



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

MAPEO GEOMORFOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN
DEL PELIGRO POR EROSIÓN HÍDRICA ACELERADA EN
LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A :

VÍCTOR MANUEL ORTEGA CHÁVEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JORGE LÓPEZ BLANCO

Ciudad Universitaria, México, D. F., agosto de 2008.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por recibirme y apoyar mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo que recibí durante mi estancia en el posgrado.

Al Dr. Jorge López Blanco, por su consejo, apoyo, amistad y paciencia, y más por la dirección de esta tesis.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, Dr. José Ramón Hernández Santana, Dr. Gilberto Vela Correa y la Dra. Guadalupe Tapia Varela, por su paciencia e interés en la revisión de este documento para enriquecerlo más.

A mis profesores del posgrado, porque compartieron sus conocimientos generosamente.

A Gloria, Eduardo, Fabiola y Belinda

A mis Padres, Aurora y Rosalío

A mis Hermanos

*“Pueden parecer pobres nuestras reflexiones ante los demás, aun sin serlo,
pero tal juicio no alivia la carga del esfuerzo que cuesta alcanzarlas.”*

José Vasconcelos

Índice

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Justificación	4
1.3. Hipótesis	8
1.4. Objetivo general	8
1.5. Objetivos particulares	8
1.6. Materiales	9
1.7. Esquema de la tesis	10
2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	13
2.1. Localización del área de estudio	13
2.2. Geología y estratigrafía	14
2.2.1. Estratigrafía	14
2.2.1.1. Rocas de edad mesozoica	14
2.2.1.2. Rocas de edad cenozoica	17
2.2.2. Geología estructural	21
2.2.2.1. Tectónica de las rocas de edad mesozoica	21
2.2.2.2. Tectónica de las rocas cenozoicas	21
2.3. Clima	25
2.4. Hidrografía	28
2.5. Edafología	29
3. METODOLOGÍA	35
3.1. Geomorfología de la cuenca	37
3.1.1. Mapa geomorfológico analítico	38
3.1.2. Mapa geomorfológico de tipo morfodinámico, a escala 1:20, 000	42
3.2. Análisis hidrológico de la cuenca	46
3.2.1. Descripción hidrográfica de la cuenca	46
3.2.2. Análisis de homogeneidad y aleatoriedad de los registros de lluvia	47
3.2.3. Construcción de tormentas sintéticas	49
3.2.3.1. Periodo de retorno, T.	49
3.2.3.2. Funciones de distribución utilizadas	49
3.2.3.3. Predicción de avenidas en cuencas no aforadas	49
3.2.3.3.1. Cálculo del hidrograma de entrada	50
3.2.3.3.1.1. Selección de la duración total y de los intervalos de tiempo	50
3.2.3.3.1.2. Obtención de las curvas I-D-Tr	50
3.2.3.3.1.3. Corrección de la altura de lluvia por área	53
3.2.3.3.1.4. Cálculo del hietograma de diseño	54

	Página
3.2.3.3.2. Cálculo de la infiltración potencial en la cuenca	54
3.2.3.3.3. Transformación de la lluvia efectiva a escurrimiento	55
3.2.3.3.3.1. Hidrograma Unitario Instantáneo (HUI)	55
3.2.3.3.3.2. Cálculo del Hidrograma Unitario Sintético, Método de Chow	56
3.2.3.3.3.3. Hidrograma Unitario Triangular	56
3.2.3.3.3.4. Hidrograma Unitario Adimensional, método del Soil Conservation Service, SCS	57
3.3. Cálculo de la erosividad de la lluvia	58
3.4. Análisis espacial y temporal del uso del suelo y cobertura vegetal, de la carta a escala 1:50,000 de 1977 y por fotointerpretación de ortofotos a escala 1:20,000, para los años de 1993 y 2003	60
3.5. Evaluación del peligro de erosión hídrica por lógica difusa, en la cuenca del Río Guanajuato	67
3.5.1. Descripción y cálculo de las variables biofísicas de la cuenca	71
3.5.1.1. Inclinación de la pendiente	71
3.5.1.2. Longitud de la ladera	72
3.5.1.3. Uso del suelo y cobertura vegetal	72
3.5.1.4. Erosividad de la lluvia	73
3.5.1.5. Erodabilidad del suelo	74
3.5.2. Resultados de las operaciones aplicadas en el análisis por lógica difusa	75
3.5.2.1. Producto algebraico	75
3.5.2.2. Suma algebraica	76
3.6. Comparación de resultados obtenidos por lógica difusa con la información del mapa morfodinámico	76
3.6.1. Resultado del producto de valores difusos con la información morfodinámica	76
3.6.2. Resultado de la suma de valores difusos con la información morfodinámica	77
4. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA	79
4.1. Mapa geomorfológico analítico	79
4.1.1. Morfometría	79
4.1.2. Morfogénesis	79
4.2. Mapa geomorfológico morfodinámico, a escala 1:20, 000	91
5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA	95
5.1. Descripción hidrográfica de la cuenca	95
5.2. Análisis de homogeneidad y aleatoriedad de los registros de lluvia	97
5.3. Construcción de tormentas sintéticas	98
5.4. Cálculo de la erosividad de la lluvia	114

	Página
6. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DEL USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL, DE LA CARTA A ESCALA 1:50,000 DE 1977 Y POR FOTOINTERPRETACIÓN DE ORTOFOTOS A ESCALA 1:20,000, PARA LOS AÑOS DE 1993 Y 2003	116
6.1. Resultados	116
7. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE EROSIÓN HÍDRICA POR LÓGICA DIFUSA	130
7.1. Resultados	130
7.1.1. Inclinación de la pendiente	130
7.1.2. Factor de longitud de la ladera	131
7.1.3. Uso del suelo y cobertura vegetal	132
7.1.4. Erosividad de la lluvia	133
7.1.5. Erodabilidad del suelo	134
7.2. Resultados de las operaciones aplicadas en el análisis por lógica difusa	137
7.2.1. Producto algebraico	137
7.2.2. Suma algebraica	138
7.3. Comparación de resultados obtenidos por lógica difusa con la información del mapa morfodinámico	140
7.3.1. Resultado del producto de valores difusos con la información morfodinámica	140
7.3.2. Resultado de la suma de valores difusos con la información morfodinámica	141
8. CONCLUSIONES	144
BIBLIOGRAFÍA	148
ANEXOS	157

Índice de Figuras

	Página
Figura 1.1. Ortofoto en perspectiva. La línea roja indica el terreno con erosión en cárcavas, localizadas en La Yerbabuena.	5
Figura 1.2. Vista de la ciudad de Guanajuato en dirección Este, para ilustrar la ladera que generó un flujo concentrado, posteriormente se construyó el muro de mampostería.	6
Figura 2.1. Localización del área de estudio.	13
Figura 2.2. Mapa de la Sierra de Guanajuato, así como de los materiales y estructuras dominantes, que rodean e integran al área de estudio (Nieto-Samaniego, 1992; Randall <i>et al.</i> , 1994; Aranda-Gómez <i>et al.</i> , 1989; Quintero-Legorreta, 1992).	16
Figura 2.3 Relieve de la cuenca visto desde el sur, con las estructuras dominantes.	22
Figura 2.4 Mapa Geológico de la cuenca, además de la temporalidad y estratigrafía de las rocas	24
Figura 2.5. Tipos de climas en la cuenca.	26
Figura 2.6. Clasificación textural (horizonte edafológico A1, figura adaptada del manual de suelos del USDA, 1953).	32
Figura 2.7. Mapa de edafología de la cuenca.	34
Figura 3.1. Esquema metodológico de trabajo	36
Figura 3.2. Detalle de erosión hídrica laminar y por salpicadura.	46
Figura 3.3. Erosión hídrica por microcauces y flujo subsuperficial.	46
Figura 3.4. Erosión hídrica en cárcavas y microcauces	46
Figura 3.5. Ajuste aplicado a la lluvia puntual por área (Campos, 1984)	53
Figura 3.6. Valores típicos de Z, con respecto a la duración efectiva y el tiempo de retraso (Aparicio, 2003).	57
Figura 3.7. Curva del hidrograma unitario adimensional del SCS (Aparicio, 2003).	58
Figura 3.8. Índice de ortofotos escala 1:20, 000 (INEGI, 1993).	64
Figura 3.9. Escena estereoscópica del relieve. A la izquierda, hay trazos entre diferentes asociaciones de vegetación y uso del suelo (use estereoscopio de bolsillo).	65
Figura 4.1. Intervalo de elevación del terreno al interior de las UM	82
Figura 4.2. Mapa de unidades morfogénicas.	83
Figura 4.3. Mapa topográfico del área de estudio.	88
Figura 4.4. Modelo Digital del Terreno, MDT.	89
Figura 4.5. Inclinación de la pendiente.	90
Figura 4.6. Mapa morfodinámico.	95
Figura 5.1. Mapa de la red hidrográfica y el orden de las corrientes.	96
Figura 5.2. Polígonos de Thiessen, localizados al interior y en las cercanías de la cuenca del río Guanajuato.	99
Figura 5.3. Isoyetas de altura de lluvia total, en la cuenca del río Guanajuato.	101

	Página
Figura 5.4. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 7.	103
Figura 5.5. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 73.	104
Figura 5.6. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 85.	105
Figura 5.7. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 94.	105
Figura 5.8. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 103.	106
Figura 5.9. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 121.	107
Figura 5.10. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 124.	107
Figura 5.11. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 137.	108
Figura 5.12. Isoyetas de altura de lluvia en la cuenca del río Guanajuato.	110
Figura 5.13. Mapa de erosividad de la lluvia.	115
Figura 6.1. Resumen de superficie que abarca cada clase por uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca, por fecha de levantamiento.	122
Figura 6.2. Relación de cambios, por periodos, para cada uso del suelo y cobertura vegetal, en la cuenca.	123
Figura 6.3. Esquema general que ilustra las relaciones que originan los cambios de uso del suelo y cobertura vegetal al interior de la cuenca.	124
Figura 6.4. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca, para 1977.	126
Figura 6.5. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca, para 1993.	127
Figura 6.6. Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca, para 2003.	128
Figura 6.7. Mapa de áreas de la cuenca con y sin cambios, periodo 1977-1993.	129
Figura 6.8. Mapa de áreas de la cuenca con y sin cambios, periodo 1993-2003.	129
Figura 7.1. Función de pertenencia resultante para los datos de la variable S .	130
Figura 7.2. Descripción de la función de pertenencia de los datos de la variable L .	132
Figura 7.3. Función de pertenencia de la erosividad de la lluvia.	134

	Página
Figura 7.4a. Índice de pertenencia para la inclinación de la pendiente en la erosión hídrica acelerada.	136
Figura 7.4b. Índice de pertenencia para la longitud de la ladera en la erosión hídrica acelerada.	136
Figura 7.4c. Índice de pertenencia para el uso del suelo y cobertura vegetal en la erosión hídrica acelerada.	136
Figura 7.4d. Índice de pertenencia para la erosividad de la lluvia en la erosión hídrica acelerada.	136
Figura 7.4e. Índice de pertenencia para la erodabilidad del suelo en la erosión hídrica acelerada.	136
Figura 7.5a. Resultado de la operación por producto de los valores de pertenencia.	139
Figura 7.5b. Resultado de la operación por suma de los valores de pertenencia.	139
Figura 7.6a. Coincidencia entre valores del producto difuso con el mapa morfodinámico.	143
Figura 7.6b. Coincidencia entre valores de la suma difusa con el mapa morfodinámico.	143

1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo se describe como la eliminación de partículas del suelo, en este proceso intervienen dos agentes el agua y el aire. La intensidad y la frecuencia con que ocurre el proceso de erosión están condicionadas tanto por las características climáticas, edáficas, tipo y grado de cubierta vegetal y por la alteración del paisaje debido a las actividades antrópicas, como por la construcción de caminos, campos agrícolas, deforestación, incendios, etc. La erosión del suelo se considera un peligro, siempre y cuando la velocidad con que se elimina el material supera la velocidad a la que se genera, incluso si se compara con tasas de otros fenómenos, como son los procesos de remoción en masa. A este fenómeno se le denomina erosión acelerada del suelo (Morgan, 1993).

La erosión hídrica ocurre cuando la fuerza provocada por la velocidad cinética de los flujos, genera la remoción y transporte de las partículas del suelo, durante el trayecto que toman los escurrimientos cuando circulan sobre el terreno. De forma que el agua que corre de modo superficial, elimina más rápidamente el suelo si tiene impacto sobre terrenos alterados por actividades antrópicas como puede ser la agricultura, el pastoreo, la deforestación, etc. (Kirkby, 1980 *cit.* en Kirkby y Morgan, 1993).

Profundizar en el conocimiento del medio permite analizar, evaluar e interpretar las múltiples interacciones que suceden entre los grupos humanos y el ambiente biofísico que los rodea. Para ello, existen ciencias y métodos diversos, que proporcionan herramientas y procedimientos para alcanzar objetivos que expliquen la dinámica espacial y temporal de los hechos pasados y presentes, y para develar los probables sucesos futuros. La geomorfología, apoya para obtener la información que permita crear el esquema evolutivo de determinada porción del terreno; estos cambios son generados por la interacción de múltiples eventos. Inclusive, esta ciencia tiene una aportación teórico-metodológica sobre temas ambientales como lo es la geomorfología ambiental, que Coates (1971) *cit.* en Panizza (1996), la definió como: “el uso práctico de la geomorfología en la solución de problemas, donde el hombre desea transformar o usar los procesos de la superficie terrestre”. Es decir, se analizan las relaciones entre el hombre y el ambiente que lo rodea. Incluso esta disciplina involucra varios temas de aplicación, entre los que destacan, el estudio de los procesos geomorfológicos que afectan al ser humano (incluye a los peligros naturales); otro tema es el análisis de problemas, en donde la actividad humana perturbe o degrade el ecosistema agua-tierra (Panizza, 1996). En esta relación medio natural-

antrópico concurren dos elementos como son los recursos geomorfológicos y los peligros geomorfológicos (Panizza, 1996).

Evaluar los peligros naturales se puede hacer desde dos enfoques; uno se centra en la interacción hombre-ambiente; en el que se explica, desde el punto de vista social, la presencia de los peligros naturales (Dombrowsky, 1995); otro se centra en entender el medio biofísico, en el cual múltiples agentes modelan y estructuran el paisaje a escala global, regional y puntual, buscando comprender el vínculo de dichos eventos al entorno social (Hewitt, 1983).

Por tal motivo, los peligros geomorfológicos se definen como la probabilidad de daño potencial, en la que cierto fenómeno con inestabilidad geomorfológica y de una determinada magnitud, que puede aparecer en un cierto territorio con cierta frecuencia de ocurrencia (van Westen, 1994; Panizza, 1996). Entonces, cuando se transforma el relieve por la acción humana, esta acción se denomina actividad humana, y todo ente de tipo económico, cultural, social, es el *área vulnerable*. Aparece, una sinergia entre el uso de los recursos geomorfológicos y la actividad humana, la cual al generar modificaciones o alteraciones del medio natural, provoca el *impacto ambiental* y cuando se afectan a los elementos vulnerables, por un peligro geomorfológico, se provoca un *riesgo*. Luego, los riesgos geomorfológicos están conectados a los peligros geomorfológicos y a la vulnerabilidad de un ente antrópico (van Westen, 1994; Panizza, 1996), es por eso que el peligro es el reflejo de la inestabilidad geomorfológica, ya que es la probabilidad de sufrir consecuencias negativas, de tipo económico y social, por efecto de ocurrencia de un fenómeno en particular, dentro de un lapso determinado.

Los peligros naturales se pueden clasificar con respecto a los agentes que los originan ó los efectos que producen. Una forma de hacerlo, es usando una matriz que los agrupe por tipos (Smith, 1996), en la cual se muestran tanto eventos de origen natural como tecnológicos y sociales (antrópicos); los cuales pueden tener un impacto intenso (puntual) o difuso (disperso) sobre el ente que las asimila o padece. Smith (1996) añade a la presencia del evento, la variable denominada voluntaria o involuntaria, que define el grado de responsabilidad humana, para mostrar los efectos que produce una acción determinada sobre el ambiente (social y humano). Otra clasificación se ha hecho con base en el tipo de agente perturbador, como: atmosféricos, hidrológicos, geológicos, biológicos y tecnológicos (Smith, 1996); otra, fue hecha con base en el medio que predomina y de la situación geográfica (Hart, 1986), como: estructuras principales (volcanes y sismos), degradación de materiales por intemperismo, fluvial, inestabilidad de

laderas, costero, árido y semi-árido, periglacial y glacial. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil tiene una clasificación con base en el tipo de agente, específicamente: geológico, hidrometeorológico, químico, sanitario y socio-organizativo (CENAPRED, 2004). En la categoría de tipo geológico se enuncian los sub-tipos: sismos, volcanismo, tsunamis y movimientos de laderas y suelos. Cada agente, genera procesos con frecuencias de ocurrencia variables y de intensidades diversas, es donde la evaluación y el análisis del medio, permite relacionarlo con el grado de vulnerabilidad humana.

1.1. ANTECEDENTES

La ciudad de Guanajuato presenta, hoy día, un crecimiento urbano que ha provocado la invasión de áreas en laderas que presentan inclinaciones que alcanzan valores superiores a los 45°. Las lluvias intensas han generado eventos de erosión por flujo concentrado, en diversos puntos de la cuenca (Correo, 2003), por efecto de la interacción entre el grado de alteración de los materiales, la cantidad de agua precipitada y los cambios de uso de suelo generados por la actividad humana. Estos eventos tienen una localización sobre las secciones de corte de carreteras y sobre laderas que contienen material no consolidado, junto con basura y material de construcción de desecho.

En la ciudad de Guanajuato, las autoridades no tienen mecanismos de prevención para tales peligros, quizá porque no se han presentado en volumen y frecuencia importantes, ó por el hecho de que no han afectado de modo radical a la población (GEG, 2001). En el documento Atlas de Riesgos del Estado de Guanajuato de 2001, se hace una descripción de los distintos fenómenos meteorológicos extremos y sus efectos negativos, que se han registrado en cada uno de los municipios del Estado, haciendo sólo una descripción de dónde ocurrió, y a qué tipo de génesis se vincula el evento (lluvia, escurrimiento, sequía, granizo). Otro tema es el referente a los “peligros químicos”, haciendo una descripción de los puntos de peligro en cada municipio, indicando el tipo de elemento químico y las características del uso del suelo que lo circunda; tales como áreas industriales, gasolineras, entre otras.

En el Atlas de Riesgos del Estado de Guanajuato (GEG, 2001), no aparecen trabajos de investigación por localidad ó ciudad, que trate temas de procesos de laderas, principalmente de remoción en masa, de tránsito de avenidas en cauces, simulación de áreas de inundación, entre otros muchos temas que deberían ser analizados a profundidad; pareciera el documento un

inventario de las actividades sociales y económicas en los municipios del Estado, que han sufrido algún daño por algún evento natural extremo. El Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, menciona datos generales de los municipio que padecen los problemas relacionados con la erosión, siendo la escala de trabajo 1:250,000, y su fuente de información es la Coordinación de Protección Civil (GEG, 1999).

Es difícil precisar la ubicación y el grado de peligro con el que ocurre la erosión hídrica al interior de la cuenca, ya que no hay información cartográfica o estadística. Por ejemplo, en la cuenca, un año de lluvia promedio, es el que alcanza un acumulado mayor a 600 mm (INEGI, 1998b), esta información no expresa la distribución espacial y temporal de las tormentas para cada año. Sin embargo, las intensidades de las tormentas son muy variadas a lo largo de la cuenca y la forma en que la lluvia interacciona con el relieve depende de otras variables. Esta variación espacial y temporal de las tormentas de lluvia, se puede evaluar mediante el análisis de tormentas pequeñas y de intensidad baja, ya que alteran el suelo de igual manera a una tormenta intensa con un periodo de retorno de 200 años. Morgan (1995) indica que en la época del año en que el suelo permanece sin vegetación la lluvia puede provocar eventos erosivos hídricos con resultados dañinos irreversibles. Estos periodos de lluvia ocurren al principio de la época de lluvias, y son los que afectan más al suelo por su erosividad elevada.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En diversas regiones de América Latina y África, los procesos de erosión acelerada del suelo son originados por factores sociales, tanto de índole económico, como cultural, en forma de sobreexplotación de los recursos naturales o por la aplicación de técnicas de manejo inadecuadas para suelos y agua (FAO, 1992; 1997). El suelo es la capa superior de la corteza terrestre que funciona para sostener a la vegetación, y es a su vez el sustento de otras formas de vida, depende de condiciones específicas para su formación durante lapsos de tiempo largos.

Algunos de los procesos que se involucran en su formación son la meteorización de la roca madre, cambios continuos de temperatura, humedad, bacterias, vegetación, etc.; por ello se puede decir que por efecto de la erosión acelerada de suelos, ocurren un gran número de problemas que afectan la productividad económica, la infraestructura, la calidad de los suelos, e incluso rompe el equilibrio natural del funcionamiento de las cuencas. El efecto conocido como: degradación de la calidad del suelo, se manifiesta por el cambio de una o más de sus propiedades físicas ó químicas,

a causa de procesos que pueden ser físicos, químicos y/o biológicos (Figura 1.1) y ocurre en cuatro fases: degradación de la estructura del suelo, disminución de la materia orgánica, pérdida de partículas y pérdida de nutrientes (Morgan, 1995; Johnson *et al.*, 2000).

Algunos de los efectos negativos evidentes en el terreno, a causa de la alteración de los suelos, son una disminución del volumen de agua infiltrada al subsuelo, poca o nula producción agrícola; en otros casos, se genera e incluso se acelera la inestabilidad de laderas, se disminuye la superficie de cobertura vegetal, se acelera la deshidratación del suelo superficial (Inbar *et al.*, 1998; Bravard *et al.*, 1999; Ziegler *et al.*, 2001).

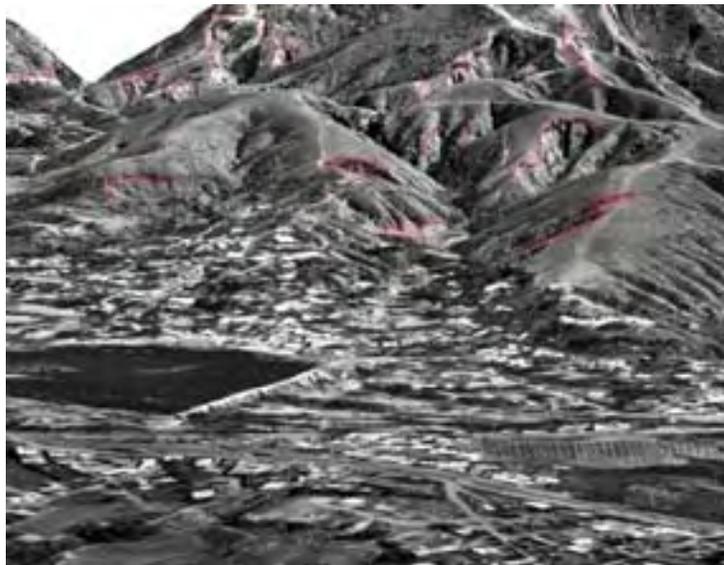


Figura 1.1. Ortofoto en perspectiva. La línea roja indica el terreno con erosión en cárcavas, localizadas en La Yerbabuena.

Se ha considerado estudiar la cuenca del río Guanajuato en el municipio del mismo nombre, pues existen trabajos como el de Hernández (1996) y Solís (1997), que evalúan la erosión potencial del suelo. En sus estudios estimaron la erosión potencial del suelo aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), e incluso estimaron la producción de sedimentos. Hernández (1996) fragmenta en dos subcuencas a la cuenca del río Guanajuato, con el fin de evaluar, de forma más detallada, la pérdida de suelos por erosión hídrica. Solís (1997), hace un trabajo más puntual sobre la cuenca, pues en el análisis delimitó microcuencas. Sus resultados destacan que las microcuencas localizadas al norte del área de estudio son las que arrojan valores muy altos y altos de erosión potencial calculada con EUPS. Ambos trabajos presentan información general de la condición que guarda el área de estudio.

En el Estado de Guanajuato no existen trabajos que muestren una localización y clasificación del proceso de erosión hídrica acelerada (GEG, 1999; 2001).

El mapa morfodinámico de la cuenca del río Guanajuato, refleja la aplicación de procedimientos geomorfológicos para explicar en un lenguaje cartográfico la ubicación de los sitios donde se genera la erosión de suelo. Este procedimiento de levantamiento cartográfico se obtuvo de la foto-identificación y trabajo de campo, por lo que se considera como una representación gráfica detallada, y que muestra las áreas que tienen rasgos de erosión hídrica acelerada.

