el cálculo de alturas de precipitación mayores o iguales a diez años de período de retorno (3):

$$P_t^{Tr} = \frac{a \cdot P_{60}^{10} \cdot \log(10^{2-F} \cdot Tr^{F-1}) \cdot t}{60 \cdot (t+b)^c}$$

donde:

P_t^{Tr} = Altura de precipitación en mm. Para un período de retorno Tr y una duración de la tormenta t .

Tr = Período de retorno en años.

t = Duración de la tormenta en minutos.

a, b, c = Parámetros regionales en función del cociente lluvia - duración R (ver gráficas).

P_{60}^{10} = Altura de precipitación en mm. Para un período de retorno de diez años y una duración de sesenta minutos; calculada de la fórmula de Bell:

$$P_{60}^{10} = (0.35 \ln(10) + 0.76) (0.54(60)^{0.25} - 0.5) P_{60}^2$$

F = Cociente lluvia - período de retorno.

$$F = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}} = \frac{P_{1440}^{100}}{P_{1440}^{10}}$$

$$\frac{P_{1440}^{100}}{P_{1440}^{10}} = \frac{\beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\ln \left(\frac{100}{100-1} \right) \right)}{\beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\ln \left(\frac{10}{10-1} \right) \right)}$$

donde:

P_{1440}^{100} = Altura de precipitación en mm. Para un período de retorno de 100 años y una duración de veinticuatro horas en minutos.

P_{1440}^{10} = Altura de precipitación en mm. Para un período de retorno de 10 años y una duración de veinticuatro horas en minutos.

Calculo de las Intensidades de la Lluvia

Como la lluvia se presenta en función del tiempo, la intensidad de la lluvia es por lo tanto directamente proporcional a la altura de precipitación e inversamente proporcional al tiempo. Por cual podemos definir la intensidad de la lluvia "I" en mm/hr. Mediante la relación:

$$I_v^{Tr} = \frac{P_t^{Tr}}{t'}$$

donde:

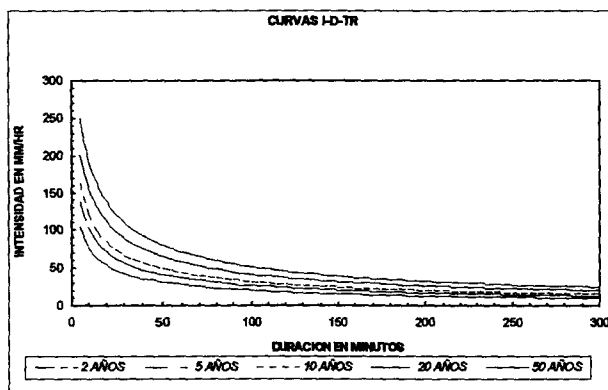
I_v^{Tr} = Intensidad de la lluvia en mm/hr. Para un periodo de retorno Tr en años y una duración t' en horas.

P_t^{Tr} = Altura de precipitación en mm. Para un periodo de retorno Tr en años y una duración de la tormenta en mm.

t' = Duración de la tormenta en horas.

Curvas I-D-Tr del Observatorio Meteorológico Mty.

Ejemplo de la construcción de las curvas Intensidad - Duración - Periodo de retorno, en base al método descrito, para la estación climatológica "Observatorio Meteorológico Monterrey" en el municipio de San Nicolás de los Garza, N.L., para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años.



Referencias

- (1) Campos, A., D. F., Procesos del ciclo hidrológico, inciso 4.6: Procesamiento estadístico de lluvias máximas diarias, pp. 4-46 a 4-52, Editorial Universitaria Potosina, México, primera reimpresión, 1987.
- (2) Goswami, A. C., "Short Duration Rainfall Depth-Duration-Frequency Map of India", Proc. of the second International

Symposium in Hydrologic Data, pp. 48-59. Fort Collins, Co., USA, septiennre 1972.

- (3) Chen, C-L, "Rainfall Intensity-duration-frequency formulas", Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol., 109, núm. 12, paper núm. 18441, pp. 1603-1621, 1983.
- (4) Gumbel, E-J, Statistics of Extremes. Colombia Univ. Press, 1958.
- (5) Kite, G-W., "Frequency and risk analysis in hydrology".
- (6) Bell, F-C., Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships, proc. ASCE, Journal of Hydraulics Div., Vol 95, núm. HY1, pp. 311-327, 1969.

ANEXO IV

Media y datos máximos de la intensidad de la lluvia (mm/hr) por subcuenca, para una duración de la lluvia de 5 minutos y un período de retorno de 20 años.