La forma en que se clasifica a la erosión, es con base al análisis de las intensidades con que ocurre el proceso a través de la tasa de lluvia extrema, el cambio de uso de suelo, la eliminación de la cubierta vegetal (Fig. 1.2), el deshielo acelerado de masas glaciales o una combinación de los peligros mencionados, estos eventos han sido estudiados en diversas áreas del globo terráqueo por Sorriso-Valvo *et al.* (1999); Pareschi *et al.* (2000); Cannon *et al.* (2001); Crosta *et al.* (2003); Guzzetti *et al.* (2003); Havenith *et al.* (2003); Szabó (2003), ya que degradan de manera acelerada al ambiente.



Figura 1.2. Vista de la ciudad de Guanajuato en dirección Este, para ilustrar la ladera que generó un flujo concentrado, posteriormente se construyó el muro de mampostería.

El uso de la lógica difusa en la evaluación de recursos naturales para explotación, estimación de niveles de contaminación, etc., ha sido realizada por diversos investigadores entre ellos Bonham-Carter (1996); An *et al.* (1991) y Garmendia (2005).

Bonham-Carter (1996), usó la lógica difusa para evaluar el potencial de explotación de depósitos con contenido de oro y de la ubicación de agua subterránea extraíble por pozos. Las variables utilizadas en la selección de sitios potenciales de explotación de oro, fueron la litología, mediciones de antimonio en sedimentos de lagos, niveles de concentración de oro en los barrenos de muestreo y las distancias hasta los anticlinales presentes en la región. Para cada variable generó su función de pertenencia y las combinó con las operaciones de lógica difusa para valores mínimos y máximos, con el producto algebraico, la suma algebraica y la operación gama. En la evaluación de las áreas factibles de contener recursos hídricos de explotación, aparecen las variables de estratigrafía y texturas, inclinación de la pendiente, periodos de inundación por áreas, distancia a caminos principales, permeabilidad, litología, uso del suelo, distancia hasta las fronteras de la ciudad y sensibilidad ecológica.

An *et al.* (1991), aplicaron el análisis de lógica difusa en la interpretación geológica de datos geofísicos para localizar áreas potenciales de explotación de hierro y metales base (Ni-Cu, Au). Utilizan este tipo de método ya que consideran a la información aplicada como incompleta e imprecisa. Esta evaluación les ayudó a contrastar las hipótesis planteadas, de manera que al resolverlas encontraron un nivel de precisión más alto que el obtenido con métodos convencionales. La información usada para crear las funciones de pertenencia se representa en mapas como el magnetismo medido vía aérea y terrestre, litología, resistividad e imágenes electro-ópticas y multiespectrales por escaneo obtenidas por avión y satélite.

Garmendía (2005), realiza una explicación amplia sobre la forma en que la lógica difusa ha evolucionado con base a las aportaciones de diversos investigadores y de datos complementarios a partir de teorías nuevas. En su trabajo, explica la manera en que el concepto Medición se aplica a la lógica difusa, ya que no requiere de mediciones aditivas y de cantidades grandes de soluciones a problemas. Explica además, la definición de medición aditiva, la medición normal y medición difusa (es una medición monótona pero no se requieren de las características aditivas).

Las tormentas pluviales extremas (definidas tanto por su intensidad como por la duración del evento) provocan diferentes respuestas hidrológicas en el interior de la cuenca, siendo los efectos más evidentes la generación de gastos de escurrimiento, ya sea por la circulación superficial ó subterránea del agua, que está condicionada por la morfometría, las morfoestructuras, la morfogénesis, la vegetación y el uso del suelo; que provocan erosión laminar ó concentrada (Valdivia *et al.*, 2002).

1.3. HIPÓTESIS

En la interacción de las variables antrópicas y ambientales biofísicas, presentes en el proceso de erosión hídrica acelerada de la cuenca del río Guanajuato, existen relaciones dominantes, lo que provoca la intensificación del fenómeno, por lo que evaluarlas permitirá encontrar las variables que provocan la intensificación del proceso de erosión por acción del agua.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y analizar las variables hidrológicas, morfométricas, morfogenéticas y morfográficas, presentes en la cuenca del río Guanajuato, para encontrar las relaciones que generan el proceso de erosión hídrica acelerada, a través del criterio de índice de ponderación de clases mediante el método de lógica difusa, verificando los resultados mediante su comparación con el mapa morfodinámico de la cuenca.

1.5. OBJETIVOS PARTICULARES

Crear el mapa geomorfológico analítico de tipo morfogenético del relieve de la cuenca, por el criterio de homogeneidad relativa, para obtener el análisis detallado y la representación de esas unidades (génesis del relieve).

Crear el mapa geomorfológico analítico de tipo morfométrico que describa la amplitud de relieve, la orientación de las laderas y la inclinación y longitud de la pendiente del terreno.

Crear un mapa geomorfológico de tipo morfodinámico, en el que se destaquen los procesos erosivos de tipo hídrico, clasificados por su intensidad, a partir de la fotointerpretación de ortofotos digitales a escala 1:10,000, de edición 2004.

Evaluar los cambios de uso del suelo y cubierta vegetal en la cuenca, para los años de 1977, 1993 y 2003, a partir de la cartografía impresa en escala 1:50,000 y de la fotointerpretación de ortofotos de escala 1:20,000.

Obtener, analizar y procesar los datos diarios de lluvia por estación meteorológica, pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, localizadas dentro del área de estudio y en un radio de 20 km, para caracterizar la lluvia máxima en 24 horas por estación.

Transformar las alturas de lluvia máxima diaria, en intensidades de precipitación, al aplicarles una corrección por superficie de influencia, para definir la conformación espacial de las tormentas a lo largo del terreno de la cuenca. El valor de la intensidad ayudará a calcular los

valores de erosividad de la lluvia, además de obtener la altura de lluvia acumulada y efectiva para cada porción de la cuenca del río Guanajuato.

Evaluar las variables más representativas del relieve, clima, uso del suelo y cobertura vegetal, con operaciones de lógica difusa, mediante el uso de clases que representen el índice de pertenencia, para encontrar las relaciones que expliquen la presencia de eventos erosivos hídricos acelerados. El índice de pertenencia es el valor que explica si la clase de una variable incide en la generación y/o presencia de eventos erosivos hídricos acelerados.

Hacer una comparación de resultados entre la información morfodinámica y los datos obtenidos mediante lógica difusa. La coincidencia con mayor valor, que se obtenga entre los dos mapas, contendrá las relaciones que explican la presencia de eventos erosivos hídricos acelerados.

1.6. MATERIALES

La información que se lista en las Tablas 1.1, 1.2 y 1.3, es de documentos impresos como son fotografías aéreas y cartas topográficas y temáticas; y en formato digital las ortofotos del año 2004. La cartografía, se escaneó y georreferenció para obtener vectores de las curvas de nivel, polígonos que representan la edafología, el uso y tipo de cubierta vegetal del suelo, así como de la litología, que conforman el terreno de la cuenca. Con las fotografías impresas se utilizó el estereoscopio de espejos, para fotoidentificar las porciones de relieve homogéneas por origen general y específico, que definen a las unidades morfogenéticas. Estas fotografías se escanearon con los trazos con el fin de crear un mapa de vectores.

Las ortofotos digitales, a escala 1:20,000, sirvieron para generar visión estereoscópica a partir del modelo digital del terreno. Con el estereoscopio de espejos para PC, se trazaron las porciones de relieve que contienen procesos de erosión hídrica acelerada por acción del agua.

Tabla 1.1. Listado de fotografías aéreas impresas por el INEGI a escala 1:75,000, utilizadas en la fotoidentificación de las Unidades Morfogenéticas de la cuenca.

Número de línea de vuelo	Número de fotografía aérea	Fecha de la toma
146	15, 16, 17	Feb-94
145	1, 2, 3	Feb-94
144	16, 17	Feb-94
147	14, 15, 16, 17	Jun-93
146	1, 2, 3, 4	Jun-93
145	14, 15, 16, 17	Jun-93

Tabla 1.2. Listado de cartografía impresa, usadas en la creación de los mapas geomorfológicos.

Tipo de carta	Clave	Editor	Escala	Año de edición
Topográfica	F14C42	INEGI	1:50,000	1999
	F14C43	INEGI	1:50,000	2001
	F14C52	INEGI	1:50,000	1999
	F14C53	INEGI	1:50,000	2001
Uso del suelo y vegetación	F14C42	INEGI	1:50,000	1973
	F14C43	INEGI	1:50,000	1977
	F14C53	INEGI	1:50,000	1977
	F14C42	INEGI	1:50,000	1980
	F14C43	INEGI	1:50,000	1980
	F14C52	INEGI	1:50,000	1980
Geológico	F14C53	INEGI	1:50,000	1982
	F14C42	COREMI	1:50,000	2002
	F14C43	COREMI	1:50,000	1998
	F14C53	COREMI	1:50,000	2002
	F14-7	INEGI	1:250,000	1973
	F14-10	INEGI	1:250,000	1973
	F14-7	COREMI	1:250,000	1999
	F14-10	COREMI	1:250,000	1999
	8	INST. DE GEOL. UNAM	1:100,000	1992
	F14C42	INEGI	1:50,000	1973
Edafológico	F14C43	INEGI	1:50,000	1973
	F14C52	INEGI	1:50,000	1973
	F14C53	INEGI	1:50,000	1973

Tabla 1.3. Listado de ortofotos digitales, aplicadas en el mapeo morfodinámico de la cuenca, editados por el INEGI en escala 1:20,000.

Clave de ortofoto	Sub-clave	Año de edición
F14C43	D, E	1993 y 2003
F14C53	A, B, C, D, E, F	1993 y 2003

Además, se utilizó el documento Atlas de Riesgos del Estado de Guanajuato (GEG, 2001), el estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato elaborado en 1998 por el NEGI, el Cuaderno Estadístico Municipal de Guanajuato del INEGI de 2001 y la información climatológica, dentro y cercana, al área de estudio (registros de lluvia, temperatura y evaporación).

1.7. ESQUEMA DE LA TESIS

La erosión del suelo por acción de la lluvia y del escurrimiento directo, se denomina erosión hídrica, se presenta en tres etapas: dispersión, transporte y deposición de las partículas del suelo. De tal manera que la erosión del suelo ocurre en diferentes tipos e intensidades, por ejemplo, dispersión de material debido al impacto de las gotas de lluvia, arrastre de material fino por el flujo laminar, microcauces y cárcavas. Los factores que influyen en la generación del flujo superficial, en la dispersión y en el transporte del material son el clima y precipitación, relieve,

propiedades del suelo y roca madre, cubierta vegetal y actividad humana. Esta interrelación de variables permite describir los procesos erosivos intensos dentro de la cuenca del río Guanajuato.

En el capítulo 1, se proporciona una breve descripción del concepto de erosión hídrica y de peligro natural, y la forma en que la geomorfología ayuda desde diversas áreas de estudio (ambiental, morfometría, morfografía, morfogénesis, etc.) en la descripción del medio, evaluación y diagnóstico. Se presenta un listado del material cartográfico y de imágenes fotográficas aéreas usadas en el estudio, evaluación y diagnóstico de la cuenca del río Guanajuato.

En el capítulo 2, se describe la localización del área de estudio; además aparece la descripción geológica y edafológica de la cuenca. En el tema de geología, se ilustra la localización de los diferentes materiales y estructuras de la cuenca, donde se destaca la presencia de fosas tectónicas y su cobertura con base en su superficie. La descripción edafológica muestra la distribución que presentan los diversos tipos de suelo, y a partir de sus características físicas se ha realizado el cálculo hidrológico de la cuenca.

El capítulo 3, describe la metodología con que se ha trabajado. En ella se listan los procedimientos utilizados para hacer el análisis de las variables biofísicas consideradas en la evaluación geomorfológica de la cuenca. Las características del relieve evaluadas son el clima, edafología, geología, uso del suelo y cubierta vegetal, relacionados con los rasgos y eventos erosivos hídricos sobre la cuenca.

En el capítulo 4, se describe la cuenca desde su geomorfología, tanto por la morfogénesis, como por el aspecto morfodinámico. En el tema de morfogénesis, se han integrado datos del relieve como su forma, geometría, origen general y específico, representado en un mapa que ilustra la fragmentación del terreno en unidades. La descripción morfodinámica de la cuenca, se realizó a partir de la fotointerpretación de los rasgos de erosión hídrica acelerada, clasificados con base al tipo e intensidad.

El capítulo 5, presenta la descripción hidrológica de la cuenca, referente a los procesos que involucran a la lluvia y el escurrimiento. Se evalúa el tipo y grado de respuesta del relieve del área de estudio, con respecto a la presencia de tormentas extremas. Esto ayuda a ubicar las áreas donde se generan los escurrimientos superficiales cuantiosos relacionados con la presencia de fuerzas erosivas importantes, que junto a los valores altos de erosividad de la lluvia, provocan una intensificación de la erosión hídrica.

En el capítulo 6, se describe la información del uso del suelo y de la cubierta vegetal. Esta evaluación temporal y espacial de los cambios en la cuenca, ayudan a evidenciar las porciones de territorio más susceptibles de ser degradado aceleradamente. Estos inventarios de cambios de cobertura y uso del suelo se realizan para tres años en específico 1977, 1993 y 2003. Los datos ayudan a explicar la dinámica hidrológica de la cuenca, junto al aspecto morfodinámico del relieve por la presencia de rasgos erosivos acelerados.

En el capítulo 7, aparece el análisis de lógica difusa, que explica la interacción de las variables biofísicas que intervienen en el proceso de erosión hídrica acelerada. Para ello se ponderó cada variable descrita en clases. El resultado, es un mapa que presenta porciones de terreno con diversos índices de erosión hídrica acelerada. En la parte final del capítulo se confronta la información morfodinámica con los resultados del análisis de lógica difusa, para especificar el listado de las variables que intervienen en la generación y/o aceleración de los procesos erosivos hídricos en la cuenca del río Guanajuato, y para mostrar la correlación que existe entre los procesos morfodinámicos de la cuenca y la ponderación de las variables aplicada al análisis de lógica difusa.

En el capítulo 8 están las conclusiones referentes a los resultados obtenidos a partir de cada una de las evaluaciones hechas al relieve de la cuenca, entre ellas, la comparación entre el mapa morfodinámico y el mapa de relación de variables obtenido por lógica difusa. Esto ayuda a hacer propuestas de actividades que promuevan acciones de remediación, mitigación ó prohibición de área de la cuenca que presentan ó son susceptibles de contener eventos erosivos.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

2.1. LOCALIZACIÓN

La cuenca se localiza dentro del municipio de Guanajuato, en el Estado del mismo nombre. Los límites del parteaguas están entre los $101^{\circ}04'30''$ y los $101^{\circ}21'00''$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich y entre los $20^{\circ}50'00''$ y los $21^{\circ}07'30''$ de latitud norte (Figura 2.1). La superficie de la cuenca es, de 490 km^2 . La longitud del parteaguas o divisoria es de 114.5 km, la cota de elevación más baja, de acuerdo con la información encontrada en el mapa topográfico (INEGI, 1998a) es de 1,790 msnm, en la salida de la presa La Purísima y la cota más alta es de 2,820 msnm, al NE en el cerro Mesa el Paseo, con coordenadas UTM (NAD27), $X=274,284$; $Y=2,326,917$.

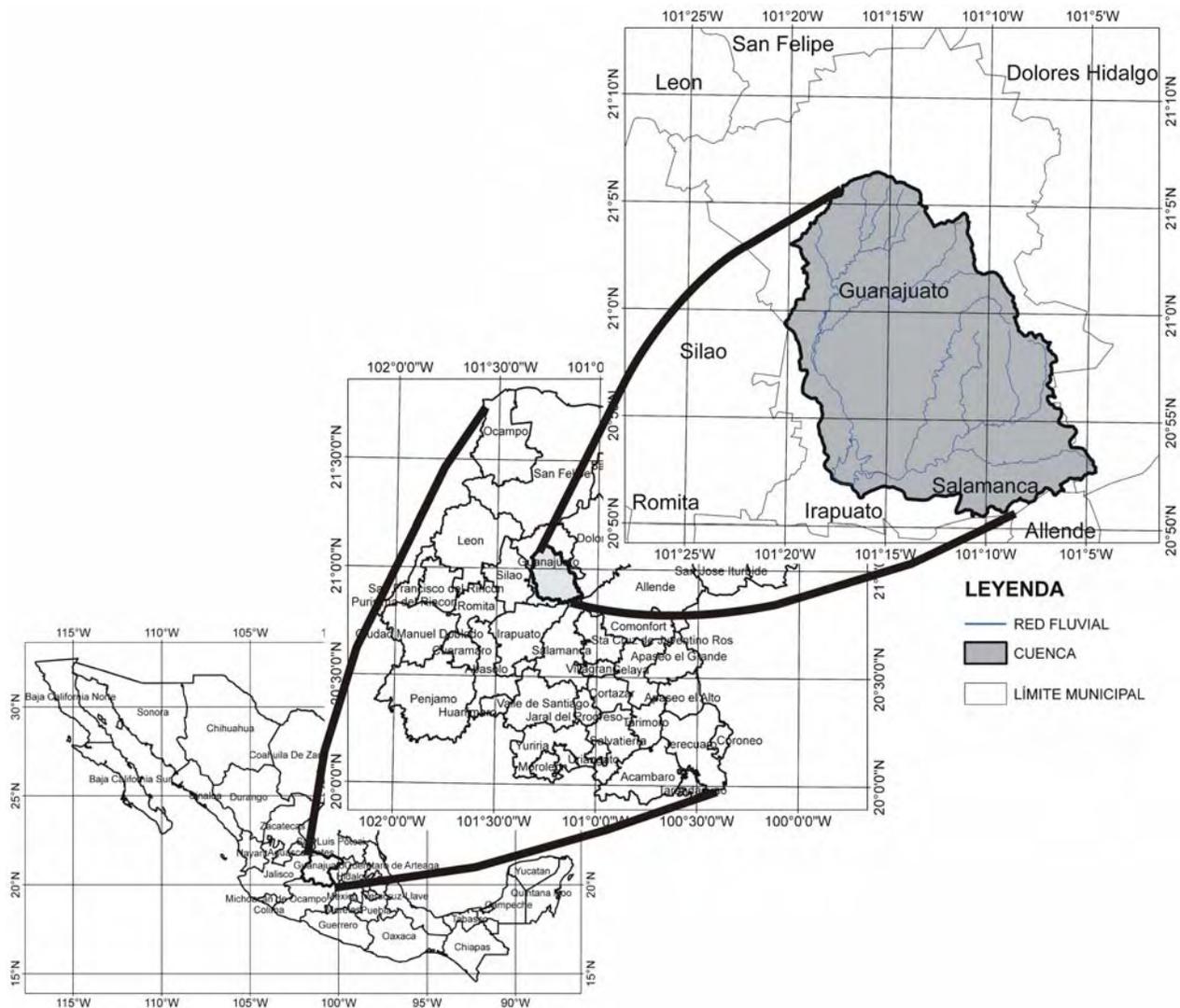


Figura 2.1. Localización del área de estudio.

Fisiográficamente, el área pertenece a la Sierra de Guanajuato, la cual se extiende por más de 100 kilómetros con rumbo de NW-SE 45° (Aranda *et al.*, 1989; Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego *et al.*, 1992). El frente sudoccidental de esta cadena montañosa (piedemonte y lomeríos bajos) lo constituye la falla El Bajío, un límite geológico y fisiográfico importante, el cual separa dos grandes regiones del centro de México: al sur, el eje Neovolcánico y al norte, la Mesa Central (Aranda *et al.*, 1989; Martínez-Reyes, 1992; INEGI, 1998b; Nieto-Samaniego *et al.*, 1990).

La red fluvial, de acuerdo con la clasificación propuesta por Horton (1968) *cit.* en Campos (1984); es de orden seis y la longitud del cauce principal en XY (2D) es de 28,554.64 m y en XYZ (3D) de 28,684.9 m, el cual presenta un desnivel de 990 m. La inclinación promedio de la pendiente, para el cauce principal es de 1.9°.

2.2. Geología y estratigrafía

La información geológica del terreno de la cuenca del río Guanajuato, está vinculada al relieve de la Sierra de Guanajuato, de manera que la mineralización por metales preciosos es lo que hace destacable al área, además que aparecen formas de relieve complejas por su origen, así como por las actividades humanas relacionadas al beneficio de los materiales mineralizados. Los procesos tectónicos, volcánicos y erosivos, han provocado que las rocas que afloran se les ha fechado con edades que van desde el Jurásico hasta el Cuaternario (Fig. 2.2). A estos materiales se les divide en dos grandes secuencias, una volcanosedimentaria que pertenece a un arco volcánico submarino del Jurásico superior-Cretácico inferior (Mesozoico) llamado Arco Intraoceánico Alóctono de Guanajuato (Ortiz-Hernández *et al.*, 1992), así como de una cubierta volcánica Cenozoica que ocupa el resto del área (COREMI, 2002; INEGI, 1983b).

2.2.1. ESTRATIGRAFÍA

2.2.1.1 ROCAS DE EDAD MESOZOICA

En el Jurásico se origina un Complejo Ultramáfico que aflora en la porción norte de la cuenca, sobre la Sierra de Guanajuato; formado por rocas masivas cristalinas de color verde oscuro para la roca sana, mientras que para la roca alterada presenta un color verde claro. El contenido es de lutitas, lutitas carbonosas, limonitas, areniscas, pedernal negro JsKi(?) con andesitas y basaltos Ki(?) y calizas micríticas con laminaciones de limonita. Tiene como material secundario actinolita y facies de esquisto verde (Martínez y Aguirre, 1987; Martínez-Reyes, 1992). Sobreyace por cabalgamiento, a las rocas metavolcánicas (unidad volcanosedimentaria),

de naturaleza ofiolítica y cubierta por productos volcánicos del Terciario. Por la litología que presenta, el estilo de deformación estructural y su columna estratigráfica Buchanan (1979) *cit.* en Jaime-Méndez (1984) y Servais *cit.* en INEGI (1998b) le otorgan una edad del Jurásico Tardío. Este grupo complejo queda expuesto por movimientos tectónicos ocurridos desde el Mesozoico (Martínez y Aguirre, 1987; Ortiz-Hernández *et al.*, 1992; Hernández Laloth, 1991 *cit.* en INEGI, 1998b). En él aparecen dos fallas tectónicas una en dirección NE-SW y otra en dirección NW-SE, que convergen en la zona mineralizada conocida como Valenciana, ubicada al norte de la ciudad de Guanajuato (Figura 2.4). Este contacto sigue una línea de rumbo general NE-SW. Le sobreyace la tonalita cerro Pelón (Ktcp) que aflora al NW de la ciudad de Guanajuato. Este cerro forma el límite NW de la cuenca, cuya elevación es de 2,640 msnm; consiste de rocas masivas, cristalinas, clasificadas como plagiogranitos y granodioritas (Nieto, 1985 *cit.* en Olmos, 1988). Presenta, en algunos sitios, forma de cizalla con facies de metamorfismo con grado bajo e intrusión a la unidad diorita La Palma. Se le ha fechado por geocronometría entre el Jurásico tardío y el Cretácico temprano 157.1 ± 8.8 M.a. (Martínez-Reyes, 1992; INEGI, 1998b; Zimmermann, 1990 *cit.* en COREMI, 1998).

Le sobreyace, en discordancia la unidad diorita La Palma (Kdlp), es una facie cristalina de rocas con colores oscuros y claros de composición diorítica esencialmente y granítica, porfídica tonalítica y gabroica de modo ocasional. Cortada por diques granofídicos, doleríticos y basálticos que en conjunto estructuran un enjambre complejo de filones; los rasgos que definen el término enjambre son el ramaleo de los diques, entrelazados en todas direcciones (estructura *dike-in-dike*) y por sus bordes de enfriamiento y localización sobre la roca encajonante, además sobre su base aparece una capa delgada (menos de 150 m de espesor) de gabros acumulados. Afloran en las cercanías del cerro El Cubilete, la localidad La Luz y la ciudad de Guanajuato y presentan una dirección preferente NW, y es el límite noroccidental de la cuenca. Es considerada del Cretácico temprano, 143 ± 9.6 Ma, K/Ar (en roca entera) para las doleritas, basaltos, granofídicos, gabros y dioritas; y de 157.1 ± 8.8 Ma, K/Ar (en roca entera) para plagiogranitos *sensu lato*. Otros autores utilizan el nombre “Complejo Filoniano Santana” para designar esta unidad (Guiza *et al.*, 1949; Martínez-Reyes, 1992; Ortiz-Hernández *et al.*, 1992).

Le sobreyace en discordancia, el Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato (Kcsg), que agrupa diversas facies sedimentarias y volcánicas de origen marino (Figura 2.4). Las facies sedimentarias están constituidas por caliza en estratificación delgada, además de contener

lutita, arenisca de color verde, pedernal y bancos de conglomerado; en tanto las facies volcánicas son derrames de lava basáltica, andesítica y dacítica cuya estructura puede ser masiva y/o almohadillada, junto a horizontes de brecha, toba y detritos de la misma composición. La cima de este complejo, está cubierta por productos volcanoclásticos continentales. La paragénesis mineral de los componentes son fenómenos de espilitización, metamorfismo regional de grado bajo y alteración hidrotermal. Martínez y Aguirre, 1987, indican que el componente sedimentario subyace al material volcánico y en otras lo sobreyace, debido a procesos tectónicos. Otros autores, proponen que quizá esta forma se deba más bien a más de un evento sedimentario y volcánico en el área, pues no hay evidencia tectónica que origine dicha alternancia.

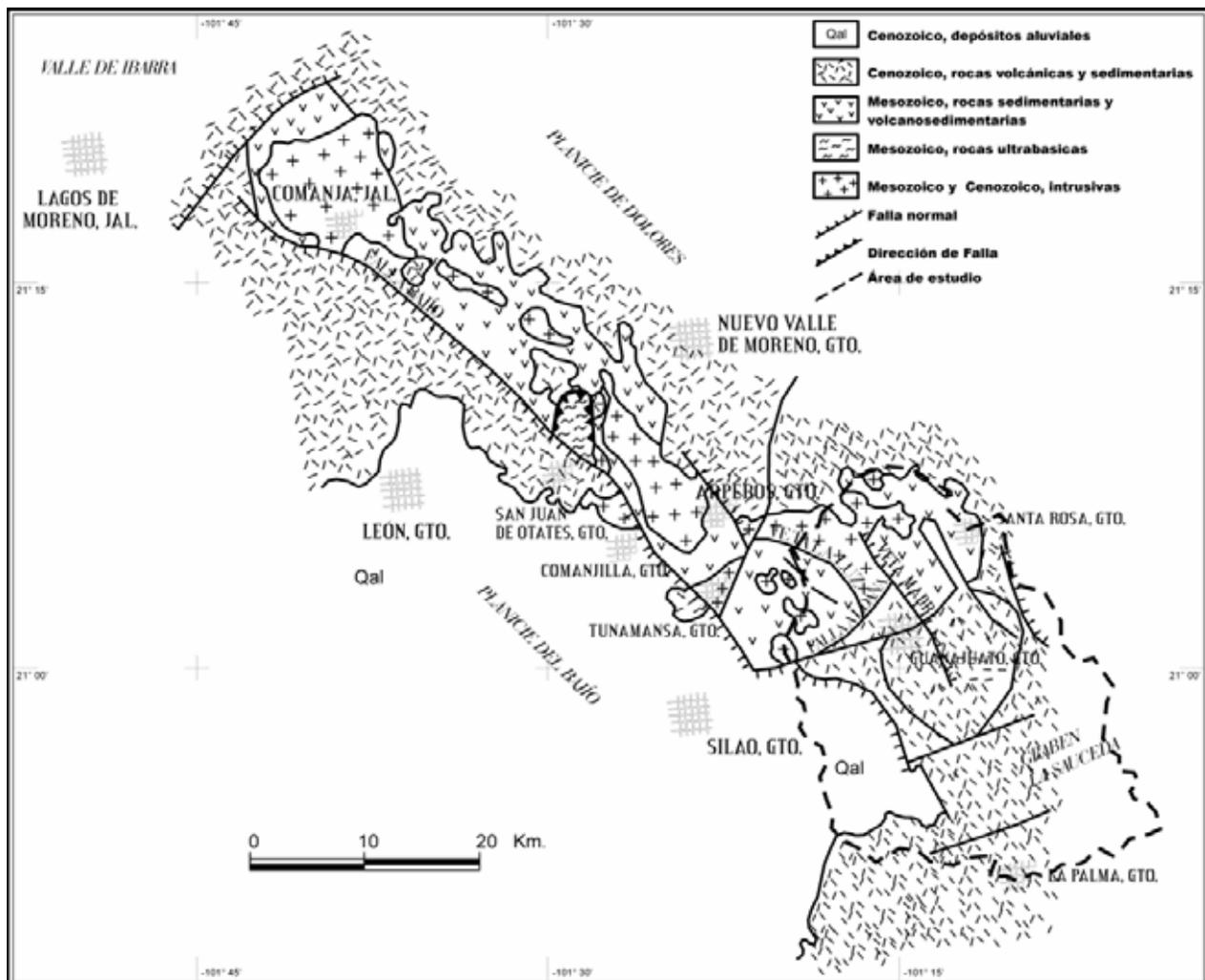


Figura 2.2. Mapa de la Sierra de Guanajuato, así como de los materiales y estructuras dominantes, y que rodean e integran al área de estudio (Nieto-Samaniego, 1992; Aranda-Gómez *et al.*, 1989; Quintero-Legorreta, 1992).

Esta unidad volcanosedimentaria, se conoce localmente como Sierra de León, de Guanajuato y de San Antón de las Minas. La base no aflora, pero se infiere que el espesor de esta estructura sea de más de 500 metros (Ortiz-Hernández *et al.*, 1992). La datación se obtuvo del cálculo hecho a microfósiles encontrados en las facies sedimentarias, así como por las edades obtenidas en las facies volcánicas, donde Corona (1988) *cit.* en INEGI (1998b) propone una edad Tithoniano-Valanginiano (Jurásica-Cretácica), aunque Martínez y Aguirre (1987) precisan que al datar dichos microfósiles (tipo radiolarios), encontró que por el tipo de especie lo más probable es Valanginiano-Turoniano (Cretáceo temprano al tardío) (Hernández Laloth, 1991 *cit.* en Martínez-Reyes, 1992; INEGI, 1983b). Dentro del área de estudio, estos materiales aparecen como afloramientos diversos sobre la porción norte (Fig. 2.4).

A esta unidad le sobreyace una sucesión de derrames de lava de estructura masiva a almohadillada, conocida como Unidad Basáltica La Luz y distribuida a lo largo de la Sierra de Guanajuato de unos 1,000 metros de espesor, intercalada con pedernal, piroclastitas básicas (tobas, brechas e hialoclastitas) y raramente con rocas volcanodetríticas (~50 m de espesor) y derrames de material tipo dacita-riodacita calcialcalina hacia su cima.

Localizada al NW de la ciudad de Guanajuato, sobre el límite de la cuenca y rodeado de materiales dacíticos, su límite al sur está dado por la presencia de fallas tectónicas. Esta unidad está en contacto con tobas basálticas y grauvacas tobáceas verdes (toba El Cubilete) y en el área de La Luz, cabalga a la unidad volcanosedimentaria. Su edad se infiere K/Ar de 108.4 ± 6.2 M.a. (datación en roca entera) (Ortiz-Hernández *et al.*, 1992; COREMI, 1998) (Figura 2.4).

2.2.1.2. ROCAS DE EDAD CENOZOICA

En el Cenozoico se originan secuencias clásticas continentales tanto para el paleógeno, como para el Neógeno. El conglomerado tipo molasa, denominado Conglomerado Guanajuato, es el más representativo, que se origina en la Orogenia Laramide. Esta unidad es de estratificación masiva, generalmente (facie conglomerática policrística), o mediana, ocasionalmente (facie arenosa), que aflora en la ciudad de Guanajuato y sus alrededores; de color rojo por la presencia de óxido férrico que al deshidratarse se torna en turgita y en rojo anhídrido (hematita) (Edwards, 1955; Guiza *et al.*, 1949). Delimitado al norte por fallas de dirección NW y NE que hacen contacto sobre el área mineralizada La Valenciana y al sur por una serie de depósitos aluviales y volcanoclásticos. Sus clastos son poco redondeados y en ocasiones angulosos y subangulosos, de tamaño variable (de menos de 1 cm hasta 1 m), y de materiales diversos como basalto, riolitas,

dacitas, albita, oligoclasa, sanidina, cuarzo, biotita, calcita, aragonita, clorita, serpentina, magnetita y hematita (Tabla 2.1); su matriz es arenosa y cementada por óxidos y carbonatos (hematita y calcita) (Edwards, 1955; Ferrusquía-Villafranca, 1987 *cit.* en Quintero-Legorreta 1992; Guiza *et al.*, 1949; Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992). Aparecen intercalados algunos derrames volcánicos andesíticos dentro de esta unidad. El espesor puede alcanzar varias centenas de metros a un máximo probable de 1,500 metros. De rumbo general NW 30° SE y NE 20° SW y un echado entre 15° y 40°, dirección E-SE.

Su edad ha sido asignada al Eoceno-Oligoceno (Terciario) con base en la datación obtenida de fósiles vertebrados que contiene (Guiza *et al.*, 1949). Edwards (1955) clasifica algunos corales silicificados entre el Cretácico superior y el Paleoceno. Mismos que fueron localizados en la roca caliza fragmentada dentro del conglomerado. Dichos especímenes los describe como *Stylina* (*Heliocoenia*) sp. (nov.), *Miriophyllia* sp. (Grupo M. *Trinitatis*) y *Dendrararea* (Figura 2.4).

Tabla 2.1 Composición detrítica de la matriz del Conglomerado Guanajuato en tres núcleos, modificada de Edwards (1955).

Contenido de la Matriz	Ubicación en el estrato del conglomerado					
	Inferior (Muestras No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 10)		Superior (Muestras No. 7, 8, 9, 11 y 12)		Contacto con superficie (Muestras No. 13-29)	
	No. de detritos	% del total	No. de detritos	% del total	No. de detritos	% del total
Rocas volcánicas	1,609	75.5	1,021	67.4	1,426	56.1
Granito	80	3.8	412	27.2	700	27.5
Aplita	0	0.0	36	2.4	199	7.8
Caliza	242	11.3	11	0.7	21	0.8
Chert	167	7.8	21	1.4	15	0.6
Calcedonia	7	0.3	3	0.2	46	1.8
Cuarzo	3	0.1	8	0.5	18	0.7
Calcita	6	0.3	3	0.2	0	0.0
Varios	18	0.9	0	0.0	118	4.7
Total	2,132	100.0	1,515	100.0	2,543	100.0

Le sobreyace discordantemente la Formación Losero, que aflora al oriente de la ciudad de Guanajuato (ToAr-TR) con un espesor entre 5 y 36 m. Valores obtenidos en los niveles 490 y 590 de la mina Las Torres (Ojeda-Macías, 1979); conformado por material volcanoclástico depositado en un medio lacustre de material tipo riolítico, cuarzo, feldespato y vidrio volcánico; de color verde (cloritizados) o rojo (oxidados), en estratificación delgada de espesores menores a 30 cm. El rumbo general que presentan las capas es NW40° y con un echado promedio de NE15° (Ojeda-Macías, 1979). Su edad, definida por su posición estratigráfica ocurre en el Eoceno

superior-Oligoceno temprano. Cepeda (1972) *cit.* en Ojeda-Macías (1979), indica que no reúne todos los requisitos requeridos por el código estratigráfico para ser considerada como tal y sugiere, que más bien debe tomarse como un miembro inferior de la Formación la Bufa, pero Ramírez (1983) indica que esta aseveración puede no ser válida, ya que presenta estratificación rítmica y adelgazamiento progresivo, tanto en estratos como en cantos, hasta llegar a formar arenisca roja, que crea a la Formación Loseros; además de que en la Formación La Bufa, se encuentran bloques de hasta 25 cm. de diámetro, lo que puede indicar que ésta ya estaba formada al momento de que las erupciones originaron la riolita La Bufa, y esto se asevera por Randall (1978) *cit.* en Ramírez (1983) pues indica que en la mina Las Torres existe la gráfica de un barreno de diamante que cortó el material y lo describe como: Conglomerado-Loseros-Conglomerado (Olmos, 1988; Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992; COREMI, 1998).

Le sobreyace discordantemente, la unidad Riolita la Bufa (Trbu), que es una unidad de rocas masivas, localizada en el cerro que lleva el mismo nombre, en dirección sureste de la ciudad de Guanajuato, al centro del área de estudio, además que es evidente su presencia en la Formación El Cedro, descritos en registros de la mina el Cubo y Peregrina. El color para las rocas sanas es rosa y para las rocas alteradas (caolinizadas) es el blanco. Su facie es de composición riolítica porfídica, ignimbrítica y de brechas riolíticas. Esta unidad puede alcanzar desde los 180 hasta los 300 m de espesor. La edad del Oligoceno de estas rocas, dada por K-Ar es, 37 ± 0.3 M.a. (Ojeda-Macías, 1979; Olmos, 1988; Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992; COREMI, 1998).

Le sobreyace acordantemente, la unidad Conglomerado Calderones (Taca), que consiste en una serie de derrames de andesita de tipo arenisca tobácea, donde alternan estratos finos (arenosos) y gruesos (conglomeráticos); comúnmente de color verde (cloritización), u ocasionalmente rojo (oxidación). La facie gruesa incluye, clastos líticos diversos (volcánicos plutónicos, sedimentarios o metamórficos) en una matriz arenosa; la facie fina incluye plagioclasa, feldespato alcalino y minerales opacos. El espesor se ha estimado entre 200 a 250 m. Su edad, se fecha en el Oligoceno (Ojeda-Macías, 1979; Jaime-Méndez, 1984; Martínez-Reyes, 1992; COREMI, 1998; COREMI, 2002).

Le sobreyace la Andesita El Cedro (Tace), que es una unidad que aflora en los alrededores del cerro El Cubo y en la Sierra de Santa Rosa (toma el nombre de la localidad cercana), muy en el extremo NE del parteaguas. Esta formación consiste en derrames de lava andesítica de color oscuro, porfídico, con fenocristales de plagioclasa, augita, olivino y mineral opaco, en una matriz

microcristalina y brechas dacíticas. Sufre intrusión de domos y diques riolíticos. Dentro de esta unidad se observan domos endógenos de la misma composición. Su espesor puede variar entre 200 a 640 m. Su edad corresponde al Oligoceno medio (Ojeda-Macías, 1979; Jaime-Méndez, 1984; Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992; COREMI, 1998; COREMI, 2002).

El intrusivo Peregrina es de material hipabisal, que aflora desde el norte y noreste de la localidad Villalpando y hasta la cercanía de la mina Peregrina, de tipo riolita porfídica presenta un fenómeno de desvitrificación. Sus dimensiones son reducidas, contiene concentraciones altas de metales preciosos que podría corresponder a las raíces de una estructura dómica (Ojeda-Macías, 1979; Martínez-Reyes, 1992; INEGI, 1998b).

Le sobreyace la unidad Riolita Chichíndaro (Trch); como su nombre lo dice, consta de riolitas y aflora en el cerro del mismo nombre. Su extensión va más allá del distrito minero de Guanajuato, y de la porción sudoriental de la Sierra de Guanajuato. El material es tipo lava porfídica, fluida, aparece en forma de estructuras dómicas, en varias ocasiones. El espesor estimado es de 80 metros. Su mineralogía incluye fenocristales de feldespatos alcalinos, cuarzo, plagioclasa, biotita y minerales opacos. Su edad radiométrica por K/Ar es de 32 M. a., es decir, Gross (1975) *cit.* en COREMI (1998) la ha establecido en el Oligoceno medio, marcando una de las actividades masivas, finales que han creado el paisaje dentro de área de estudio (Ojeda-Macías, 1979; Martínez-Reyes, 1992; COREMI, 1998; COREMI, 2002) (Figura 2.4).

En escala menor le sobreyace discordantemente una serie de tobas lacustres, cuyo espesor se estima de 120 metros, cuya composición es ácida con interestratos conglomeráticos. Aparecen discordantes, una serie de rocas intrusivas, graníticas y tonalíticas. Las tonalitas afloran muy poco, principalmente en la parte norte del área de estudio. Su edad se fecha con base en las relaciones estratigráficas, de una edad del Oligoceno (COREMI, 1998; COREMI, 2002).

En el Cuaternario se depositan rocas lávicas básicas y por acción de diversos agentes, se aceleran procesos que generan acumulación de suelos aluviales. En el Neógeno se acumulan sedimentos continentales de arenas, tobas y conglomerados, que forman terrazas y planicies aluviales (Qhoal) de hasta 8 m de espesor, aflorando por discordancia angular sobre derrames traquiandesíticos y tobas riolíticas. La última etapa de volcanismo son lavas basálticas de espesores de hasta 60 m. Descansan discordantes sobre depósitos continentales pleistocénicos en el Cerro del Cubilete (límite NW del área de estudio), sobreyacen a la unidad de tobas lacustres (Martínez-Reyes, 1992; COREMI, 1998; COREMI, 2002).

2.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

2.2.2.1. TECTÓNICA DE LAS ROCAS DE EDAD MESOZOICA

Dentro del área de estudio, el efecto compresivo afectó a las rocas mesozoicas, durante el jurásico tardío. Este tipo de deformación, originó unidades tipo pliegue isoclinal, esquistosidad, zonas de cizalla de escala métrica y cabalgaduras. Se sabe que las alineaciones presentan una dirección preferente SSW y NNE (Olmos, 1988; Ortiz *et al.*, 1992) observables en el distrito minero de Guanajuato y en la Sierra de León. Estas rocas que presentan esta deformación datan, de una época prealbiana (Cretácico inferior) (Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992, Ortiz *et al.*, 1992; COREMI, 1998; COREMI, 2002).

Esto ha provocado que los estratos aparezcan invertidos, tal como sucede con el complejo volcanosedimentario Sierra de Guanajuato. En el mismo, se ha encontrado (por geoquímica) que su origen es de tipo marino. Lo mismo sucede, incluso, para las unidades plutónicas San Juan de Otates, tonalita Cerro Pelón y diorita La Palma (Figura 2.4). Pudiéndose precisar que su pertenencia es para un arco insular intraoceánico, de afinidad pacífica (Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992; COREMI, 1998; INEGI, 1998b; COREMI, 2002).

2.2.2.2. TECTÓNICA DE LAS ROCAS CENOZOICAS

Las rocas de edad Cenozoica, presentan un fallamiento y fracturamiento intenso, además de algunos domos intrusivos. Randall *et al.* (1994) sugieren la presencia de una caldera (Aranda-Gómez *et al.*, 1989; Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992; Randall *et al.*, 1994).

Las fallas que se encuentran al interior de la cuenca son por lo general normales (Aranda-Gómez *et al.*, 1989; Nieto-Samaniego, 1985 *cit.* en Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992), y la mayoría se localiza en la porción central y sur poniente, con una orientación preferente NW-SE y NE-SW (Figura 2.3). El desplazamiento vertical sobre las fosas tectónicas definidas como Villa de Reyes (en el límite NE de la cuenca) y La Saucedá (al SE de la cuenca) alcanza desde decenas de metros hasta centenas. El graben La Saucedá, toma el nombre de la localidad así denominada y localizada en la parte central de esta estructura geológica. La fosa tectónica La Saucedá contiene una serie de fallas normales escalonadas, que presentan una orientación preferente NE-SW, esto provoca una depresión de dirección Este-Oeste de manera que se interrumpe abruptamente la sierra de Guanajuato. Esto genera un desnivel que va desde los 200 metros hasta los 400 metros (Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego *et al.*, 1992). Los límites del graben quedan definidos por dos fallas que reciben su nombre por su posición (Figura

2.4) como falla septentrional, de orientación NE 65° y echado al SE; y la falla meridional de rumbo NE 75° e inclinación de NW 79°; intermedia entre estas dos aparece la falla La Gloria paralela a la meridional y de 17 km de longitud. Nieto-Samaniego (1985) *cit.* en Martínez-Reyes (1992) le da una edad pleistocénica, debido a que afecta unidades contemporáneas (Aranda-Gómez *et al.*, 1989; Nieto-Samaniego, 1992).

La falla regional El Bajío (Figura 2.4), está conformada por un grupo de fallas normales. Este sistema tiene un rumbo general NW-SE y la cual presenta una inclinación al SW y su extensión va desde el NE de la ciudad de León hasta tener contacto con el graben La Saucedá en donde se oculta por la presencia de material sedimentario. Nieto-Samaniego *et al.* (1992) distingue tres segmentos principales: uno de dirección SE, y de fallas normales. El segmento dos, tiene dirección NW-SE, y es parte de un bloque levantado de bordes rectos y fallamiento normal y de origen extensivo. El segmento tres tiene un rumbo NW, presenta un basculamiento ligero en dirección NNE, y un hundimiento acentuado en la porción norte. El desnivel vertical es aproximadamente de 500 metros en su parte central y de 850 metros en su porción NW (Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego *et al.*, 1992). Este bloque delimita la fosa del Bajío, en la porción nororiental del área de estudio (Martínez-Reyes, 1992; Nieto-Samaniego, 1992; COREMI, 1998; COREMI, 2002).

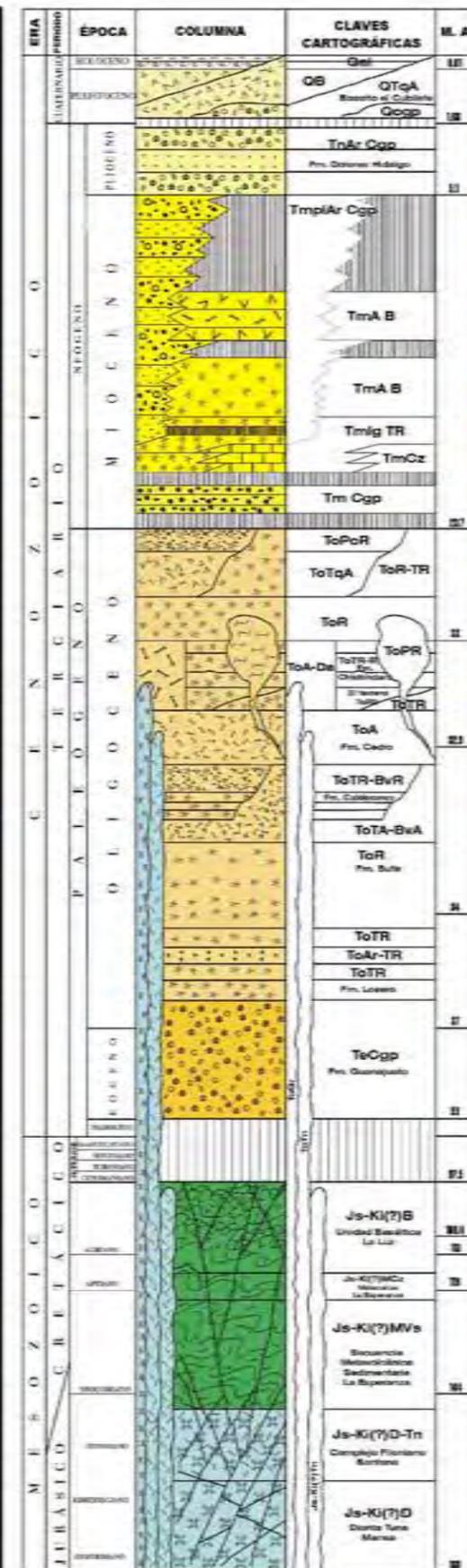
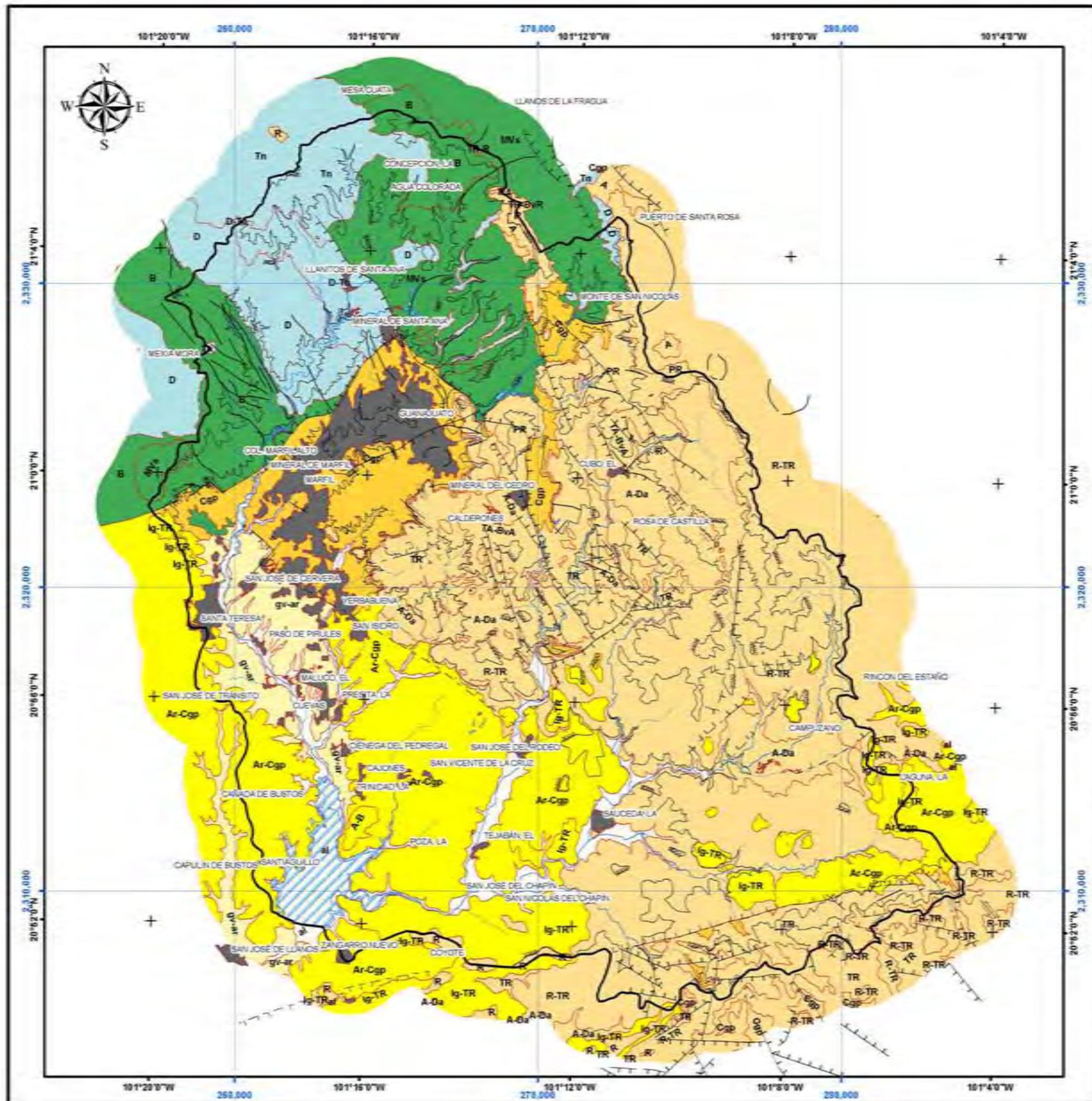
En la cuenca aparecen cuatro estructuras que describen al relieve, y son la fosa tectónica La Saucedá y el Bajío, y los bloques Aldama y Guanajuato (Figura 2.3). Los estudios geológico-mineros previos de Buchanan (1979) *cit.* en Aranda-Gómez (1989); Cepeda-Dávila (1965) *cit.* en Nieto-Samaniego *et al.* (1992); Corona-Chávez (1988) *cit.* en Nieto-Samaniego (1992); Echegoyén-Sánchez *et al.* (1970) *cit.* en Nieto-Samaniego *et al.* (1992).