Subcuencas	Intensidad (mm/hr)	
	media	máx
1	131.01	138.84
2	124.64	132.36
3	138.29	138.94
4	137.64	138.86
5	135.62	143.08
6	131.05	136.59
7	113.46	130.54
8	130.84	136.55
9	121.84	152.85
10	108.03	129.78
11	96.66	117.00
12	106.03	119.85
13	128.79	138.00
14	148.70	179.33
15	121.00	128.08
16	129.10	139.54
17	115.47	124.00
18	114.28	123.14
19	124.09	129.83
20	143.53	150.69
21	159.74	168.81
22	134.94	141.52
23	156.30	159.90
24	116.36	123.18
25	125.35	136.75
26	153.11	160.76

VII. BIBLIOGRAFIA

ASCE (American Society of Civil Engineers). 1997. *Flood-Runoff Analysis. Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the U.S. Corps of Engineers*. ASCE Press. Pp: 3-6.

Burnash, R.J.C., R.L. Ferral, and R.A. McGuire. 1973. *A Generalized Streamflow Simulation System-Conceptual Modeling for Digital Computers*. U.S. National Weather Service. Joint Federal State Forecast Center. Sacramento, C.A.

Bureau of Land Reclamation, 1986. *Diseño de presas pequeñas*. Editorial Continental, México. 625 pp.

Crawford, N.H. and R.K. Linsley. 1966. *Digital Simulation in Hydrology:Stanford Watershed Model IV*. Technical Report No. 39. Department of Civil Engineering. Stanford University.

Chen, C-L. 1983. *Rainfall Intensity-duration-frequency formulas*. *Proc.ASCE*. Journal of Hydraulic Engineering.109(12):1603-1621 pp. In: Guerra, V.H. 1999. *Construcción de Curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno a partir de Lluvias Máximas*. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Chow, Ven Te, D. R. Maidment, L.W. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill. Colombia. 583 pp.

Collins Jr, F.C. 2001. *A Comparision of Spatial Interpolation Techniques in Temperature Estimation*. Resource Management and Distributed Systems, IBM Government Systems. http://www.sbg.ac.at/geo/idrisi/gis_envi...ling/sf_papers/collins_fred/collins.html.

DeVantier, B.A. and A.D. Feldman. 1993. *Review of GIS Applications in Hydrologic Modeling*. Journal of Water Resources Planning and Management, (ASCE) 119(2):246-261 pp.

ESRI.1992. Cell-based Modeling with GRID 6.1. Supplement: Hydrologic and distance modeling tools. Arc Info user's guide. Environmental Systems Research Institute, Inc. pp: 2-17.

GIS Development.net. 2000. *Water Resources*.

http://www.gisdevelopment.net/application/water_resources/app_water_home.htm

González G. R. 1973. *La lluvia en Monterrey, Nuevo León. Estudio Cronológico y Probabilístico*. Boletín Bimestral de la División de Ciencias Agropecuarias y Marítimas del I.T.E.S.M. 147:1-7 pp.

González G.R. 1967. *Los ciclones en el Golfo de México*. Boletín Bimestral de la Escuela de Agricultura y Ganadería del ITESM. 111:1-15 pp.

Guerra, V.H. 1999. *Construcción de Curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno a partir de Lluvias Máximas*. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Hori Ochoa, Ma. Del C. 1998. *Variabilidad de las Respuestas Espectrales de acuerdo a los cambios Fenológicos de la Vegeación del Anticlinorio de Arteaga, Coahuila y Nuevo León, México*. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México. 136 pp.

Hutchinson, M.F. 1989. *A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits*. Journal of Hydrology. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam. 106:211-232 pp

Hutchinson, M. 2001. *Modelling Spatial and Temporal Variability of Climate and Terrain*. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University. Canberra, Australia. <http://www.cres.anu.au/hydweb/hutch/hutch2.html>

INEGI. 1975. *Carta Topográfica: Monterrey (G14-C26), Escala 1:50,000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F.

INEGI. 1986. *Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León*. Instituto Nacional de Estadística. Geografía e Informática. México, D.F. 170 pp.

INEGI, CCFF y USFNS. 1998. Carta de transformación de la cubierta vegetal, escala 1:50,000, de la porción central del estado de Nuevo León. Pp:110.

INEGI. 2002. Modelos Digitales de Elevación. <http://www.inegi.gob.mx>

Legates, D.R. and C.J. Willmott. 1990. Mean Seasonal and Spatial Variability in Global Surface Air Temperature, *Theor. Appl. Climatol.*, (41):11-21 pp. In: Collins Jr, F.C. 2001. *A Comparison of Spatial Interpolation Techniques in Temperature Estimation*. Resource Management and Distributed Systems, IBM Government Systems.
http://www.sbg.ac.at/geo/idrisi/gis_envi...ling/sf_papers/collins_fred/collins.html.

Llamas, J. 1993. *Hidrología General, principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Bilbao. Pp: 402.

López Cadenas de Llano, F. 1990. El papel del bosque en la conservación del agua y el suelo. *Rev. Ecología*. ICONA. Madrid

Maidment, D.R.1991. *GIS and hydrologic modeling. First International Conference/Workshop on Integrating Geographical Information Systems and Environmental Modeling*. National Center for Geographic Information and Analysis. Boulder CO. In Schultz, G .1991. *Integration of GIS in a Coastal Watershed Analysis*. <http://hydrate.eas.gatech.edu/qms/gis99.html>

Maidment, D.R., 1992 a. *Grid-based Computation of Runoff: A Preliminary Assessment*. Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. Davis, California. Contract DACW05-92-P-1983.