Figura 2.3 Relieve de la cuenca visto desde el sur, con las estructuras dominantes.

Tabla 2.2. Resumen de las unidades geológicas al interior de la cuenca, ordenados por edad y superficie que ocupan dentro de la cuenca del río Guanajuato (Fig. 2.4)

TIEMPO GEOLÓGICO				EDAD M.a.	CLAVE ESTRATIGRÁFICA	ROCA	DESCRIPCIÓN DE LA ROCA	ÁREA DE LA UNIDAD GEOLÓGICA km ²
ERA	PERIODO	ÉPOCA	SUB-ÉPOCA					
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	N_A	0.01	Qhal	al	ALUVIÓN	27.6
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLESISTOCENO	N_A	1.68	Qpthogv-ar	gv-ar	GRAVA-ARENA	18.6
CENOZOICO	TERCIARIO	NEÓGENO	MIOCENO	5.1	TmplAr-Cgp	Ar-Cgp	ARENISCA-COMGLOMERADO POLIMICTICO	72.3
CENOZOICO	TERCIARIO	NEÓGENO	MIOCENO	24	TmA-B	A-B	ANDESITA-BASALTO	0.8
CENOZOICO	TERCIARIO	NEÓGENO	MIOCENO	24	Tmlg-TR	Ig-TR	IGNIMBRITA-TOBA RIOLÍTICA	21.3
CENOZOICO	TERCIARIO	NEÓGENO	MIOCENO	24	TmR	R	RIOLITA	1.0
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	32.9	ToA	A	ANDESITA	1.0
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	32.9	ToA-Da	A-Da	ANDESITA-DACITA	16.2
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	32.9	ToPR	PR	PORFIDO RIOLÍTICO	9.5
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	32.9	ToR-TR	R-TR	RIOLITA-TOBA RIOLÍTICA	93.8
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	34	ToAr-TR	Ar-TR	ARENISCA-TOBA RIOLÍTICA	0.2
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	34	ToR1	R	RIOLITA	3.4
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	34	ToTR	TR	TOBA RIOLÍTICA	23.2
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	34	ToTR-BvR	TR-BvR	TONA RIOLÍTICA-BRECHA RIOLÍTICA	3.6
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	36	ToA-Da	A-Da	ANDESITA-DACITA	17.6
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	36	ToAr-TR	Ar-TR	ARENISCA-TOBA RIOLÍTICA	0.7
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	36	ToR-TR	R-TR	RIOLITA-TOBA RIOLÍTICA	6.8
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	36	ToTA-BvA	TA-BvA	TOBA ANDESÍTICA-BRECHA ANDESÍTICA	19.7
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	OLIGOCENO	36	ToTR	TR	TOBA RIOLÍTICA	11.4
CENOZOICO	TERCIARIO	PALEÓGENO	EOCENO	55	Te-Cgp	Cgp	CONGLOMERADO POLIMICTICO	46.0
MESOZOICO	CRETÁCICO	N_D	N_D	108.4	Js-Ki(?)B	B	BASALTO	21.1
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR	APTIANO	140	Ki(?)MA-MB	MA-MB	META ANDESITA-META BASALTO	0.6
MESOZOICO	JURÁSICO	N_D	N_D	160	Js-Ki(?)D	D	DIORITA	17.0
MESOZOICO	JURÁSICO	N_D	N_D	160	Js-Ki(?)D-Tn	D-Tn	DIORITA-TONALITA	9.8
MESOZOICO	CRETÁCICO	N_D	N_D	160	Js-Ki(?)MCz	MCz	METACALIZA	1.5
MESOZOICO	CRETÁCICO	N_D	N_D	160	Js-Ki(?)MVs	MVs	METAVOLCANOSSEDIMENTARIA	35.0
MESOZOICO	JURÁSICO	N_D	N_D	160	Js-Ki(?)Tn	Tn	TONALITA	10.8
MESOZOICO	JURÁSICO	N_D	N_D	160.3	ToGr	Gr	GRANITO	0.1
TOTAL								490.6



- LEYENDA**
- MATERIAL, PERIODO, EPOCA**
- A (Andesita), TERCIARIO, PALEOGENO
 - A-B (andesita-basalto), TERCIARIO, NEOGENO
 - A-Da (andesita-dacita), TERCIARIO, PALEOGENO
 - Ar-Cgp (arenisca-conglomerado), TERCIARIO, NEOGENO
 - Ar-TR (arenisca-toba riolítica), TERCIARIO, PALEOGENO
 - Cgp (conglomerado polimítico), TERCIARIO, PALEOGENO
 - D (diorita), JURASICO, N_D
 - D-Tn (diorita-tonalita), JURASICO, N_D
 - Gr (granito), JURASICO-TERCIARIO, N_D-PALEOGENO
 - Gr (granito), JURASICO-CRETACICO, N_D-PALEOGENO
 - Ig-TR (ignimbrita-toba riolítica), TERCIARIO, NEOGENO
 - B (basalto), CRETACICO, INFERIOR
 - MCz (meta caliza), CRETACICO, N_D
 - Mv's (meta volcanosedimentaria), CRETACICO, N_D
 - PR (pórfido riolítico), TERCIARIO, PALEOGENO
 - R (riolita), TERCIARIO, PALEOGENO
 - R-TR (riolita-toba riolítica), TERCIARIO, PALEOGENO
 - TA-BvA (toba andesítica-brecha andesítica), TERCIARIO, PALEOGENO
 - TR (toba riolítica), TERCIARIO, PALEOGENO
 - TR-BvR (toba riolítica-brecha riolítica), TERCIARIO, PALEOGENO
 - TR-R (toba riolítica-riolita), TERCIARIO, PALEOGENO
 - Tn (tonalita), JURASICO-CRETACICO, N_D
 - al (aluvión), CUATERNARIO, HOLOCENO
 - gr-ar (grava-arenisca), CUATERNARIO, PLEISTOCENO

- SIMBOLOGÍA**
- POLIGONO DE CIUDAD Y LOCALIDADES IMPORTANTES
 - CUERPO DE AGUA
 - PARTEAGUAS; CUENCA DEL RIO GUANAJUATO
 - CURVAS DE NIVEL CADA 200 m.
 - FALLA INVERSA
 - FALLA LATERAL
 - FALLAS NORMALES
 - FALLA NORMAL INFERIDA
 - FRACTURA

0 5 10 km

1:150,000

PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD83, ZONA 14N
CURVA DE NIVEL CADA 200 m

LOS COLORES REPRESENTAN LA TEMPORALIDAD Y SON DE ACUERDO A LOS PROPUESTOS POR LA COMISION DE LA CARTA GEOLOGICA MUNDIAL (CGM). SIGLAS EN FRANCÉS. DETALLES EN www.cgm.org

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FIGURA 2.4
MAPA GEOLOGICO**

FUENTES: CARTA GEOLOGICA DEL MEXICO A ESCALA 1:50,000, CLAVES: F14043, F14043, F14052, F14053.
CARTA GEOLOGICA-MINERA DEL COREMLA A ESCALA 1:50,000, CLAVES F14043 Y F14053. MAPA GEOLOGICO DE LA SIERRA DE GUANAJUATO, ESCALA 1:110,000, INSTITUTO DE GEOLOGIA DE LA UNAM.

2008

2.3. CLIMA

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1964) se encontró que el clima templado es el que cubre el área de estudio (Izaguirre *et al.*, 1987; INEGI, 1998b). Dentro de la cuenca aparecen tres tipos de climas templados subhúmedos con lluvias en verano; los menos húmedos con precipitación invernal entre 5 y 10.2%, localizados en la parte baja de la Sierra de Guanajuato y al sur de la cuenca; los de humedad media y los más húmedos de los templados subhúmedos. Presentan un porcentaje de precipitación invernal menor a 5% y aparecen en la parte centro y norte de la cuenca (INEGI, 1998b) (Figura 2.5).

El clima **C(w₂) (w) b i**, es decir el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, con una relación P/T mayor de 55, con un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de lluvia anual, con un verano fresco y prolongado de temperatura media del mes más caliente entre 6.5°C y 22°C tipo isotermal, donde la temperatura es estable con oscilaciones menores a 5°C (Izaguirre *et al.*, 1987) aparece desde el cerro Pelón (límite norte del parteaguas) hacia fuera de la cuenca en dirección NW, desde la elevación 2,300 m a la 2,800 m, aparece en algunas laderas de montaña medias y altas.

Una segunda franja climática, va desde la elevación 2,000 y hasta la 2,300; se destaca la ciudad de Guanajuato y Marfil, además del segmento NE de la sierra de Guanajuato que contiene los lomeríos altos y las laderas de montaña bajas. El clima es un **C(w₂) (w) h (i')**, es decir el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano, con una relación P/T mayor de 55. Con un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de lluvia anual. Semi-cálido con invierno fresco y temperatura media anual entre los 18°C y los 22°C. Presenta una oscilación de temperatura entre los 5°C y los 7°C (Izaguirre *et al.*, 1987).

Aparece una tercera franja climática entre la elevación 1,800 y los 2,000 que comprende la planicie ondulada de la cuenca y las localidades de Yerbabuena, Los Cedros, Santa Teresa, así como de la fosa tectónica La Saucedá. El clima es un **C(w₁) (w) b**, es decir, intermedio en cuanto a humedad entre el C(w₀) y el C(w₂), siendo el más seco con lluvias de verano y un cociente P/T entre 43.2 y 55. Con un porcentaje de lluvia invernal menor al 5% de lluvia anual y un verano fresco y prolongado, con una temperatura media del mes más caliente entre 6.5°C y los 22°C (Izaguirre *et al.*, 1987).

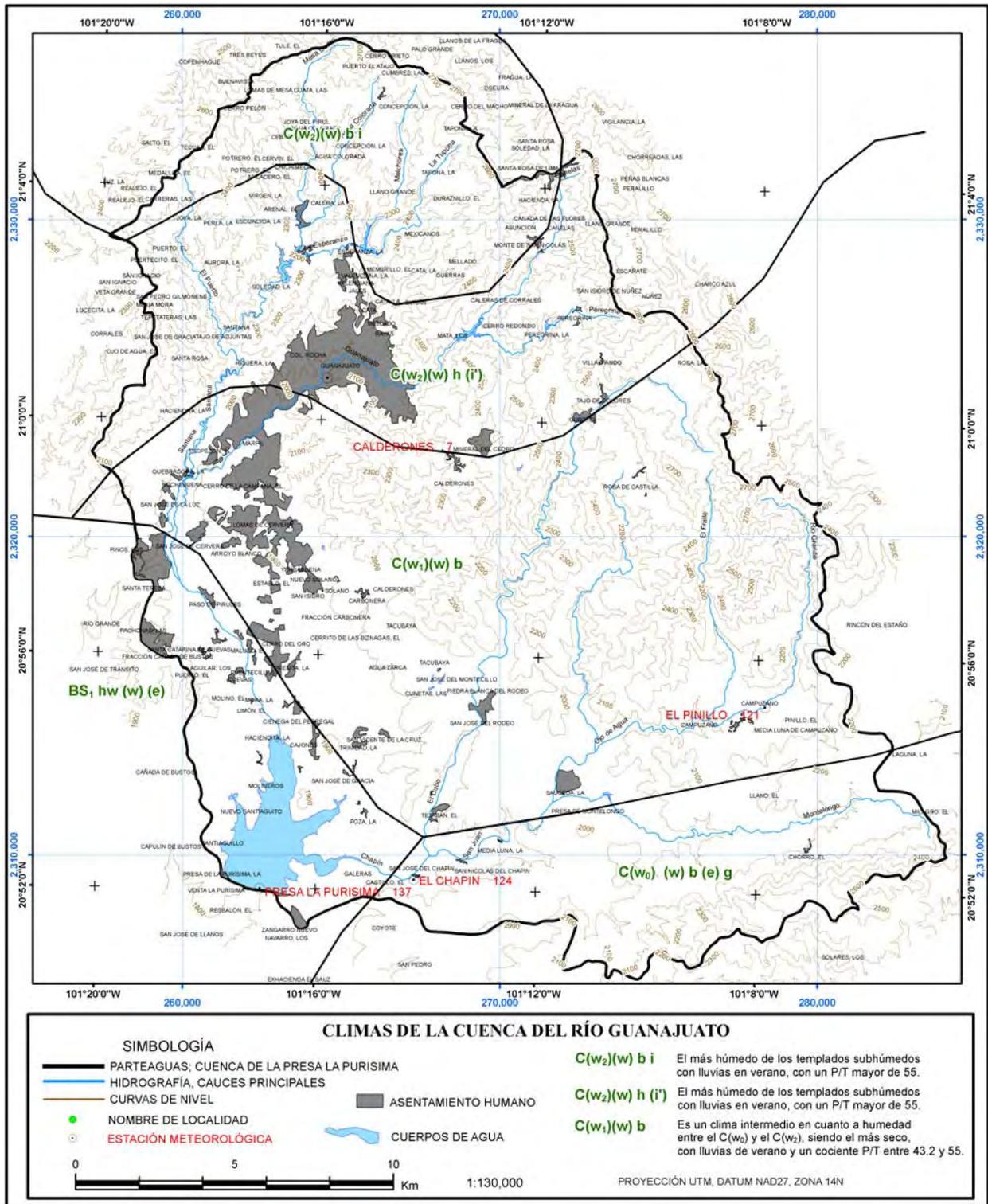


Figura 2.5. Tipos de climas en la cuenca.

El listado de la Tabla 2.3 contiene las estaciones meteorológicas localizadas en un intervalo de 22 kilómetros a partir del centro de la cuenca. Algunas se ubican es municipios como Dolores

Hidalgo, León, Silao, Irapuato, San Miguel de Allende, San Felipe, Romita. Las filas resaltadas en gris, son las estaciones que están al interior del área de estudio. La base de datos usada es la BASECLI, que contiene información climatológica para el Estado de Guanajuato de datos de la CNA. Los registros que se pueden obtener son temperaturas (ambiente, máxima y mínima), precipitación, evaporación, tormenta, niebla, nublado y granizo.

Tabla 2.3. Listado de las estaciones meteorológicas dentro (filas en gris) y cercanas a la cuenca.

ORDEN POR MUNIC.	NUM_ EST	NOMBRE DE LA ESTACION	MUNICIPIO DONDE SE UBICA	LOCALIZACION						ELEV. (msnm)	BASECLI	
				LATITUD (Norte)			LONGITUD (W_M_G)				AÑO DE REGISTRO	
											INICIO	FINAL
				grad.	min.	seg.	grad.	min.	seg.			
1	85	DOS ARROYOS	SAN MIGUEL DE ALLENDE	20	50	0	101	3	0	2,160	1972	1998
2	33	LA BEGOÑA	SAN MIGUEL DE ALLENDE	20	50	40	100	49	24	1,836	1961	1998
3	11	CINCO SEÑORES	SAN MIGUEL DE ALLENDE	20	57	18	100	54	35	1,909	1962	1999
4	147	MIRAFLORES	COMONFORT	20	46	32	100	55	59	1,980	1979	1983
5	63	SAN CRISTOBAL	DOLORES HIDALGO	20	57	0	101	2	0	1,935	1965	1998
6	51	PEÑUELITAS	DOLORES HIDALGO	21	6	16	100	52	33	1,915	1961	1998
7	61	SAN ANTON DE LAS MINAS	DOLORES HIDALGO	21	9	40	100	55	52	1,937	1964	1997
8	17	DOLORES HGO.	DOLORES HIDALGO	21	9	40	100	55	56	1,937	1951	1998
9	8	CAÑADA DE GONZALEZ	DOLORES HIDALGO	21	9	53	101	7	9	2,125	1965	1998
10	137	PRESA LA PURISIMA	GUANAJUATO	20	52	0	101	17	0	1,800	1977	1999
11	124	EL CHAPIN	GUANAJUATO	20	52	11	101	14	12	1,850	1977	1999
12	121	EL PINILLO	GUANAJUATO	20	55	12	101	7	52	2,020	1976	1998
13	7	CALDERONES	GUANAJUATO	20	59	22	101	13	39	2,372	1949	1998
14	94	GUANAJUATO	GUANAJUATO	21	0	43	101	15	54	1,999	1969	1999
15	103	VALENCIANA	GUANAJUATO	21	2	31	101	15	15	1,995	1973	1999
16	130	LA LUZ	GUANAJUATO	21	3	49	101	20	15	2,419	1977	1996
17	73	SANTA ROSA	GUANAJUATO	21	4	5	101	12	40	2,571	1962	1988
18	135	ARPEROS	GUANAJUATO	21	6	4	101	23	56	1,970	1977	1998
19	141	CIENEGA DE NEGROS	GUANAJUATO	21	10	18	101	14	34	2,450	1979	1998
20	164	EL COPAL E.A.Z.	IRAPUATO	20	41	0	101	21	0	1,724	1983	1999
22	166	CEMSI	IRAPUATO	20	41	22	101	22	42	1,733	1992	1998
23	134	EL CONEJO	IRAPUATO	20	43	17	101	22	20	1,788	1977	1999
24	168	SAN JUAN TEMASCATIO	IRAPUATO	20	44	3	101	17	34	1,780	1993	1999
25	4	ALDAMA	IRAPUATO	20	48	54	101	18	44	1,786	1949	1998
26	44	MANDUJANO	JUVENTINO ROSAS	20	44	24	101	2	58	2,066	1964	1998
27	136	LA JOYITA	SALAMANCA	20	45	18	101	9	40	1,830	1977	1998
28	153	LA LABORCITA	LEON	21	6	20	101	33	0	2,110	1978	1998
29	49	NUEVO VALLE DE MORENO	LEON	21	12	48	101	25	34	2,258	1962	1999
30	58	ROMITA	ROMITA	20	50	12	101	30	53	1,774	1962	1993
31	41	LOS RAZOS	SALAMANCA	20	40	18	101	9	2	1,755	1965	1999
32	140	EL CARBON	SAN FELIPE	21	16	4	101	8	10	2,100	1979	1998
33	67	SAN JUAN DE LLANOS	SAN FELIPE	21	16	6	101	20	55	2,119	1924	1989
34	89	SILAO	SILAO	20	57	26	101	26	19	1,782	1924	1997
35	162	COMANILLA	SILAO	21	3	40	101	28	0	1,930	1982	1999

En el estado de Guanajuato se cuenta con registros de datos climáticos en una base de datos denominada BASECLI. Estos registros varían en cantidad de datos, de acuerdo al intervalo de tiempo en que ha funcionado la estación meteorológica. Pero hay casos en que la información es

escasa, pues existen estaciones clausuradas o que presentan pérdida de datos, como por ejemplo, la estación El Copal tiene seis años de registro. Otro caso es la estación Silao, que indica que tiene un buen tren de registros y al hacer la revisión resulta que tiene vacíos de hasta 20 años. Muchas de las estaciones carecen de datos en los tres primeros meses ó los dos últimos meses del año, además no hay registros en todas las estaciones en los años de 1986, 1987 y 1988, sino hasta 1989 ó 1990. Se usaron los registros de la base de datos BASECLI a los del ERIC y SICLIM, ya que muestra mayor coherencia en la información registrada, a comparación de las otras dos bases de datos.

2.4. HIDROGRAFÍA

La cuenca del río Guanajuato tiene dos afluentes principales, el río Guanajuato y el río El Cubo, de manera que generan dos subcuencas, con un acomodo en dirección este y oeste. El río Guanajuato inicia en la elevación 2,770 msnm en el Cerro Pelón, en dirección norte de la cuenca. En su desarrollo hacia el sur recibe las descargas de los tributarios La Cebada y El Servín. En el poblado de Llanitos de Santa Ana recibe las descargas del tributario La Calera, que aguas arriba se ramifica en los arroyos Agua Colorada y La Concepción. En la confluencia de la Presa La Soledad están los arroyos La Escondida y el agua que vierte en exceso la presa de la Esperanza, que aguas arriba recibe las descargas de los tributarios Llano Grande, Melchores y Mexicanos, que se ramifica en La Taponá y El Duraznillo (INEGI, 1998a, 1998b).

En la confluencia localizada en la localidad de Tajo de Adjuntas, aparece el arroyo El Puerto, que recibe aguas de los arroyos La Joya, La Perla y La Aurora. En la localidad de Marfil, se tiene la confluencia del Río Guanajuato, que aguas arriba recibe agua de los tributarios El Membrillo, La Cata, Durán que se ramifica en el Arroyo Mellado y Guerras, y de los excedentes de las presas Mata y de la Olla; la Presa de Mata, recibe agua del arroyo San Antonio, que se ramifica en el Arroyo la Hacienda y Canelas y del arroyo Las Raíces, que conduce los excesos de la presa Peregrina. En la parte sur de la localidad de Marfil, se le unen los arroyos El Arco, Paso del Padre, El Pulque y Yerbabuena, que recibe aguas de las ramificaciones Las Cuestas y Los Charcos, además del arroyo Solano y Carboneras, hasta alcanzar a la superficie de inundación que forma la Presa de la Purísima (INEGI, 1998a, 1998b).

El río El Cubo, tiene dos tributarios importantes, El Cubo y San Juan. La ramificación El Cubo, tiene su origen en la elevación 2,770 msnm, en el cerro Mesa El Paseo, al noreste de la

localidad Villalpando. En la confluencia localizada en el Cerro Santa Isabel, aparece el arroyo El Cedro, que recibe su nombre de la localidad que así se denomina. Sigue su trayecto sin recibir aportes importantes hasta llegar al rancho San José del Chapín, donde se le une el río San Juan. El río San Juan, se origina en el extremo este de la cuenca, a una altitud de 2,710 m, en el cerro La Mesa, que se ubica al este de la localidad Rosa de Castilla, en su curso aguas abajo, recibe los tributarios Las Mudas y Las Adjuntas, posteriormente recibe el nombre de Angostura del Coyote y al norte de la localidad La Saucedá se genera una confluencia sobre el río Ojo de Agua, que tiene origen a una altura de 2,700 msnm, al suroeste de la localidad Cebolletas, donde recibe el nombre de Ojo de Agua del Fraile, que confluye en Campuzano con el nombre El Fraile (en el cerro Mesa La Junta), junto al arroyo Río Grande. En la confluencia de la localidad La Saucedá aparece el río Montelongo que conduce las aguas de las laderas del graben La Saucedá, y sus arroyos afluente principales son Colorada, Río Grande, El Azafrán y Montelongo. Delante de San José del Chapín se inicia el área de inundación de la presa La Purísima, donde cerca del poblado Castillo inicia la presa (INEGI, 1998a, 1998b).

2.5. EDAFOLOGÍA

El mapeo edáfico de la República Mexicana, es del año 1968. La Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL), realizó vuelos fotogramétricos para ese año y cubrieron la mayor parte del país, con el objetivo de crear la cartografía topográfica y temática. Para 1978, después de varios años de trabajo, se comenzaron a publicar estos mapas. En 1980, el INEGI publica la información edáfica del Estado de Guanajuato, en las escalas 1:50,000, 1:250,000 y 1:1,000,000. La dependencia gubernamental del Estado de Guanajuato como receptora y usuaria de esta información es la Unidad de Planeación e Inversión Estratégica (UPIE), por lo que los mapas temáticos tienen para el área de estudio como única fuente de información al INEGI (INFO, 2002). Las clases edáficas se obtuvieron a partir de las cartas edafológicas editadas en 1980 por el INEGI a escala 1:50,000, con las claves: F14C43 y F14C53.

El mapa generado por el INEGI, en su Dirección General de Geografía, está clasificado de acuerdo con la Leyenda de Clasificación de Suelos FAO/UNESCO 1968, modificado por la entonces DETENAL, donde se agregan subunidades propias del país y que no aparecen en la clave original de la FAO (INEGI, 2004). La clasificación edafológica representa primero la unidad principal (Figura 2.7), con la subunidad. Junto a esta información se indica una unidad

secundaria, que son las unidades edáficas de superficies pequeñas y que se mezclan con las principales. En la clave edáfica, además aparecen las clases texturales y de topografía, con el fin de crear un antecedente en el usuario sobre la inclinación del terreno y las características del suelo (INEGI, 2004). Además, en el mapa edafológico, hay simbología que describe las fases físicas, que pueden ser superficiales y profundas, con clases como: gravosa, lítica y dúrica.

Las unidades edáficas localizadas al interior del área de estudio son: Cambisol (B), Castañozem (K), Phaeozem (H), Fluvisol (J), Litosol (I) y Luvisol (L) (INEGI, 1979). Las subunidades que están en asociación son: calcárico (c), eútrico (e), háplico (h), lúvico (l) y órtico (o).

Cambisol (B), del latín *cambiare*: cambiar. Literalmente, suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar con cualquier tipo de vegetación y en cualquier tipo de clima, excepto zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios de tipo rocoso subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, hierro o manganeso (INEGI, 2004).

Phaeozem (H), del griego *phaeo*: pardo; y del ruso *zemljá*: tierra. Literalmente, tierra parda. Presenta una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Se encuentran en diversos tipos de climas y relieve. Su profundidad es variable, y utilizados en las actividades agrícolas, donde la productividad depende de la profundidad y clima (INEGI, 2004).

Fluvisol (J), del latín *fluvius*: río. Literalmente, suelo de río. Se caracteriza por estar formado de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y de estructura débil. Acomodados en capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la corriente y crecidas del agua en los ríos (INEGI, 2004).

Litosol (I), del griego *lithos*: piedra. Literalmente, suelo de piedra. Se caracterizan por presentar suelos con profundidades menores a 10 centímetros, limitado por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad y susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de los factores ambientales (INEGI, 2004).

Luvisol (L), del latín *lui, luo*: lavar. Literalmente, suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que contienen arcilla en el subsuelo, de color rojo o amarillento, aunque presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros, siendo suelos muy susceptibles a la erosión (INEGI, 2004). Las subunidades de suelo, se definen como (INEGI, 2004):

Calcárico (c), del latín calcareum: calcáreo. Suelos ricos en cal y nutrientes para las plantas. **Eútrico (e)**, del griego eu: bueno. Suelos ligeramente ácidos a alcalinos y relativamente fértiles. **Háplico (h)**, del griego haplos: simple. Suelos que presentan características únicas ó que no hay presencia de otras formas de suelo. **Lúvico (l)**, del latín luvi, luo: lavar. Suelos con acumulación de arcilla en el subsuelo. De color rojizo o pardo oscuro. **Órtico (o)**, del griego orthos: recto, derecho. Suelos que no presentan características de otras subunidades.

La distribución de los diferentes tipos de suelos sobre en la cuenca es muy variado, por ejemplo, al N y NW (Figura 2.7), aparecen en áreas con litología de origen sedimentario, metamórfico y volcánico, que contienen dioritas, tonalitas, pizarras, andesitas y el conglomerado Guanajuato, de edades desde el Titoniano hasta el Eoceno (aprox.150-37 M.a.) aparecen suelos phaeozem de tipo órticos, calcáricos y lúvicos (Tabla 2.4), es decir suelos cuyo origen principal es la depositación de materiales acarreados de otros sitios, ó en su caso de la meteorización de la roca madre; donde la abrasión y acarreo de los materiales fue acumulándolos de forma como aparecen hoy en día. Son suelos de color pardo, con texturas arenosas a medianas, en ocasiones con poco contenido orgánico. En la cuenca, estos suelos contienen vegetación limitada del tipo matorral, bosque natural de encino y muy extendido el pastizal. Se ha usado para agricultura pero con resultados de producción muy pobres, pues son suelos poco profundos y asociados a fases dúricas y líticas, que limitan tales actividades. Además son susceptibles a ser afectados por la erosión hídrica. En este relieve aparecen laderas con inclinaciones mayores a los 5°, y la vegetación está dispersa sobre el terreno. Esta cubierta vegetal escasa junto a la inclinación de la pendiente fuerte, influyen en acelerar los procesos erosivos de tipo hídrico.

En la parte oeste de la cuenca, el límite natural es la fosa tectónica denominada El Bajío, aparecen materiales de tipo aluvión, y contienen suelos de tipo phaeozem lúvico, de texturas medias, que están ocupados principalmente por actividades antrópicas como la agricultura y los asentamientos humanos. Presenta inclinaciones de pendiente menores a 5°, y los eventos erosivos hídricos importantes aparecen con tormentas fuertes.

En la porción central y oriente de la cuenca aparecen los Litosoles. Cuyos materiales provienen de actividades volcánicas, de materiales riolíticos, andesíticos y tobas. En algunos segmentos ubicados al norte de estos suelos, aparecen flujos lávicos de estructura masiva y vesiculada. Son suelos con muy poco desarrollo, y contenido escaso de materia orgánica e inclinaciones de la pendiente con valores que van hasta los 60°. La vegetación que predomina son

los pastizales, y en el fondo de los barrancos aparecen matorrales. Próximo a la localidad de La Yerbabuena, se encuentran los lomeríos rocosos más representativos de estas unidades edáficas. Las rocas lávicas, presentan una formación prismática en forma de columnas, mismas que afloran en las cercanías de la localidad de El Cubo y Calderones. De estos cerros, el mejor conocido es llamado localmente como La Bufa.

Los suelos de tipo Fluvisol, están en porciones de la cuenca localizadas en la parte sur, sobre los ranchos de San José de Rodeo y La Sauceda. Estos sitios aparecen sobre los costados de los ríos El Cubo y Ojo de Agua y su superficie es muy reducida, ya que cubre partes cercanas a la porción fluvial de los ríos mencionados.

En la Figura 2.6, se ilustra la posición que tienen los horizontes A1 de cada clase edáfica dentro del triángulo de textura, de forma que aparece un predominio de suelos arenosos-arcillosos. Los datos de textura se aplican en el cálculo de la erodabilidad del suelo; Morgan (1995) explica que existe una relación directa entre el tipo de erosión y la textura de la capa edáfica superior.

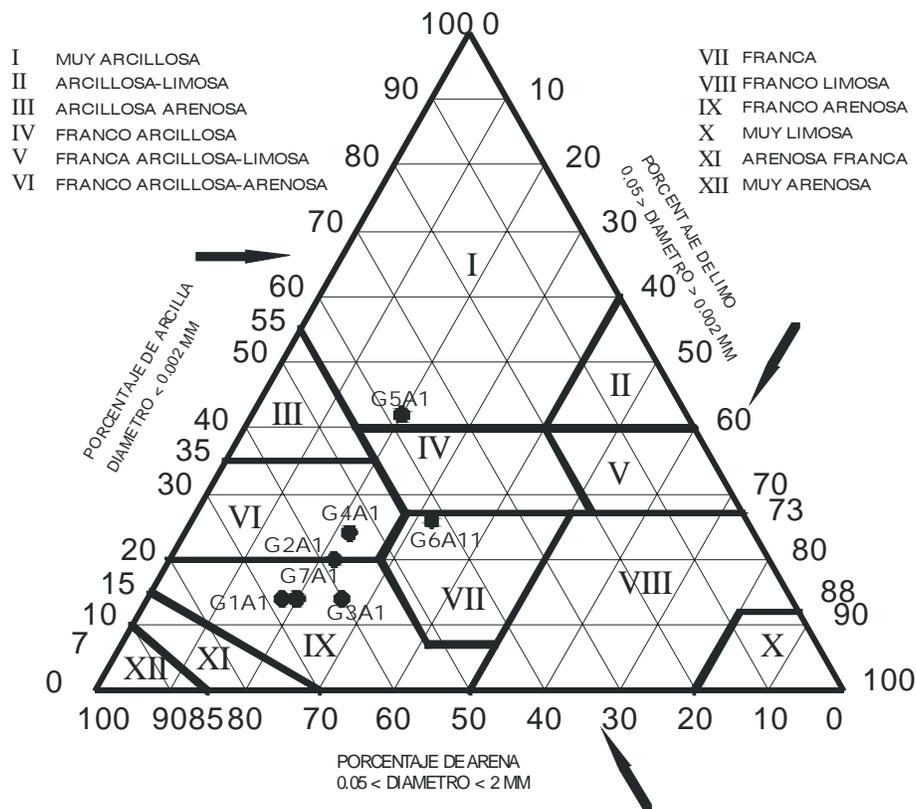
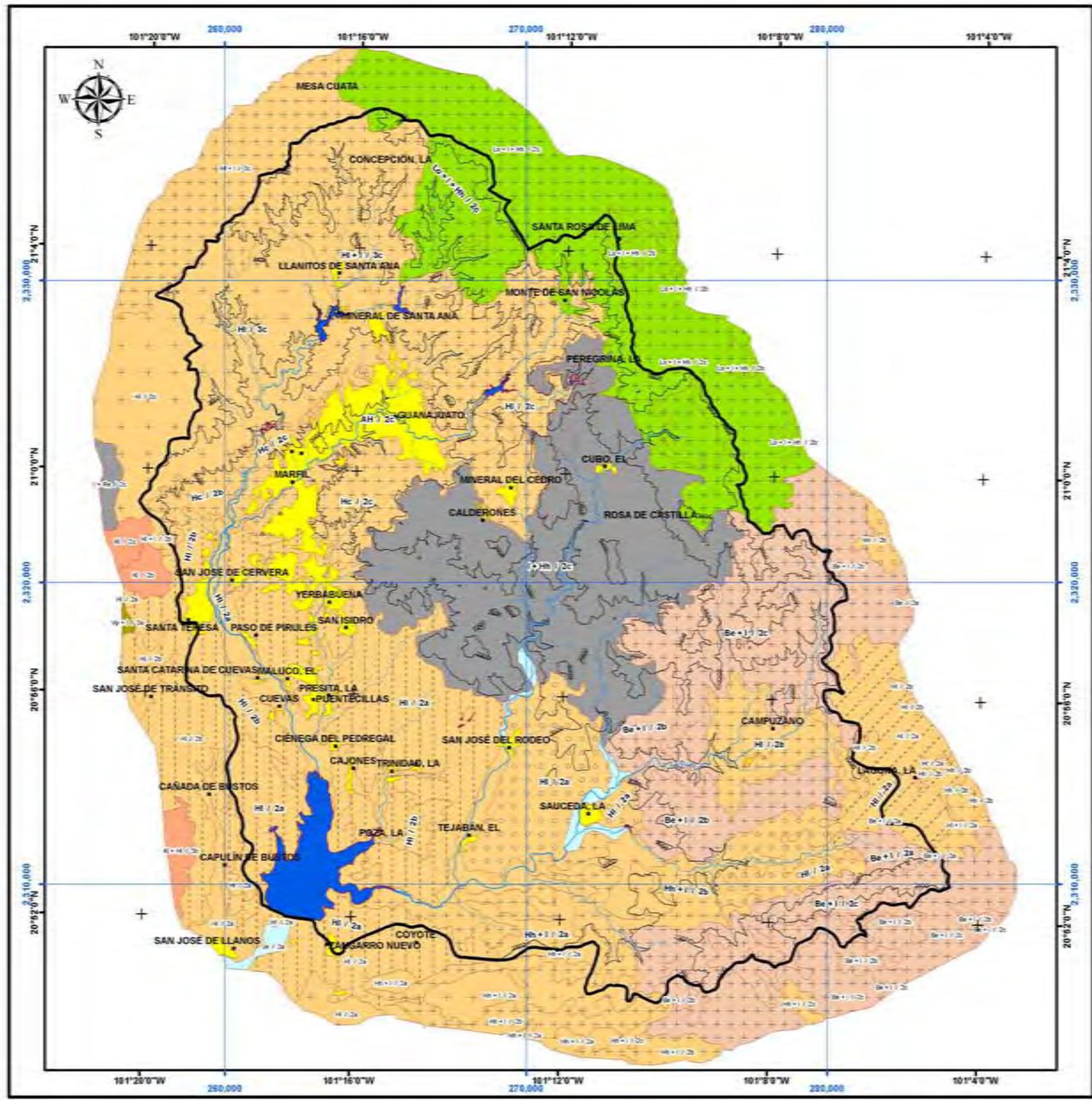


Figura 2.6. Clasificación textural (horizonte edafológico A1, figura adaptada del manual de suelos del USDA, 1953).

Tabla 2.4. Unidades edafológicas de la cuenca; NA = No Aplica.

CLAVE EDÁFICA	DESCRIPCIÓN			DESCRIPCIÓN DEL SUELO		FASE FÍSICA	SUPERFICIE, en km ²
	UNIDAD PRINCIPAL	SUBUNIDAD	UNIDAD SECUNDARIA	TEXTURA	TOPOGRAFÍA		
Be + l	Cambisol	Eútrico	Litosol	2	a	Lítica	3.48
Be + l	Cambisol	Eútrico	Litosol	2	b	Lítica	20.29
Be + l	Cambisol	Eútrico	Litosol	2	c	Lítica	46.06
Hc	Phaeozem	Calcárico	NA	2	b	Lítica	6.82
Hc	Phaeozem	Calcárico	NA	2	c	Lítica	14.32
Hh + l	Phaeozem	Háplico	Litosol	2	b	Lítica	17.73
Hh + l	Phaeozem	Háplico	Litosol	2	a	Lítica profunda	9.87
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	a	Dúrica	53.48
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	b	Dúrica	14.59
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	a	Dúrica profunda	3.51
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	a	Gravosa	27.54
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	b	Gravosa	3.71
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	c	Gravosa	0.45
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	b	Lítica	10.73
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	c	Lítica	14.94
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	2	a	NA	15.28
HI	Phaeozem	Lúvico	NA	3	c	Lítica profunda	35.61
HI + l	Phaeozem	Lúvico	Litosol	2	a	Lítica	0.05
HI + l	Phaeozem	Lúvico	Litosol	2	b	Lítica	0.52
HI + l	Phaeozem	Lúvico	Litosol	3	c	Lítica	43.60
Je	Fluvisol	Eútrico	NA	2	a	NA	2.67
l + Hh	Litosol	NA	Phaeozem háplico	2	b	NA	2.72
l + Hh	Litosol	NA	Phaeozem háplico	2	c	NA	75.62
Lo + l + Hh	Luvisol	Órtico	Litosol + Phaeozem háplico	2	b	Lítica	4.57
Lo + l + Hh	Luvisol	Órtico	Litosol + Phaeozem háplico	2	c	Lítica	31.30



UNIDADES DE SUELO

- I LITOSOL
- J FLUVISOL
- Je EÚTRICO
- K CASTAÑOZEM
- Kl LÚVICO
- L LUVISOL
- Lo ÓRTICO
- B CAMBISOL
- Be EÚTRICO
- H PHAEOZEM
- Hl LÚVICO
- Hc CALCÁRICO
- Hh HÁPLICO

FASES FÍSICAS

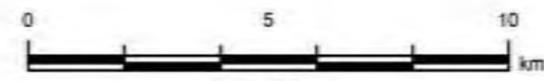
- [Dotted] DÚRICA (DURPAN A MENOS DE 50 cm. DE PROFUNDIDAD)
- [Cross-hatch] DÚRICA PROFUNDA (DURPAN ENTRE 50 Y 100 cm. DE PROFUNDIDAD)
- [Horizontal lines] LÍTICA (LECHO ROCOSO ENTRE 10 Y 50 cm. DE PROFUNDIDAD) SE OMITIÓ CUANDO EL LITOSOL DOMINA
- [Vertical lines] LÍTICA PROFUNDA (LECHO ROCOSO ENTRE 50 Y 100 cm. DE PROFUNDIDAD)
- [Dashed] GRAVOSA (FRAGMENTOS MENORES DE 7.5 cm. EN LA SUPERFICIE O CERCA DE ELLA, QUE IMPIDE EL USO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA)

SIMBOLOGÍA

- PARTEAGUAS; CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO
- CURVAS DE NIVEL, INTERVALO 200 m.
- CUERPOS DE AGUA, HASTA EL AÑO 2003.
- ASENTAMIENTO HUMANO, HASTA EL AÑO DE 2003

HIDROGRAFÍA
ORDEN DE LA CORRIENTE

- 3
- 4
- 5
- 6



1:150,000
PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD83, ZONA 14N
CURVA DE NIVEL CADA 200 m

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FIGURA 2.7
MAPA DE EDAFOLOGÍA

DATUM EDAFOLOGÍA: INEGI
ESCALA: 1:50,000, SEGUNDA IMPRESIÓN 1982,
ORTOFOTOS 1:20,000, 02/2003.

2008

3. METODOLOGÍA

Para describir y analizar las formas y geometrías del relieve, se ha usado el enfoque de mapeo geomorfológico analítico, aplicado a la morfogénesis, morfoestructura, morfometría y morfocronología de la cuenca (Verstappen y Van Zuidam, 1991). El relieve de la cuenca, interacciona con dos fenómenos, uno de origen natural y otro de tipo antrópico, que intervienen en intensificación de la acción de agentes modeladores del relieve; estos son la hidrología superficial y el uso del suelo. Para describir la hidrología se ha utilizado la modelación hidrológica de cuencas no aforadas, mediante la creación de tormentas sintéticas, que junto a un modelo de abstracciones, generan los hidrogramas de escurrimiento (Aparicio, 2003). Esta información, ayuda a entender la manera en que las tormentas generan procesos intensos como la erosión laminar y concentrada, que se relaciona con la morfometría del terreno (longitud, inclinación y orientación de la ladera).

Para evaluar la capacidad de infiltración, en el caso de cuencas no aforadas, los parámetros del modelo de infiltración se pueden estimar a partir de las características físicas y de cubierta del suelo (Martínez, 1996). Los modelos de estimación de la infiltración, se clasifican con base a las características del objetivo de estudio y de la cantidad y calidad de la información con que se cuenta. Se pueden aplicar los modelos semi-empíricos, homogéneos, no-homogéneos, y los que describen la relación humedad-estiaje (se extrae agua del suelo en cantidades importantes), y los que consideran los almacenamientos superficiales (EPA, 1998).

En este trabajo de estudio, se realizó el cálculo de las retenciones de la lluvia a partir del modelo de infiltración desarrollado por Green-Ampt (Aparicio, 2003), clasificado como No-homogéneo, ya que considera a los perfiles del suelo como uniformes a lo largo de su profundidad; además de que considera la manera en que el agua se distribuye, como constante y homogénea desde el inicio del proceso de lluvia.

Finalmente, para explicar la relación de las variables biofísicas en la aceleración del proceso de erosión hídrica, se ha utilizado la lógica difusa. La ponderación de cada variable, se hace con base a la forma en que interactúa en el terreno, estas variables son el uso del suelo, las isoyetas, las tasas de infiltración, el gasto de escurrimiento, el tipo de cobertura vegetal y la geomorfología morfométrica, descritas a partir de sus clases.

Se aplica un análisis de coincidencia entre la información morfodinámica (mapa de procesos erosivos acelerados en el terreno), y el resultado del análisis por lógica difusa, lo que ayuda a

comprender la forma en que las variables biofísicas interactúan, de manera que las estrategias consideradas permiten reducir, limitar y solucionar el peligro de erosión hídrica acelerada.

Una de las primeras etapas del desarrollo del proyecto, ha sido la revisión bibliográfica, en la que los artículos seleccionados fueron de revistas especializadas en el tema de procesos geomorfológicos, de edición nacional e internacional; esta revisión se aplicó a libros, tesis y mapas consultados.

La cartografía impresa utilizada en este trabajo, es la topografía (del año 2002), uso del suelo y vegetación (del año 1977) y edafología (del año 1980), editada por el INEGI. El tema de geología es de documentos cartográficos impresos editados en 1998 y 2002, por el Consejo de los Recursos Minerales (COREMI), el INEGI en 1977 y del Instituto de Geología de la UNAM en 1992. Las fotografías aéreas usadas, en la interpretación del uso del suelo y vegetación para el año de 1993, y en la definición de las unidades morfogenéticas, son de edición del INEGI a escala 1:75,000 y 1:40,000; y para la revisión del año de 2004 se usaron las ortofotos a escala 1:20,000 del INEGI.

Cada una de las cartas topográficas y temáticas se escanearon a una resolución de 300 dpi y el formato del archivo fue jpg. Las cartas escaneadas, se importaron en el SIG ILWIS 3.2, donde se creó su georreferencia para digitalizar la información en formato vectorial. La estructura general de trabajo se muestra en la Figura 3.1.

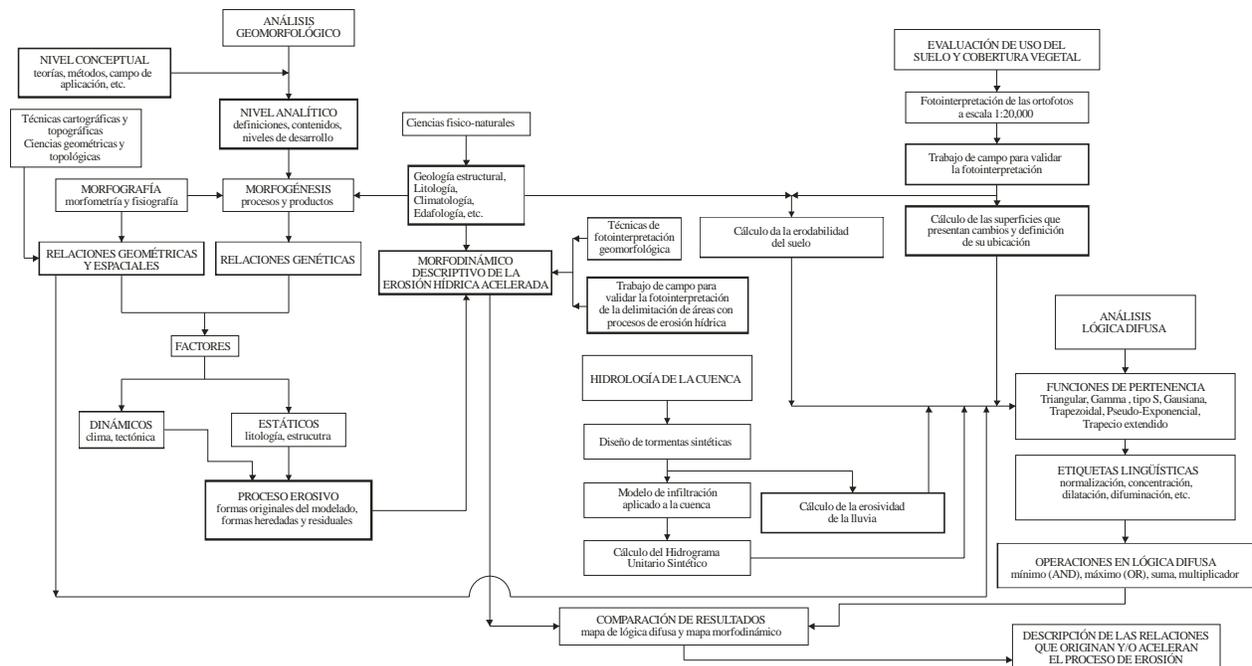


Figura 3.1. Esquema metodológico de trabajo

3.1. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA

Las diversas definiciones del mapa geomorfológico lo muestran como la representación sintética del paisaje, a partir de sus relaciones al interior de cada unidad territorial (Rodolfo, 1983 *cit.* en Peña, 1997); estas unidades se obtienen a través de la interpretación, el análisis y la relación de los eventos y sus resultados (Panizza, 1972 *cit.* en Peña, 1997), en el que se aplican normas generales para definir los contenidos de los mapas, mediante signos y elementos cartográficos, logrando una descripción del relieve en un lenguaje simbólico coherente (Peña, 1997).