Maidment, D.R., 1992 b. *A Grid-Network Procedure for Hydrologic Modeling*. Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. Davis, California. Contract DACW05-92-P-1983.

Maidment, D.R. 1993. *Developing a Spatially Distributed Unit Hydrograph by Using GIS, in HydroGIS 93*. Ed. by K. Kovar and H.P. Nachtnebel. Int. Assn. Sci. Hydrol. Publ. 211:181-192 pp.

Maidment, D.R. 1994. *Hydrologic Modeling Using Arc/Info. Seminar*. 14th Annual ESRI User Conference. Palm Springs, California. May 22.

Maidment, D.R., J.F. Olivera, A. Calver, A. Eatherral and W. Fraczek. 1996 a. *A Unit Hydrograph Derived From a Spatially Distributed Velocity Field*. Hydrologic Processes. John Wiley & Sons, Ltd. 10(6):831-844 pp.

Martz, L.W. and J. Garbrecht. 1992. *Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas from Digital Elevation Models, Computers and Geoscience*. 18(6): 747-761 pp.

McCuen, R.H. 1998. *Hydrologic Analysis and Design*. Department of Civil Engineering, University of Maryland. Second Edition. Prentice Hall Incorporated. Pp: 142.

Moore I.D. and R.B. Grayson. 1991. *Terrain-Based Catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data*. Water Resources Research. 27(6):1177-1191 pp.

Olivera, F., D.R. Maidment and R.J. Charbeneau. 1995. *Non-Point Source Pollution Analysis with GIS*. Proceedings. Spring Meeting. ASCE Texas Section. April 26-28, Waco, Texas. 275-284 pp.

Olivera, F., and D.R. Maidment. 1996. *Runoff Computation Using Spatially Distributed Terrain Parameters*. Proceedings, ASCE. North American Water and Environment Congress '96 (NAWEC '96), Anaheim, California, June 22-28.

Olivera, F., D. R. Maidment and R. J. Charbeneau. 2001. Spatially Distributed Modeling of Storm Runoff and Non-Point Source Pollution Using Geographic Information Systems (GIS). CRWR Online Report 96:4 pp.

Rinaldo, A., I. Rodriguez-Iturbe, R. Rigon, R.L. Bras, E. Ijjasz-Vasquez and A. Marani. 1992. *Minimum Energy and Fractal Structures of Drainage Networks*. Water Resources Research. 28(9):2183-2195 pp.

Rzedowki, J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa S.A. México. Pp.432.

Sánchez, O. y A. Zaragoza. 1989. *El Río Fiera, Bramaba*. Cuadernos del Archivo, No.35. Archivo General del Estado. Monterrey, Nuevo León. 125 p.

Saunders, W.K. and D.R. Maidment. 1995. *Grid-Based Watershed and Stream Network Delineation for the San Antonio-Nueces Coastal Basin*. Presented at Texas Water '95, August 14-18, San Antonio, Texas.

Storck, P., L. Bowling, P. Wetherbee, D. Lettenmaier. 2000. *Application of a GIS-Based Distributed Hydrology Model for Prediction of Forest Harvest Effects on Peaks Streamflow in the Pacific Northwest*. <http://www.ce.washington.edu/~pxs/gis.html>

SURFER for Windows. 1994. User's Guide. Golden Software, Inc. Golden, Colorado, U.S.A. In: Lynch, S.D. and R. E. Schulze. 2001. *Techniques for Estimating Areal Daily Rainfall*. Department of Agricultural Engineering, University of Natal. <http://www.ccwr.ac.za/~lynch2/p241.html>

Torres, E. y M.A. Santoscoy. 1985. *La historia del agua en Monterrey desde 1577 hasta 1985*. Ediciones Castillo. Monterrey, N.L. México.

TRAGSA, TRAGSATEC Y MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 1998. *Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental. Ediciones Mundi-Prensa. 2ª Edición. 945 pp.

UNYSIS Weather Homepage. 2000. *Archive 1886-1998*. Hurricane Tropical Data, <http://www.weather.unisys.com/hurricane/>

Viessman, W. Jr and G.L. Lewis. 1996. *Introduction to Hydrology*. Harper Collins College Publishers. Fourth Edition. 757 pp.

Vieux, B.E. 1991. *Geographic Information Systems and Non-Point Source Water Quality and Quantity Modeling*. *Hydrological Processes*. 5:101-113 pp.

Vieux, B.E. 1993. *DEM Agregation and Smoothing Effects on Surface Runoff Modeling*. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 7(3):310-338 pp.

Vieux, B.E. and S. Needham, 1993. *Nonpoint-Pollution Model Sensitivity to Grid-Cell Size*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 119(2):141-157 pp.

Centro de Información-Biblioteca



30002006141121