El mapa geomorfológico contiene la descripción de las formas del relieve ya sea individuales ó en asociaciones territoriales, en los que se detalla la génesis, su evolución y dinámica con el entorno, mediante la explicación de los resultados de los procesos modeladores, auxiliándose con la topografía, hidrografía, geología, morfometría, morfografía, morfogénesis, morfocronología y morfodinámica (Verstappen y Van Zuidam, 1991).

Los mapas geomorfológicos se pueden definir como generales o específicos, por la forma en que representan las características del relieve. Por el grado de aplicación, se dividen en básicos (generales o parciales); en aplicados (específicos) y en especiales, estos últimos son creados para la solución de un problema en particular (Peña, 1997). Por su escala, se dividen en grandes (1:10,000 a 100,000); medianos (1:100,000 hasta 1:1,000,000); y pequeños (1:1,000,000 hasta 1:30,000,000 o menores) (Peña, 1997). Con base al tema que explica, son: morfoestructurales, morfométricos, morfográficos, morfogenéticos, morfocronológicos y morfodinámicos. A partir de la extensión de las geoformas, pueden ser individuales, por regiones y sub-regiones (Verstappen y Van Zuidam, 1991).

Otra clasificación es con base en la finalidad de su realización, que puede ser de tipo preliminar ó definitivo. Y de acuerdo al grado de especialización, se pueden dividir en analíticos, cuyo soporte lo proporciona la morfogénesis y la morfografía; de tipo sintético, que incluyen a los analíticos y a otros parámetros del terreno (cartografía ambiental, análisis del terreno) y los mapas de tipo pragmático, que buscan solucionar problemas ambientales específicos (Verstappen, 1983 *cit.* en Tapia-Varela y López-Blanco, 2002; Peña, 1997).

Uno, de los diversos sistemas de clasificación geomorfológicos, se desarrolló a partir de los trabajos de Verstappen y Van Zuidam (1968, 1991); Van Zuidam y van Zuidam-Cancelado (1979), en el International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (I.T.C.)

en los años 70's. Otro sistema es de la Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), donde el mapeo se realiza destacando los *Land Systems*, que representan la unidad cartografiable del terreno, la cual aparece subordinada a elementos como la morfología, suelo y vegetación. Otro sistema es el Canada Land Inventory; que al igual del método australiano aplican las fotografías aéreas como herramientas básicas en la delimitación de los niveles progresivos de clasificación, tales como: *Land region, Land district, Land system y Land type* (Peña, 1997).

La metodología del sistema del ITC, busca generar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los eventos naturales vinculados (Verstappen, 1968; Van Zuidam y van Zuidam-Cancelado, 1979; Van Zuidam, 1991), considerándose herramientas importantes en la evaluación de peligros y riesgos naturales. Incluso aportan un análisis exhaustivo de las relaciones que ocurren en el relieve, entre variables biofísicas, lo que ayuda a reconstruir la evolución geomorfológica, definida por el dominio de agentes endógenos y exógenos (actuales y pasados), sintetizados por la vinculación de la morfometría y morfografía, desde datos de tipo morfodinámico, morfogenético y morfocronológico, junto a los datos ambientales (Verstappen y Van Zuidam, 1991).

Esta información del relieve, tanto de materiales como de procesos, se representa en tres tipos de mapas, como son: el Mapa Geomorfológico Analítico, el Mapa Geomorfológico Sintético y el Mapa Geomorfológico Pragmático. En el caso específico de este trabajo, se utilizó ampliamente el mapeo geomorfológico analítico, para describir el terreno de la cuenca.

3.1.1. MAPA GEOMORFOLÓGICO ANALÍTICO

Los mapas geomorfológicos analíticos proporcionan información sobre las formas del relieve y procesos, se destacan los que describen la morfogénesis y la morfocronología, e incluyen a las morfoestructuras (Verstappen y Van Zuidam, 1991). Los tipos de mapeo se realizan con base a un orden jerárquico (Verstappen y Van Zuidam, 1991) como:

1) Mapa morfogenético: ayuda a describir la distribución espacial de las formas del terreno, en las que se explica la relación entre morfología y la génesis, es decir se le clasifica al relieve con base a su origen y evolución, representados en unidades geomorfológicas, siempre y cuando las formas sean cartografiables a la escala de mapeo especificada; por lo que si las formas son muy pequeñas o se consideran no relevantes en el mapeo, se trazarán como símbolos lineales. Las unidades morfogenéticas cartografiadas se pueden agrupar en nueve clases, donde el color del

trazo depende del origen específico de los materiales como: estructural en púrpura, volcánico en rojo, denudatorio en café, fluvial en verde, lacustre/marino en azul oscuro, glacial/periglacial en azul claro, eólico en amarillo, cárstico en naranja y antropogénico/biológico en gris claro.

2) Mapa morfoestructural: muestra el análisis geomorfológico del terreno de la cuenca a partir de la litología, pues esta variable condiciona en gran medida la morfografía del terreno, e influye en la velocidad con que ocurren los procesos. En el mapa de morfoestructuras aparece la litología en forma de retícula o achurado, en color gris. Además, se indican las disyunciones, inclinaciones y rupturas de pendiente y los tipos de materiales.

3) Mapa morfocronológico: ilustra las temporalidades de los materiales, la cuál es la datación de los materiales que conforman el relieve. Se recomienda un sistema de letras que indique la información del terreno.

Para crear el mapa geomorfológico analítico morfogenético, se definió la fragmentación del relieve de la cuenca en unidades con base a cuatro tipos de relieves, como son: 1) laderas de montaña, 2) lomeríos, 3) piedemonte y 4) planicies (Tapia-Varela y López-Blanco, 2002). Para diferenciar estas cuatro clases de componentes del relieve, se aplicó la información de altura relativa, de forma que si la amplitud es mayor a 200 metros se está dividiendo a las laderas de montaña de los lomeríos; no obstante se cuidó de relacionar esta información con la referente a los cambios y rupturas de pendiente, el tipo de vegetación, etc.

Si la amplitud de relieve es menor a 200 metros, se delimita a los lomeríos; que incluyen información de tipo morfográfico, es decir estructuras dómicas, flujos lávicos, etc. (Tabla 3.1). Los piedemonte, se definen porque se contienen porciones de rupturas de pendiente en la parte baja de las laderas, además de que se presenta un marcado depósito y acumulación de materiales acarreados de las partes altas; en ocasiones existe poca vegetación y la hidrografía no es muy ramificada, ya que aparece un solo cauce principal.

Tabla 3.1. Altura relativa aplicada a la delimitación de las unidades morfogenéticas de la cuenca, diferenciadas por origen general y específico.

Clase del relieve	Altura relativa, m
Ladera de montaña	>200
Lomerío	0-200
Piedemonte	0-100
Planicie	0-50

Las planicies, se delimitaron, por la característica de que aparecen con pocos cambios de elevaciones, y en algunos casos, el uso del suelo es de tipo agrícola o urbano. Este tipo de relieve

apoya en la foto-identificación, de los materiales y temporalidad de los mismos. En estas unidades de terreno, no es visible una red hidrográfica, o en su caso, el relieve es cortado o interrumpido por un cauce principal.

La información del mapa geomorfológico analítico de tipo morfogenético, se obtuvo al interpretar las fotografías aéreas a escala 1:75,000 que cubren toda la superficie de la cuenca. El trazo de estas unidades morfogenéticas, se hizo a partir de los cambios y/o rupturas de pendiente, el uso del suelo, el tipo de cobertura vegetal, la altura relativa, el tono, textura, tamaño, arreglo y sombras. Otra información adicional, usada en la delimitación de las unidades fue la densidad de drenaje, la morfografía del relieve (tipo de formas y orientación de las laderas), la morfometría y la posición topográfica de los elementos junto a la geología de la cuenca.

Se digitalizaron las unidades morfogenéticas en vectores, esto implica que las fotografías aéreas de escala 1:75,000, fueron corregidas de la distorsión producida por el relieve, la óptica de las lentes de la cámara fotográfica, del movimiento del aeroplano, etc. Para hacer esta corrección se utilizó un MDT de 5 metros de resolución espacial. En la georreferencia se utilizaron como apoyo los caminos, parcelas agrícolas, carreteras, ríos, calles de localidades y ciudades.

Cuando se genera la georreferencia, el software SIG calcula el valor del error (ec. 3.1), con base a la relación de la sumatoria de las diferencias encontradas para los puntos insertados, y los grados de libertad considerados por cada tipo de transformación considerada.

$$\sqrt{\frac{\sum (Dcol^2) + \sum (Dfila^2)}{(n - gl) * 2}} \quad (3.1)$$

donde: *Dcol*, es la diferencia que existe entre las columnas de los puntos insertados en la georreferencia; *Dfila*, es la diferencia que existe entre las filas de los puntos insertados en la georreferencia; *n*, cantidad de puntos activos ó insertados; *gl*, es el grado de libertad, igual al número de puntos requeridos para una transformación significativa (en ortofotos *gl*= 3, y para crear una georreferencia de tercer orden *gl*= 10).

El ITC (1997), explica que para tener una buena georreferencia cada punto de control, definido como bien ubicado la fotografía, presenta valores inferiores a 2 (dos) en las variables *Dfila* y *Dcol*, por lo que se consideran óptimo.

La información morfométrica de la cuenca de tipo inclinación de la pendiente, se obtuvo a partir de aplicar las ecuaciones 3.2 y 3.3 y se clasificó con el criterio de Verstappen y

(Verstappen y Van Zuidam (1991) (Tabla 3.2). Las operaciones requieren de obtener primero los valores en porcentajes de inclinación (ec. 3.2) para convertirlos a grados (ec. 3.3).

$$\text{Mapa_pend_porc}=100 * \text{HYP}(\text{DX},\text{DY})/\text{PIXSIZE}(\text{MDT}) \quad (3.2)$$

donde: *HYP*, es la hipotenusa de los valores de los vectores *X* e *Y*, $\sqrt{x^2 + y^2}$; *DX*, es la distancia horizontal del centro de celda a celda; *DY*, es la diferencia vertical del centro de celda a celda; *PIXSIZE*, es la función que genera las dimensiones de la celda a partir del MDT; *100*, constante que se aplica para que los valores resultantes estén en porcentaje; *Mapa_pend_porc*, es el nombre del mapa de inclinación de terreno, en porcentaje.

$$\text{Mapa_pend_grad}= \text{RADDEG}(\text{ATAN}(\text{mapa_pend_porc}/100)) \quad (3.3)$$

donde: *RADDEG*, es la operación que convierte los valores de la inclinación de la pendiente de porcentaje a grados; *Mapa_pend_porc*, es el mapa con valores de inclinación del terreno en porcentajes; *ATAN*, es la función trigonométrica que obtiene los valores del arco tangente de la inclinación de la pendiente que está en radianes; *100*, es la constante aplicada para convertir el valor de porcentaje a radianes; *Mapa_pend_grad*, es el nombre del mapa que contiene datos de la inclinación de la pendiente en grados.

La información morfocronológica para la cuenca, se obtuvo de los datos geológicos referentes a la edad de los materiales, así como de la extensión de cada unidad geológica que conforma el terreno; que se divide en dos temporalidades importantes. Por ello se localizan agrupadas en dirección norte, los materiales más antiguos que han sido colocados al descubierto por los movimientos orogénicos antiguos. En la porción centro y sur de la cuenca, se localizan las rocas más recientes, que se subdividen en dos áreas: una al centro, que define a la litología más reciente, de origen exógeno por acumulación de materiales acarreados y depositados; y una segunda franja, al este y oeste de la cuenca, conformada por materiales volcánicos, que son producto de eventos efusivos recientes.

Las morfoestructuras, aparecen como disyunciones del relieve que expresan la presencia de dos fosas tectónicas importantes, como son: La Saucedá y El Bajío, originadas por fallas normales, ubicadas en las localidades ó planicies del mismo nombre. La fosa tectónica La Saucedá, genera una depresión de dirección Este-Oeste, en el límite sur de la cuenca; y la fosa tectónica El Bajío, genera la frontera oeste del parteaguas de la cuenca. Sobre este relieve

aparecen materiales de tipo aluvial. Queda un tercer bloque de material rocoso ubicado en la porción norte, que origina la parte montañosa de la cuenca. Sus rocas son tipo tonalita, esquistos, pizarras, dacitas, basaltos y contiene vegetación de tipo bosque de encino y matorrales de plantas no espinosas.

Tabla 3.2. Clasificación del relieve, con base a la inclinación de pendiente (Verstappen y Van Zuidam 1991).

Orden	Clase		Procesos dominantes y condiciones del terreno	Colores y símbolos aplicables
	(°)	(%)		
1	0 - 2	0 - 2	Plano o ligeramente plano. Denudación no apreciable, sin problemas para el transporte y la agricultura.	Verde oscuro
2	2 - 4	2 - 7	Ligeramente inclinado. Movimientos en masa de velocidad baja de diversos tipos, especialmente en condiciones periglaciales, de soliflucción y fluviales (flujo laminar y de riachuelos). Se recomienda arar de forma paralela a la ladera. Peligro de erosión.	Verde claro
3	4 - 8	7 - 15	Inclinado. Semejante en lagunas condiciones al anterior, pero es poco útil para cultivar. Peligro severo de erosión de suelo.	Amarillo
4	8 - 16	15 - 30	Moderadamente empinado. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente soliflucción-periglacial, reptación, erosión laminar y de riachuelos, y deslizamientos aislados. La agricultura solo se realiza mediante el uso de terrazas. Acceso difícil para vehículos especializados. Peligro de erosión de suelo y deslizamientos.	Naranja
5	16 - 35	30 - 70	Empinado. Procesos denudatorios intensos de diversos tipos (erosión en cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Posibilidades limitadas de agricultura y manejo, cultivos solo en terrazas. Peligro extremo de erosión del suelo.	Rojo
6	35 - 55	70 - 140	Muy empinado. Caída de rocas, procesos denudatorios intensos, depósitos de derrubios, agricultura y manejo imposibles, uso forestal probable.	Rojo oscuro
7	> 55	> 140	Extremadamente empinado. Caída de rocas. Procesos denudatorios fuertes, especialmente denudación en muro, peligro de rodadas de rocas. Agricultura imposible. Limitado a cubierta forestal.	Magenta

3.1.2. MAPA GEOMORFOLÓGICO MORFODINÁMICO, A ESCALA 1:20, 000

Existen diversas formas en que se remueve el suelo, por acción de agentes que los transportan y depositan. El agua, es uno de los agentes que modelan el relieve continuamente siempre que circula sobre la superficie del terreno en forma de microcauces, cárcavas, y barrancos (Morgan, 1995). Sin embargo, en las etapas iniciales del proceso ocurre la erosión del suelo de tipo laminar y por salpicadura de las gotas de lluvia. Explicar los procesos de erosión hídrica acelerada es importante, pues además de degradar al paisaje, origina peligros que impacten a las actividades antrópicas y genere pérdidas económicas y de propiedades.

Al inicio de cada periodo estacional de lluvias, se genera la mayor cantidad de tasas de erosión del suelo, pero a medida que la vegetación crece, disminuye la generación de sedimentos de forma que este proceso se presenta con mayor intensidad, al inicio de cada ciclo de lluvias

(Morgan, 1995). El análisis morfodinámico, aplicado al proceso de erosión hídrica, ayuda a explicar la dinámica que ocurre en el interior de la cuenca, relacionando los procesos erosivos con la información de tormentas extremas y los materiales, para entender la manera en que se produce la remoción de sedimentos y nutrientes del suelo, de forma acelerada.

Una tormenta se define por tres variables: cantidad, duración y frecuencia. La cantidad, es el volumen de lluvia total que cae, en milímetros, sobre un sitio. La duración, es el lapso de tiempo que transcurre desde que inicia y hasta que finaliza la tormenta. La frecuencia, es el intervalo de tiempo que pasa para que se vuelva a presentar una tormenta con la misma intensidad (Aparicio, 2003). Esto significa que cada tormenta extrema, se explica por la duración ó por la cantidad de lluvia con que se registra en determinado sitio. El análisis de los eventos extremos de lluvia se realiza con base en los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en ese territorio.

Para ubicar las áreas que tienen procesos de erosión hídrica acelerada, se tuvo que realizar una fotointerpretación, a partir de las ortofotos del año 2003-2004, que están a escala 1:20,000 y son editadas por el INEGI. Para lograrlo, se crearon en el SIG cada uno de los modelos estereoscópicos a partir del MDT y las ortofotos, mediante la ecuación 3.4, como:

$$ME53A = StereoPairFromDTM(OFF14C53A, MDT) \quad (3.4)$$

donde: *ME53A*, es el nombre del archivo que significa: Modelo Estereoscópico de la ortofoto F14C53A (cada ortofoto le da el nombre al archivo respectivo); *StereoPairFromDTM*, es la orden que llama al procedimiento en *ILWIS* que crea el modelo estereoscópico; *OFF14C53A*, es el nombre de la ortofoto; *MDT*, es el modelo digital de elevaciones del terreno.

Al crear la imagen estereoscópica de la ortofoto, el software tuvo que transformar la escena en un segmento izquierdo y uno derecho, con un ángulo visual de 30° para el operador. Estas escenas son calculadas para ser proyectadas de manera coplanar, con base a la altura de terreno de referencia (tomada del MDT). Las filas de la imagen resultante, tanto de la escena izquierda como derecha, están en proyecciones paralelas y en ángulo recto a las columnas sobre dos planos transformados por desplazamiento del relieve, este desplazamiento queda definido por el MDT base, por un diferencial en la dirección del eje coordenado *X*, denominado *paralaje-x*, lo que crea la visión estereoscópica.

Cada escena, se calcula fila por fila; las cuales son modificadas a partir de la ortofoto base y tienen la misma ubicación (coordenadas) en cada uno de los dos mapas de salida.

Una vez generadas las ortofotos modificadas a través del MDT, se despliegan en pantalla, y con el estereoscopio de espejos se trazan polígonos que representen a los procesos erosivos por tipo e intensidad, tomando como referencia la forma, el tono, la textura y las dimensiones de longitud y área.

En una primera etapa y a partir de la fotointerpretación, los procesos de erosión hídrica acelerada, se clasificaron de acuerdo al tipo descrito en la Tabla 3.3, donde se listan las tres clases utilizadas. En una segunda etapa, con base a los rasgos mapeados y al trabajo de campo, se detalló la clasificación a partir del trabajo de campo realizado.

Tabla 3.3. Clasificación de erosión por tipo.

Tipo	Elementos descriptivos
Laminar	Ausencia de canales de drenaje.
Microcauces	Canales de drenaje con profundidades menores a 50 cm.
Cárcavas	Canales de drenaje con profundidades mayores a 50 cm.

En algunas escenas de la imagen estereoscópica, el fenómeno de erosión hídrica acelerada, abarca algunas centenas de metros cuadrados. Para diferenciar el flujo concentrado, primero se identifican los eventos lineales, es decir aquellos que cortan la ladera de forma transversal a las curvas de nivel (Figuras 3.3 y 3.4) y además muestran un desarrollo longitudinal (en campo se midió su profundidad). Las cárcavas son eventos que presentan profundidades mayores a los 50 centímetros, su extensión puede ser de algunas decenas de metros. Los microcauces, alcanzan una profundidad menor a 0.50 m y su extensión puede alcanzar varios metros.

Cada tipo de proceso erosivo hídrico acelerado, impacta al suelo con diferente grado de intensidad, esto se debe a la fuerza con que impacta el agua de lluvia al suelo, y el tipo de flujo superficial presente de acuerdo a la energía potencial (diferencia de nivel expresado en la inclinación del terreno y en la longitud de la ladera), y de su energía cinética. En campo, con base a esta intensidad, se utilizaron las clasificaciones de las Tablas 3.4 y 3.5, para eliminar la subjetividad en la clasificación del tipo e intensidad del evento erosivo por acción del agua.

Tabla 3.4. Clasificación de la intensidad para la erosión laminar.

Intensidad	Descripción
Ligera	El horizonte A está parcialmente erosionado.
Moderada	El horizonte A está muy delgado por la eliminación de material fino, en algunos lugares ha desaparecido.
Severa	El horizonte A desapareció, y el horizonte que le subyace está erosionado parcialmente.

Tabla 3.5. Clasificación de la intensidad para la erosión por microcauces, cárcavas y barrancos.

Profundidad de los microcauces y las cárcavas (en cm)	Separación entre los microcauces y las cárcavas (en metros)					
	< 5	5 - 15	15 - 50	50 - 150	150 - 500	> 500
< 50	Severo	Moderada	Ligera			
50 – 150	Severo	Severo	Moderada	Ligera		
150 – 500	Severo	Severo	Severo	Moderada	Ligera	
> 500	Severo	Severo	Severo	Severo	Moderada	Ligera

Nota: se consideran microcauces, si su profundidad es menor a 50cm; cárcava si la profundidad está entre 50 y 500 cm; barrancos, si la profundidad es mayor a 500 cm.

En la Tabla 3.6, se muestran las clases definitivas, que se aplicaron para crear el mapa morfodinámico, en esta se describen las clases por tipo e intensidad de la erosión hídrica acelerada, que se foto-identificaron sobre la cuenca del río Guanajuato.

Tabla 3.6. Clases aplicadas por tipo e intensidad de erosión hídrica, presentes en la cuenca.

Tipo de Intensidad	Clase de intensidad	Acarreo de material
Laminar	Leve	Si
	Moderada	Si
	Severa	Si
Cárcavas	Leve	Si
	Moderada	Si
	Severa	Si
Microcauce	Leve	Si
	Moderada	Si
	Severa	Si

Para validar la información obtenida por fotointerpretación, se procedió a realizar la verificación en campo, que incluyó una revisión de las características de longitud y profundidad de los rasgos erosivos existentes en el terreno, en diferentes espacios aleatorios. Los criterios usados fueron revisar el grado de incisión vertical del terreno, socavación provocada por efecto de la acción del agua y medir su superficie y longitud que cubre sobre el terreno. Cabe indicar, que aunque en la mayor parte del terreno ocurre la erosión por flujo laminar, en este caso se aplicó el concepto y clasificación, a los lugares donde hay evidencia de que se ha eliminado poco o parcialmente la capa más superficial del suelo. Esto significa que el material orgánico ha desaparecido en algunas áreas, y en ocasiones aparecen rasgos como es la eliminación de material orgánico por este proceso.



Figura 3.2. Detalle de erosión hídrica laminar y por salpicadura.



Figura 3.3. Erosión hídrica por microcauces y flujo subsuperficial.



Figura 3.4. Erosión hídrica en cárcavas y riachuelos.

3.2. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA

3.2.1. DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA

En el interior de la cuenca, el orden de las corrientes, se obtuvo a partir de la clasificación de los tributarios del cauce principal, conforme se van incorporando a la red de drenaje principal. Donde inicia la corriente toma el valor de 1, en la confluencia de dos tributarios de orden 1, se forma uno de orden 2, en la coincidencia de dos tributarios de orden 2, se genera uno de orden 3, y así sucesivamente (Campos, 1984).

La densidad de corrientes, es el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área, y se evalúa con la ecuación 3.5.

$$D_c = \frac{N_c}{A_u} \quad (3.5)$$

donde: D_c , es la densidad de corrientes, número de cauces/m²; N_c , es el número de cauces perennes o intermitentes; A_u , es el área unitaria, m².

La densidad de drenaje es la longitud de las corrientes por unidad de área, calculado con la ecuación 3.6.

$$D_d = \frac{L_c}{A_u} \quad (3.6)$$

donde: D_d , es la densidad de drenaje, m/m²; L_c , es la longitud de cauces, en m; A_u , es el área unitaria, m². El área A_u , se toma como la extensión total de la cuenca, o se puede cubrir por microcuencas, para tener un resultado por sectores.

La inclinación del cauce principal, interviene en la velocidad de respuesta de la cuenca ante una lluvia. El valor se calcula por el método de Taylor y Schwarz (Aparicio, 2003) (ec. 3.7), a partir de tramos de longitud diferente, como:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l}{\sqrt{S_1}} + \frac{l}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (3.7)$$

donde: S_m , es la pendiente propia del tramo, m/m; l_m , es la longitud del tramo de la pendiente S_m , m; L , es la longitud total del cauce principal, m; S , es la pendiente promedio del cauce principal, m/m.

3.2.2. ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD Y ALEATORIEDAD DE LOS REGISTROS DE LLUVIA

Si al evaluar las series de datos de lluvia, se resuelve que son homogéneos, significa que la muestra proviene de una población única. Si la serie no es homogénea, se deben hacer ajustes o correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestradas sean válidas para parámetros poblacionales (Campos, 1984). La homogeneidad se puede perder por diversas causas, ya sea por cambios físicos en una estación pluviométrica (pluviógrafo, pluviómetro, operador, cambios de un lugar a otro) y por modificaciones o cambios en el medio ambiente (deforestación, incendios, uso del suelo, etc.). Las pruebas estadísticas de homogeneidad, presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla con base en la probabilidad de ocurrencia. Si dicha probabilidad es pequeña la serie no es homogénea, si es grande, la serie de datos es homogénea (Campos, 1984; Escalante *et al.*, 2002).

Para hacer el análisis de la homogeneidad de las series de datos, se utilizan las pruebas paramétricas si existen funciones de distribución que comprueben la hipótesis nula y las alternativas; en caso contrario se aplican las pruebas no paramétricas. Entre las primeras aparecen la prueba de Helmer, la de las Secuencias y entre las segundas la prueba *t* de Student, y la de Cramer (Campos, 1984; Escalante *et al.*, 2002). Además, para aplicar los datos de altura de lluvia en las funciones de distribución, se requiere de que sean aleatorios, para verificarlo, se usa la prueba de independencia de Anderson (Escalante *et al.*, 2002).

Para lograr aplicar las pruebas estadísticas de homogeneidad y aleatoriedad a los registros de lluvia, se tuvo que procesar la información para organizarla, es decir debido a que la base de datos arroja la información en columnas continuas como se ilustra en la Tabla 3.7 (observe que las filas se agruparon) no se podía procesar la información rápidamente, por lo que se programó en el software Excel para ordenar los datos en forma horizontal para cada año. Esto ayudó a obtener resúmenes, en los que aparecen los datos máximos por mes y año. Este proceso ayudó a descartar los años con registros incompletos (en el Anexo A, aparece listado el macro en VB-Excel usado para arreglar la información de los registros, desde el formato vertical al formato horizontal, con resúmenes mensuales y anuales).

Tabla 3.7. Detalle del listado de información generado por la base de datos BASECLI (el número de fila en la izquierda, está agrupado).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	dia	mes	anio	tamb	tmax	tmin	preci	evap	est	
2	1	7	65	13.5	20	13	0		8	
3	2	7	65	15	21	12	0		8	
4	3	7	65	13.5	22	12	20		8	
27	26	7	65	15	22	14	0		8	
28	27	7	65	15	21	13.5	1.9		8	
29	28	7	65	16	25	14	0		8	
30	29	7	65	15	25	14	1.5		8	
944	29	1	68	5	23	5	0		8	
945	30	1	68	2.5	22.5	2.5	0		8	
946	31	1	68	3	22.5	2	0		8	
947	1	2	68	3	26.5	3	0		8	
948	2	2	68	9.5	26	2.5	3		8	
949	3	2	68	9.5	22	-1	6.5		8	
10632	15	7	98	18.5	25.5	8.5	5		8	
10633	16	7	98	15.5	26.5	6.5	0		8	
10634	17	7	98	16.5	26.5	12.5	6		8	
10635	18	7	98	17	27.5	13	0		8	
10649	1	8	98	16	26.5	14	0		8	
10650	2	8	98	15	25	13	0		8	
10651	3	8	98	16	24	14	0		8	
10710										
10711										

3.2.3. CONSTRUCCIÓN DE TORMENTAS SINTÉTICAS

3.2.3.1. PERIODO DE RETORNO, T

El periodo de retorno queda definido como el número de años promedio para que un evento de magnitud X sea igualado ó excedido por lo menos una vez, y se calcula con la ecuación 3.8. Para el análisis de dichas tormentas de diseño, se pueden escoger los periodos de retorno siguientes (Ruiz, 2002): $T = 2, 5, 10, 20, 50$ y 100 años. Los valores de la altura de lluvia asociada a una duración y/o a un periodo de retorno determinado, se obtienen mediante la representación de los valores calculados mediante las funciones de distribución, la cuál busca explicar en forma matemática el comportamiento de las tormentas para un espacio de la superficie terrestre determinado.

$$T = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{[1 - P(X \leq x)]} \quad (3.8)$$

3.2.3.2. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZADAS

Las funciones de distribución aplicadas son: Exponencial de 1 parámetro, Gamma de 2 parámetros, Gumbel, Gumbel de 2 poblaciones, Log-Normal de 2 parámetros, Nash, Normal, Pearson III (tres parámetros). Para seleccionar la ecuación de mejor ajuste, se tuvo que calcular la función de bondad de ajuste Kite (1988) *cit.* en Escalante *et al.* (2002). En este caso de estudio, se aplicaron los métodos de error cuadrático mínimo (Ruiz, 2002) y la revisión de los valores calculados por las funciones (Anexo D).

3.2.3.3. PREDICCIÓN DE AVENIDAS EN CUENCAS NO AFORADAS

El diseño de tormentas sintéticas, tiene como objetivo definir la precipitación máxima en relación a la duración de la tormenta (Martínez, 1996), lo que es muy útil en cuencas no aforadas, ya que esta tormenta de diseño se representa con las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno ($I-D-Tr$). Esta curva permite calcular el hidrograma unitario sintético de diseño que interviene en la predicción de avenidas asociadas a un periodo de retorno específico. Esto ayuda a ubicar espacialmente, las porciones del territorio que generan el valor más alto de escurrimiento, así como las cantidades aproximadas en que la lluvia es retenida en el suelo. Al restarle a la lluvia total la cantidad que es retenida en el suelo, se obtiene la precipitación que se transforma en escurrimiento.

La predicción de avenidas en cuencas no aforadas, se realiza en tres etapas (Martínez, 1996), que son:

- A. Un hidrograma de entrada (hidrograma unitario sintético)
- B. Un modelo de infiltración (modelo de Green-Ampt, Curva N, etc.)

C. Un modelo de transformación de lluvia efectiva a escurrimiento.

3.2.3.3.1. CÁLCULO DEL HIDROGRAMA DE ENTRADA

Se crean los hidrogramas unitarios sintéticos a partir de las curvas $i-d-T$ (intensidad-duración-periodo de retorno). Esto significa que se analiza toda la cantidad de lluvia que cae en un tiempo de duración igual o menor al tiempo de concentración de la cuenca. Para su construcción se deben seguir los siguientes pasos (Martínez, 1996):

1. Definir la duración total y los intervalos de la tormenta
2. Obtener las alturas de lluvia para las duraciones y periodos de retorno de diseño.
3. Corrección de las alturas de lluvia por tamaño de cuenca
4. Obtener los incrementos de lluvia y su arreglo, en hidrogramas de diseño.

3.2.3.3.1.1. SELECCIÓN DE LA DURACIÓN TOTAL Y DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO

El tamaño y tipo de cuenca influye en el cálculo de la duración total de la tormenta (D), así como en los incrementos de los intervalos (Δt). Por ejemplo, en cuencas pequeñas, la duración de la tormenta puede ser de minutos, mientras que en cuencas grandes, es de días. De forma que el análisis en las cuencas pequeñas se centra en las características fisiográficas, mientras que en las cuencas grandes, el análisis se centra en analizar los gastos que transitan sobre el cauce principal. El intervalo de tiempo, que es la subdivisión de la tormenta, debe ser pequeño para obtener el hidrograma de la avenida lo más definido posible. El escurrimiento pico está relacionado con la intensidad de la lluvia, ésta disminuye en cantidad si la duración de la tormenta se incrementa, es decir. Para definir los intervalos de tiempo se aplica el criterio de la *U. S. Army Corps of Engineering* (1982) cit. en Martínez (1996), a través del uso del tiempo de retraso, t_r , mediante la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Intervalos de tiempo típicos para el diseño de tormentas sintéticas.

t_r (horas)	Δt (horas)
$4 < t_r \leq 6$	1
$6 < t_r \leq 12$	2
$12 < t_r \leq 16$	3
$t_r > 6$	6

El tiempo de retraso (t_r), se define como el intervalo de tiempo transcurrido entre el primer escurrimiento y el escurrimiento máximo:

$$t_r = 0.60 t_c \quad (3.9)$$

donde: el tiempo de concentración t_c , se calcula con la fórmula de Kirpich (Escalante *et al.*, 2002):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (3.10)$$

donde: t_c , es el tiempo de concentración, en horas; L , es la longitud del cauce principal, en metros; S , es la inclinación de la pendiente del cauce principal, m/m.

El gasto pico, Q_p , se registra a lo largo del tiempo total de la tormenta, denominado duración en exceso, d_e . Su cálculo en cuencas grandes se hace aplicando la ecuación 3.11, mientras que para cuenca pequeñas se aplica $d_e = t_c$.

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \quad (3.11)$$

donde, d_e , es la duración en exceso, en horas; t_c , es el tiempo de concentración, en horas.

3.2.3.3.1.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS I-D-Tr

Cuando se cuenta con información pluviográfica, las tormentas sintéticas se obtienen usando las curvas *I-D-Tr*, por correlación lineal múltiple o realizando un análisis de frecuencia a partir de los registros de altura de lluvia o de los escurrimientos. Pero en este caso de estudio y debido a la carencia de dichas gráficas, se usaron métodos indirectos de transformación. Donde la altura de lluvia se convierte en intensidad asociada a una duración y un periodo de retorno específico. En el caso de no contar con información pluviográfica en las estaciones meteorológicas, se utiliza la ecuación 3.12 (Chen, 1983), en la que se calcula la curva *I-D-Tr*, a partir de los valores registrados de altura de lluvia:

$$I_d^T = \frac{aHp_1^{10} \log(10^{2-F} T^{F-1})}{(d+b)^c} \quad (3.12)$$

donde: I_d^T , es la intensidad de lluvia en mm/hr, asociada a un periodo de retorno T ; y a una duración, d . Hp_1^{10} , es la altura de precipitación asociada a una hora de duración y con un periodo de retorno de 10 años; d , duración de la tormenta, en minutos; a , b , c , se obtienen a partir de la Figura F.1 del Anexo F, debido a que estas variables, son parámetros calculados para el cociente R , se usa la ecuación 3.14, en las curvas de la Figura F.1; la variable F se calcula con la ecuación 3.13.

$$F = \frac{Hp_{24}^{100}}{Hp_{24}^{10}} \quad (3.13)$$

$$R = \frac{Hp_1^{10}}{Hp_{24}^{10}} \quad (3.14)$$

donde: Hp_1^{10} , es la altura de precipitación de duración de 1 hora con un periodo de retorno de 10 años, en mm; Hp_{24}^{10} , es la altura de precipitación de duración de 24 horas y un periodo de retorno de 10 años, en mm; Hp_{24}^{100} , es la altura de precipitación de duración de 24 horas y periodo de retorno de 100 años, en mm.

Para determinar los parámetros Hp_{24}^{10} y Hp_{24}^{100} , a partir de los registros pluviométricos, se aplicó un análisis de frecuencia con las funciones de distribución. En el Anexo D, se puede revisar cada uno de los resultados obtenidos con base a las funciones de distribución de mejor ajuste. La altura de lluvia se obtiene al aplicar la ecuación 3.15.

$$Hp = I d \quad (3.15)$$

De la ecuación 3.14, la solución de la variable Hp_1^{10} , se obtuvo con el valor de $R = 0.527$. Se toma referido a las Tablas 3.9 y 3.10. Se ha considerado este valor ya que en el área de estudio no hay datos máximos horarios de lluvia. Despejando la variable Hp_1^{10} de la ecuación 3.14, se resolvieron las ecuaciones 3.12 y 3.15. Las tormentas de diseño, se calculan para un periodo de retorno de 15 años. Se toma este Tr , ya que las estaciones meteorológicas tienen este promedio de años de registro.

En México, Campos *et al.*, (1990), han calculado para varias estaciones meteorológicas el valor del coeficiente R (ec. 3.14), como se resume en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Factor (R) para lluvia máxima horaria y en 24 horas (ec. 3.14), para las estaciones pluviográficas que rodean al Estado de Guanajuato (Modificada de Campos *et al.*, 1990).

No	Estación	No. de años con registro	Valor del coeficiente R (ec. 3.36)
3	Santa Rita, Gto.	14	0.6000
31	Aguascalientes, Ags.	19	0.3833
5	Guadalajara, Jal.	11	0.5747
13	Molino Blanco, Méx.	14	0.4500
24	Tula, Hgo.	18	0.6250
4	Colotlán, Jal.	7	0.4545

Por otro lado, Escalante *et al.*, (2004), encontraron que la relación de lluvias horarias y diarias para periodos de retorno iguales, muestran un valor del coeficiente R muy semejante. Esto significa que el valor de la variable R es sensible al tamaño de la muestra utilizada (Tabla 3.10).

Explican que para registros inferiores a 20 años, el valor del coeficiente R varía mucho, en comparación de resultados obtenidos en muestras con más cantidad de años de registro.

Tabla 3.10. Variable R, para las estaciones pluviográficas que rodean al Estado de Guanajuato, a partir del número de años de registro (Modificada de Escalante *et al.*, 2004).

Estación	No. de años con registro	Valor del coeficiente R (ec. 3.36)			
		Tamaño de muestra (años)			
		10	15	20	25
Guanajuato, Gto.	15	0.477-0.572	0.517-0.527		
Aguascalientes, Ags.	20	0.450-0.570	0.481-0.542	0.504-0.524	
Guadalajara, Jal.	20	0.552-0.645	0.570-0.641	0.580-0.618	
Toluca, Méx.	25	0.445-0.613	0.488-0.564	0.510-0.544	0.508-0.523
Pachuca, Hgo.	25	0.419-0.510	0.443-0.494	0.456-0.497	0.463-0.473
Morelia, Mich.	20	0.489-0.682	0.528-0.595	0.508-0.544	
Cazadero, Zac.	20	0.537-0.685	0.590-0.646	0.615-0.633	

3.2.3.3.1.3. CORRECCIÓN DE LA ALTURA DE LLUVIA POR ÁREA

Las mediciones de la altura de lluvia en las estaciones meteorológicas se consideran puntuales. Es decir, ocurren variaciones en la cantidad de lluvia registrada en proporción a la superficie de cobertura de la tormenta.

La superficie puntual, donde se considera que al interior no hay variación de los datos de lluvia es de 25 km² (Campos, 1984). En áreas mayores se debe hacer una reducción para adecuarlas al área de influencia de la estación de medición (Campos, 1984). Para ello, se usan los valores de corrección (Figura 3.5) sugeridos por el U. S. Weather Bureau (Campos, 1984), donde la superficie máxima aplicable es de 1050 km² y las duraciones de las tormentas van de los 30 minutos y hasta los 10 días.

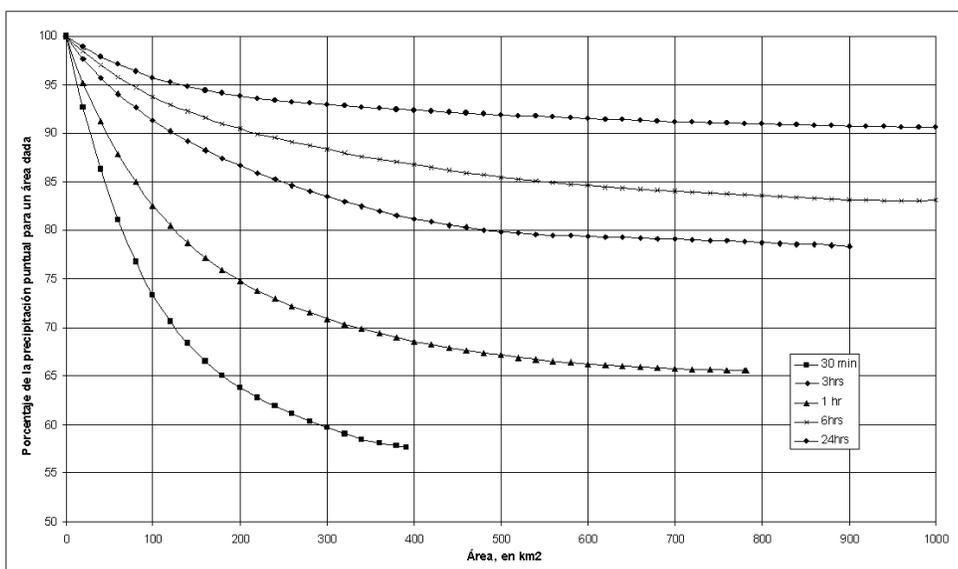


Figura 3.5. Ajuste aplicado a la lluvia puntual por área (Campos, 1984).

3.2.3.3.1.4. CÁLCULO DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO

El hietograma de diseño, producido por esta tormenta, se define para cada altura de precipitación en el intervalo n de tiempo sucesivo de duración Δt sobre una duración total (Chow *et al.*, 1994), calculado con la ecuación 3.16.

$$d_t = n\Delta t \quad (3.16)$$

Al obtener las diferencias de altura de precipitación acumulada para cada intervalo de tiempo calculado, se obtiene la cantidad de precipitación para cada uno de los incrementos de tiempo, Δt . Estos incrementos de lluvia o bloques se reordenan en secuencia alternada, de forma que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración de la tormenta d_t y los demás bloques queden en orden ascendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Chow *et al.*, 1994).

3.2.3.3.2. CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA

La infiltración es el proceso que describe la circulación del agua hacia el interior del suelo. La cantidad con que ocurre este movimiento se llama, tasa de infiltración f_p , la cual es indicativa del valor máximo de retención de agua en el suelo (Chow *et al.*, 1994), esta tasa se expresa en unidades de cm/h o mm/h. Al calcular la infiltración se aplica el tiempo de encharcamiento, t_p , que es el lapso que ocurre entre el inicio de la lluvia y el momento en que el suelo se satura.

Para obtener el valor de la lluvia en exceso, se calcularon las tasas de infiltración meditante el método de Green-Ampt (Chow *et al.* 1994), a través de la ecuación 3.17. Su solución se realiza a partir de los valores de la saturación residual del suelo, porosidad efectiva, porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, porosidad total del suelo, succión capilar del frente húmedo, conductividad hidráulica saturada (ecuaciones H.1, H.2, H.3, H.4, H.5, H.6, H.7, H.8, H.9, H.10 y H.11, del Anexo H).

$$f(t) = K \left[\frac{\psi M_d + F(t)}{F(t)} \right] \quad (3.17)$$

Donde: F es la infiltración acumulada, en mm; M_d , es la deficiencia de humedad en el suelo; ψ , succión capilar del frente húmedo, mm; K , conductividad hidráulica saturada, mm/hr y $f(t)$ es la tasa de infiltración para el lapso de tiempo Δt .

En cada lapso de tiempo, en que se divide el hietograma de lluvia, se aplica el valor de la tasa de infiltración acumulada $F(t)$, y se resuelve la ecuación de forma que ambas partes sean iguales, si no ocurre la igualdad se realiza un cálculo siguiente con un valor inferior al de la tasa $F(t)$, hasta que se logre la igualdad. El valor de la tasa de infiltración instantánea se aplica a cada intervalo de tiempo Δt , de forma que se pueda restar su valor a la altura de lluvia total. El resultado es la altura de lluvia efectiva ó cantidad de lluvia que se transforma en flujo superficial. Esta forma de obtener el resultado se puede abreviar con un método numérico de iteraciones, por ejemplo el de Newton-Raphson (Martínez, 1996).

3.2.3.3.3. TRANSFORMACIÓN DE LA LLUVIA EFECTIVA A ESCURRIMIENTO

Para poder calcular la lluvia que se transforma en escurrimientos, se debe integrar información del tipo: cantidad de lluvia caída, infiltración, evaporación, uso del suelo, tipo de suelo y geometría del relieve. La capacidad de infiltración y la cubierta vegetal, junto con la cantidad de lluvia caída, son las variables que dominan el proceso de generación de escurrimiento. De forma que si la infiltración en el suelo es baja, su efecto se traducirá en volúmenes de flujo superficial muy altos; el tiempo en que se generan estos gastos dependerá de las características morfométricas de la cuenca. El hidrograma unitario de una cuenca, se define como el hidrograma de escurrimiento directo resultante de una altura unitaria de lluvia en exceso sobre la cuenca (Sherman, 1932 *cit.* en Martínez, 1996). Es una cantidad constante durante el tiempo efectivo de la tormenta (Chow *et al.*, 1994). El hidrograma unitario, se puede calcular de dos formas:

1. Directamente, al aplicar datos de lluvia y escurrimiento.
2. Indirectamente, aplicando la formula del hidrograma unitario sintético.

Ambos métodos se pueden usar en cuencas aforadas, solo el segundo se puede aplicar en cuencas no aforadas (Ponce, 1989 *cit.* en Martínez, 1996).

3.2.3.3.3.1. HIDROGRAMA UNITARIO INSTANTÁNEO (HUI)

Para el cálculo del HUI se aplica la ecuación de convolución discreta, ec. 3.18:

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m H_{n-m+1} \quad (3.18)$$

donde: Q_n , es la n ésima ordenada del hidrograma unitario de escurrimiento directo; H_{n-m+1} , es la ordenada del hidrograma unitario instantáneo; P_m , es la cantidad de lluvia en exceso; $n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots, M$. n , es el número de ordenada del hidrograma de escurrimiento directo; N es

el número total de ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo; m , es el periodo de precipitación en exceso; y M es el número de periodos de precipitación en exceso. N , se calcula mediante la ec. 3.19:

$$N = K + M - I \quad (3.19)$$

donde, K es el número de ordenadas del HUI, y M , es el número de periodos de precipitación en exceso (Dooge y Bruen, 1989 *cit.* en Martínez, 1996).

3.2.3.3.3.2. CÁLCULO DEL HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO, MÉTODO DE CHOW

El gasto pico, para un hidrograma de escurrimiento directo, se puede expresar como el producto de la altura de la precipitación efectiva por el gasto pico del hidrograma unitario (ec. 3.20).

$$Q_p = \frac{0.278 P_e A_c}{d_e} Z \quad (3.20)$$

donde: A_c , es la superficie de la cuenca, expresada en km^2 ; d_e es la duración efectiva de la tormenta, en h; P_e , es la altura de lluvia de precipitación efectiva total, en mm y Z es el factor de reducción de pico (Fig. 3.6) se calcula según Chow *et al.* (1994), como un función del tiempo de retraso (ecuación 3.21) y la duración en exceso d_e de la tormenta de diseño.

$$t_r = 0.005 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64} \quad (3.21)$$

donde, L , es la longitud del cauce principal en m, S es la pendiente en % y t_r , es el tiempo de retraso en h.

3.2.3.3.3.3. HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR

Mockus (1957) *cit.* en Aparicio (2003), desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular. En la que el gasto pico se calcula como:

$$q_p = \frac{0.555 A}{t_b} \quad (3.22)$$

donde: A , es el área de la cuenca, en km^2 , t_p es el tiempo pico en h, y q_p es al gasto pico en $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$. Del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluye que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (3.23)$$

el tiempo pico se obtiene al aplicar la ecuación 3.24:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (3.24)$$

donde: d_e , es la duración en exceso y t_r es el tiempo de retraso, que se calcula a partir del tiempo de concentración t_c (ecuaciones 3.9 y 3.10). Todos los intervalos y la duración en exceso están en horas. El gasto pico del hidrograma triangular, se calcula con la ecuación 3.25.

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p} \quad (3.25)$$

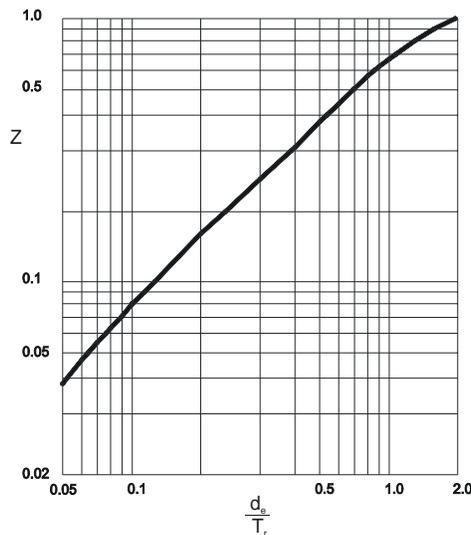


Figura 3.6. Valores típicos de Z, con respecto a la duración efectiva y el tiempo de retraso (Aparicio, 2003).

3.2.3.3.3.4. HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL, MÉTODO DEL *SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)*

En la mayoría de los casos de estudio, solo se usa un hidrograma unitario triangular. Pero cuando en el tránsito de la avenida máxima se tenga que detallar el tránsito de la avenida, se debe usar un hidrograma curvilíneo. Para ello se usa el hidrograma unitario adimensional, que se obtuvo de varios hidrogramas registrados en gran variedad de cuencas (Aparicio, 2003). Se obtiene al multiplicar las ordenadas por el gasto pico y las abscisas por el tiempo pico (ecuaciones 3.24 y 3.25). En la Figura 3.7 se ilustra la curva del hidrograma unitario

adimensional del SCS y en la Tabla 3.11, aparecen los valores de las ordenadas para la relación t/t_p (Viessman *et al.*, 1989 cit. en Martínez, 1996).

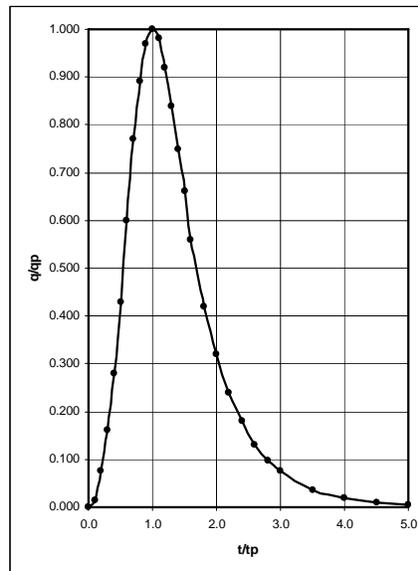


Figura 3.7. Curva del hidrograma unitario adimensional del SCS (Aparicio, 2003).

Tabla 3.11. Ordenadas del hidrograma unitario adimensional del SCS (Aparicio, 2003).

t/t_p	q/q_p	t/t_p	q/q_p
0.0	0.000	1.40	0.750
0.1	0.015	1.50	0.660
0.2	0.075	1.60	0.560
0.3	0.160	1.80	0.420
0.4	0.280	2.00	0.320
0.5	0.430	2.20	0.240
0.6	0.600	2.40	0.180
0.7	0.770	2.60	0.130
0.8	0.890	2.80	0.098
0.9	0.970	3.00	0.075
1.0	1.000	3.50	0.036
1.1	0.980	4.00	0.018
1.2	0.920	4.50	0.009
1.3	0.840	5.00	0.004

La intensidad de una tormenta, además de dar a conocer el volumen de lluvia que cae, que es retenido en superficie y del que se transforma en escurrimiento, permite explicar la fuerza con que golpean las gotas al terreno. Esta energía provoca dispersión y a su vez compactación de las partículas contenidas en el suelo, además de deteriorar los agregados (Morgan, 1993). Por lo que, dependiendo de la duración de la tormenta, el flujo laminar superficial que se genera está

influenciado por la longitud de la ladera, manifestado como la fuerza erosiva (energía cinética) que provoca el desgaste de los materiales en forma de micro cauces, cárcavas y barrancos.

En la evaluación de los eventos erosivos acelerados, varios investigadores ayudan a entender la forma en que las tormentas afectan, por ejemplo Hudson (1981) *cit.* en Morgan (1995), encontró en Zimbabwe que una lluvia de intensidad igual a 25 mm/hr generaba erosión acelerada. En Tanzania, Rapp *et al.* (1972) *cit.* en Morgan (1995), obtuvieron resultados semejantes; y en Malasia (con diversos valores de intensidad), Morgan (1974) *cit.* en Morgan (1995). Otros usaron valores de intensidades de 10, 6 y 1 mm/hr en Inglaterra (Morgan, 1980b *cit.* en Morgan, 1995), Alemania (Richter y Negendank, 1977 *cit.* en Morgan, 1995), y Bélgica (Bollinne, 1977 *cit.* en Morgan, 1995).

En este trabajo, se calculó la erosividad de la lluvia (erosividad), al aplicar el método de Marshall y Palmer (1948) *cit.* en Morgan (1995), mediante la ecuación 3.27. Se prefirió la ecuación de estos autores, ya que la obtuvieron a partir de diversas mediciones realizadas en campo y laboratorio, y representa en su aplicación a diversos ambientes estudiados y para múltiples tamaños de gotas (diversas intensidades, I). Aunque en otros cálculos de la erosividad, otros investigadores han utilizado la ecuación 3.26. Si se desea conocer los valores de la erosividad de la lluvia en las unidades de kilogramos fuerza se usa la ecuación 3.28.

$$KE = 11.87 + 8.73 \log_{10} I \quad (3.26)$$

Donde; I es la intensidad de la lluvia en mm/hr y KE , energía cinética calculada, en $\text{Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$.

$$KE = 8.95 + 8.44 \log_{10} I \quad (3.27)$$

La expresión 3.59, se puede mostrar de forma que las unidades sean dadas en kilogramos fuerza, como:

$$KE = 1.213 + 0.890 \log_{10} I \quad (3.28)$$

Se ha demostrado que el tamaño medio de las gotas de lluvia no crece si la intensidad es superior a los 76 mm/hr (Carter *et al.*, 1974; Hudson, 1978 *cit.* en Morgan, 1995). En estas tormentas intervienen otros procesos que dominan la dinámica de erosión hídrica de la cuenca, como es la capacidad de infiltración del suelo, la cubierta vegetal, inclinación de las pendientes, etc.

3.4. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DEL USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL, DE LA CARTA A ESCALA 1:50,000 DE 1977 Y POR FOTOINTERPRETACIÓN DE ORTOFOTOS A ESCALA 1:20,000, PARA LOS AÑOS DE 1993 Y 2003

El análisis multitemporal del cambio en el uso del suelo y cobertura vegetal, permite identificar áreas que están cambiando al interior de la cuenca. El análisis del tipo de cambio, y su cuantificación ayuda a explicar de forma más detallada, cómo es que se presentan determinados tipos de efectos negativos, tales como: la eliminación de la capa orgánica, lavado de materiales finos, compactación del suelo, aparición de microcauces, cárcavas, ó eventos de deslizamientos (Morgan, 1995; Nyssen *et al.*, 2002). Estas alteraciones, modifican el funcionamiento hidrológico de la cuenca; por ejemplo, en la disminución en el tiempo de concentración, incremento en el gasto generado por escurrimiento, entre otros fenómenos (Morgan, 1995; Campos, 1984).

Esta forma de relacionar los usos del suelo y la transformación de la cubierta, ha tomado un interés incluso a nivel internacional, pues aparecen estudios en países como Francia, España, Estados Unidos, donde se busca encontrar una solución que equilibre la dinámica acelerada de las fuerzas modeladoras del relieve desencadenadas por la alteración del medio (Chmelová *et al.*, 2002; van Rompaey, 2002; Renschler *et al.*, 2002; Poesen *et al.*, 2003).

Los antecedentes de la información del uso del suelo y vegetación, para la cuenca del río Guanajuato, se debe hacer con referencia a los mapas temáticos del INEGI para el Estado de Guanajuato; las escalas fuente son 1:50,000 y 1:250,000. Estos datos han sido creados y modificados por dependencias como el INEGI, la Comisión Nacional para la Biodiversidad (CONABIO), la Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SDA), la Unidad de Planeación e Inversión Estratégica (UPIE) y la Comisión Estatal de Agua del Estado de Guanajuato (CEAG) (INFO, 2002; INEGI, 2005). De esta forma, en la cuenca del río Guanajuato la escala de mejor detalle es 1:50,000 para el año 1977, y en fotografías aéreas la escala es 1:75,000, con fecha de 1993 y en tipo ortofoto es de 1:20,000, para la fecha 1993-1994 y 2003-2004.

El INEGI crea en 1977 el mapa de uso del suelo y vegetación, a escalas de 1:50,000, 1:250,000 y 1:1,000,000. En formato digital (polígonos) crea la serie II a escala 1:250,000 de edición 1983 (INFO, 2002; INEGI, 2005). La CONABIO, ha actualizado la información, llevándola de la escala 1:250,000 a la escala 1:1,000,000, en el año de 1999. La información original proviene de la carta de uso del suelo y vegetación del INEGI, de edición 1983 (INFO, 2001; INFO, 2002).

El Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, realizó el mapa uso del suelo derivado del Ordenamiento Ecológico del Territorio de Guanajuato (OETG), en el año de 1998. El suelo está clasificado según su uso como: agrícola, pecuario, forestal, de acuacultura y cuerpos de agua. La escala de trabajo es 1:250,000 (INFO, 2002). La UPIE es la institución que a nivel Gobierno del Estado de Guanajuato, agrupa la información disponible de fuentes como INEGI, SEMARNAT, CONABIO, SDA, CEAG (INFO, 2002).

En la revisión documental del tema de uso del suelo y vegetación, se deduce que la información cartográfica indica que las escalas disponibles, para el área de la cuenca del río Guanajuato, son de medianas a chicas (Caire, 2002) es decir: 1:50,000 de 1977; 1:250,000 de 1976 y 1998; y 1:1,000,000 de 1976 y 1998, lo que provoca que la información sea generalizada. Y en cuanto a la calidad de la información, hay indicadores que muestran poca compatibilidad entre fechas de edición para la fuente INEGI (Velázquez *et al.*, 2002), debido a que se encontraron diferencias al comparar los mapas: serie I de 1977, serie II de 1986 y el Inventario Forestal Nacional de 2000. Velázquez *et al.* (2002), atribuyen las incongruencias a errores de codificación de polígonos y a la captura de límites de los mismos, pues sus resultados, muestran que las diferencias encontradas son muy grandes entre la serie I y la serie II, y la serie II con el Inventario Forestal Nacional de 2000, y que la comparación entre la serie I y el Inventario Forestal Nacional de 2000, representan las transiciones más confiables a lo largo del territorio nacional. Incluso, Velázquez *et al.* (2002), recomiendan como indispensable, mejorar las fuentes de datos y hacer trabajo de campo intenso, que consideren aspectos florísticos y fisionómicos de la vegetación para lograr información confiable y a detalle. Entonces, para el área de estudio, la diferencia de escalas y la falta de congruencia de información (de una misma fuente) genera inconvenientes al realizar cruces con los mapas (Caire, 2002); incluso, es complicado lograr una compatibilidad de sistemas clasificatorios entre cada fuente de información y por año de edición (Velázquez *et al.*, 2002).

Para evaluar la variación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo, se realizó la foto-interpretación de las ortofotos escala 1:20,000, para los años 1993 y 2003, aplicando un modelo de visión estereoscópica a partir de las imágenes y del MDT de la cuenca. Esto permite realizar una interpretación interdependiente, y asegura un análisis del cambio del uso del suelo y de la cubierta vegetal para el área de estudio, con métodos de levantamiento semejantes. En este análisis, la evaluación de la variación espacio-temporal de la cubierta vegetal y uso del suelo, se

ha denominado como indicador de transformación (FAO, 1996 *cit.* en Velázquez *et al.*, 2002), que permite conocer la variación de las coberturas, y con ello relacionarla con las variables climatológicas, geomorfológicas y humanas, en la evaluación de la erosión en la cuenca.

En la Figura 3.8 se ilustra la cobertura que guardan las ortofotos para la cuenca. En la digitalización del mapa de uso del suelo, de edición para el año 1977 del INEGI, a escala 1:50,000, se tuvieron que escanear las cartas con clave F14C42, F14C43, F14C52 y F14C53. Se georreferenciaron en la proyección UTM con el Datum NAD27. Al crearse los vectores lineales, se procedió a transformarlos a polígonos; mismos que se clasificaron aplicando la información de la cartografía temática.

Las ortofotos del INEGI para el año 1993 están en el sistema de proyección UTM, Datum NAD27, pancromáticas en blanco y negro (INEGI, 1993). La estereoscopia se generó al aplicar el MDT a la ortofoto; con esta visión tridimensional se trazaron los límites entre los diversos tipos de vegetación (Figura 3.9). Para hacer esto, se tomaron en cuenta la fisionomía de la vegetación y el tono que adquiere en la foto. Los vectores de polígonos, del inventario del año 1993, se clasificaron y verificaron en campo. El mismo proceso se realizó en las ortofotos del año 2003. Para realizar el cruce de información por fechas, se cambió de Datum a las ortofotos de 2003 ya que están en el Datum WGS84 (INEGI, 2003). Es decir, la información de las ortofotos de 2003 se re proyectaron de WGS84 a NAD27, para con ello poder hacer la comparación entre las dos fechas (INEGI, 2003).

Con fines prácticos se toma la clasificación que usa el INEGI en la carta impresa de uso del suelo y vegetación, a escala 1:50,000, en la que describe la cobertura vegetal del terreno en ocho niveles de resolución espacial, por lo que los tipos de vegetación quedan definidos como se especifica en la Tabla 3.12.

Para obtener los valores de los cambios, en la superficie de la cubierta vegetal entre fechas, se aplicó la ecuación 3.29 (FAO, 1996 *cit.* en Velázquez *et al.*, 2002), misma que describe las transiciones entre los usos del suelo, para los periodos 1977-1993 y 1993-2003:

$$V_{uv} = \left(\frac{S_2 - S_1}{S_1} \right) \times 100 \quad (3.29)$$

donde: V_{uv} es la variación del uso del suelo y vegetación, en %; S_1 , superficie para la fecha 1-1977-1993, m^2 ; S_2 , superficie para la fecha 2-1993-2003, m^2 .

Tabla 3.12. Leyenda jerárquica utilizada en la evaluación del cambio del uso del suelo (Velázquez *et al.*, 2002).

#	Formación	No.	Tipo de vegetación y uso del suelo	Comunidad y otras coberturas
I	Cultivos	1	Agricultura (riego y humedad)	Agricultura de riego (incluye riego eventual) Agricultura de humedad Riego suspendido Pastizal cultivado
		2	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal
		3	Plantación forestal	Plantación forestal
II	Bosques	4	Coníferas	Bosque de táscate Bosque de oyamel (incluye ayarín y cedro) Bosque de pino Matorral de coníferas
		5	Coníferas-latifoliadas	Bosque bajo-abierto Bosque de pino-encino (incluye encino-pino)
		6	Latifoliadas	Bosque de encino
		7	Mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña
III	Selvas	8	Perennifolia y subperennifolia	Selva alta y mediana perennifolia Selva baja y perennifolia Selva alta y mediana subperennifolia Selva baja subperennifolia
		9	Caducifolia y subcaducifolia	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia Selva baja caducifolia y subcaducifolia Matorral subtropical Selva baja espinosa
IV	Matorral	10	Mezquital	Mezquital (incluye huizachal)
		11	Matorral xerófilo	Matorral crasicuale Matorral sarcocrasicaule Matorral sarcocuale Matorral sarcocrasicaule de neblina Matorral desértico micrófilo Matorral desértico Matorral costero Vegetación de desiertos arenosos Matorral espinoso tamaulipeco Matorral submontano Chaparral
V	Pastizal	12	Pastizal	Pradera de alta montaña Pastizal natural (incluye pastizal-huizachal) Pastizal inducido Sabana
VI	Vegetación hidrófila	13	Vegetación hidrófila	Manglar Popal-tular Vegetación de galería (incluye bosque y selva)
VII	Otros tipos de vegetación	14	Otros tipos de vegetación	Palmar Vegetación halófila y gipsófila Vegetación de dunas costeras
		15	Área sin vegetación aparente	Área sin vegetación aparente
VIII	Otras coberturas	16	Asentamiento humano	Asentamiento humano
		17	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua

La distribución espacial de la cubierta vegetal y del uso del suelo sin cambios se calculó al interior de la cuenca, al aplicar la ecuación 3.30 (López-Blanco, 2005):

$$If((1977=1993),1,0) \quad (3.30)$$

Define, que si el valor en el mapa de uso del suelo y cubierta vegetal de 1977 es igual al del mapa de 1993, se genere un mapa en el que se tenga un valor de 1 (uno), si no, toma el valor de 0 (cero). Se repite el mismo procedimiento para el periodo de 1993-2003.

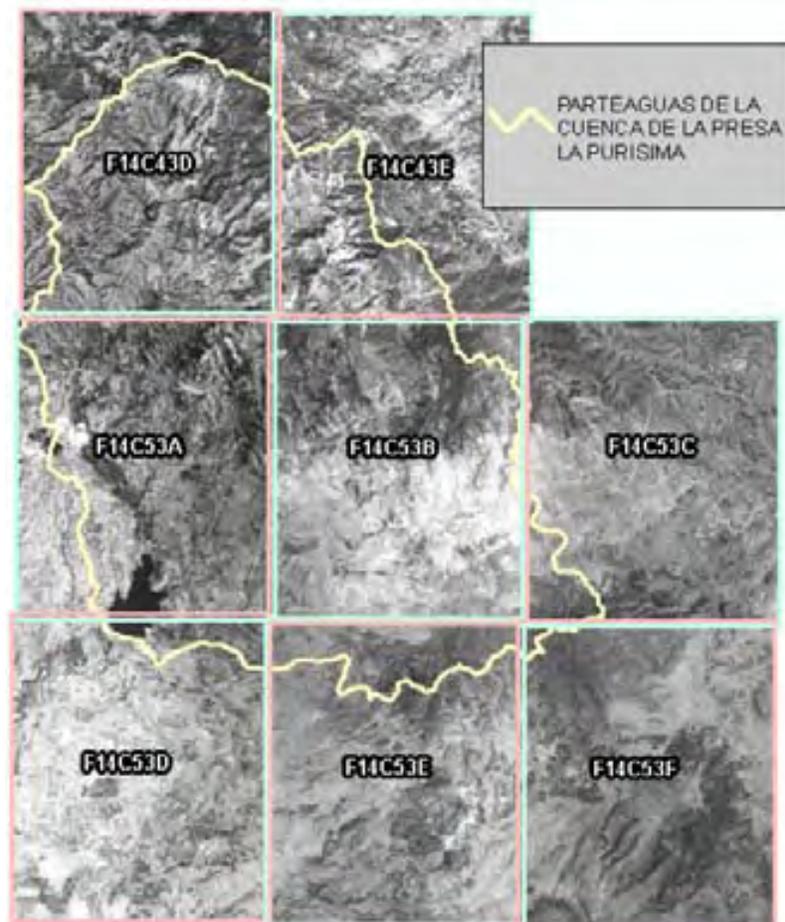


Figura 3.8. Índice de ortofotos escala 1:20,000 (INEGI, 1993).

Para seleccionar las áreas que tuvieron cambios entre fechas, se presenta la ecuación 3.31 (López-Blanco, 2005):

$$If((1977<>1993),2,0) \quad (3.31)$$

Esto significa que si el mapa de uso del suelo y cubierta vegetal de 1977, es diferente, con respecto al mapa de 1993, se genere un mapa en el que se da un valor de 2 (dos) si cubre la condición, de modo contrario, toma un valor de 0 (cero). Para el cálculo del periodo 1993-2003, se hace el mismo procedimiento.

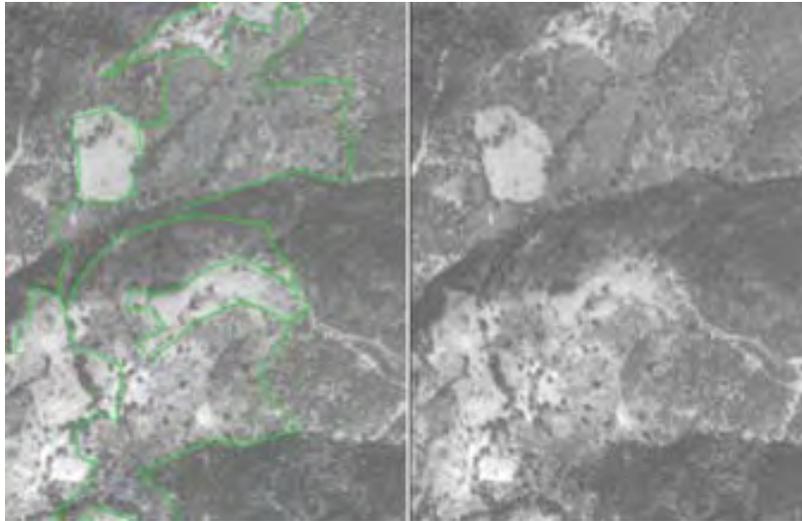


Figura 3.9. Escena estereoscópica del relieve. A la izquierda, hay trazos de límites entre diferentes asociaciones de vegetación y uso del suelo (use estereoscopio de bolsillo).

La aplicación de la ecuación 3.32, permite obtener un mapa que representa en la cuenca, las porciones con cambios, ya sea que coincidan para los dos periodos o suceda solo en uno de los dos.

$$if((1977_1993=2)or(1993_2003=2),1,0) \quad (3.32)$$

El mapa resultante muestra las porciones de territorio en las que por lo menos en un periodo de análisis, aparece algún tipo de cambio, esto ocurre si el mapa *1977_1993* y el mapa *1993_2003* presentan valores iguales a 2 (dos) pues este valor indica que hay cambios al interior de la cuenca en fechas diversas.

Finalmente, las porciones de territorio que han permanecido invariables ó sin cambios, a lo largo del periodo 1977-2003, se calcularon con la ecuación 3.33:

$$if((1977_1993=1)and(1993_2003=1),1,0) \quad (3.33)$$

El resultado es un mapa, que toma el área que ha permanecido sin cambios tanto en el periodo de 1977-1993, como 1993-2003, es decir, es el mapa que muestra el territorio en el que el uso del suelo ó la cubierta vegetal, existente desde el año de 1977 hasta el 2003.

El uso del suelo de tipo agrícola, se foto-identificó a partir de indicadores como son contrastes en tonos y la presencia de figuras geométricas en el terreno (lados rectos, polígonos regulares). En campo, se definió la forma de cultivar: temporal o riego, pues la labranza está condicionada a la disponibilidad de agua. Además, el terreno dedicado a la actividad agrícola,

aparecen en tonos más claros que su entorno, esto debido a que el suelo está al descubierto. Si el tipo de agricultura es de riego, en las tomas de las fotografías aéreas, el tono que toma la vegetación es oscuro, y si se considera que la fecha de toma es noviembre (como lo especifica el INEGI), la vegetación verde contrasta con el resto del entorno, que contiene vegetación seca.

El uso del suelo de tipo urbano aparece en la fotografía en forma de polígonos con geometrías regulares, y los tonos en la imagen toma valores de grises intermedios y claros. Además de que se pueden observar elementos lineales, ya que son las vialidades que entran o salen de los polígonos que configuran a las manchas urbanas, ciudad o localidades.

Dentro de la cuenca, la minería destaca como la actividad económica que data desde la época colonial. Por ello, aparecen presas de jales que funcionan como captadores de desechos de materiales, provenientes del beneficio mineral de las minas como Cata, Rayas, Valenciana, El Cubo, Las Torres, Campuzano, La Luz y Peregrina. En el mapa del año de 1977 no muestra su existencia, pero en el año de 1993 y 2003 estos embalses artificiales cubren superficies en las ortofotos que indican su ubicación y extensión. Una forma de fotoidentificar a estas estructuras, es porque están muy cerca de las minas y caseríos donde viven los obreros, además que hay dos, tres ó hasta cuatro estructuras acomodadas en forma continua sobre las depresiones y que forman las represas y cuyo tono en la imagen es de color gris muy claro, el cual contrasta con el tono oscuro de las presas usadas para almacenamiento de agua.

La vegetación natural, se interpretó y trazó al usar su tono y distribución; se agruparon por clases y asociaciones. La fisionomía y el tono de la vegetación, permiten diferenciar a árboles de arbustos y pastos. Los árboles, presentan copas amplias (número mayor de píxeles) y de tonos desde grises medios oscuros hasta el negro. Los arbustos presentan una copa muy reducida y de tonos grises claros-medios. Los pastos, aparecen en tonos grises claros y como masas homogéneas en los que destacan algunos arbustos y árboles aislados. Las clases usadas son: Pastizal, Bosque, Chaparral, Mezquital y Matorral (INEGI, 2005), y las Fisionomías (relación de los matorrales según la abundancia de distintas especies vegetales): Matorral inerme, Matorral subinerme, Matorral espinoso, Cardonal, Vegetación secundaria y Nopalera, y de origen antrópico el pastizal inducido (INEGI, 2005).

Después de la fotointerpretación base, se realizó su verificación en campo. Haciendo un recorrido que ha cubierto porciones claves de la superficie de la cuenca, de manera que se ha revisado cada clase de vegetación, así como de las asociaciones.

Se aplicó la observación directa, a las porciones representativas del área de estudio, a través de puntos georreferenciados con un GPS navegador Garmin 12XL, y se tuvo el cuidado de utilizar otras referencias como caminos, carreteras, límites de linderos, cimas, etc., para lograr una mejor definición de los puntos de verificación. De estos eventos se tomaron fotografías, así como de la vegetación y de la alteración del suelo inducida por la acción del agua. Los materiales utilizados fueron, mapas topográficos del área de estudio (claves F14C43 y F14C53), mapa de inclinación de la pendiente; fotos aéreas impresas a escala 1:75,000 y ortofotos a escala 1:20,000, mapa de temperaturas, mapa geológico, información documental de las especies vegetales que cubren el terreno. La selección de los sitios fue tanto en lugares aleatorios, como representativos de las unidades de mapeo. Las fotografías aéreas, sirvieron para obtener una identificación de los tipos de vegetación sobre el terreno. La inclinación de la ladera y las clases de relieve ayudan a conocer las características de drenaje y humedad dentro y cerca de las manchas de grupos vegetales. De este modo, la ubicación de los puntos de verificación, cubrieron los requisitos de: representatividad, replicación, cobertura y homogeneidad. Esta información se aplicó para comprobación de la clasificación de los polígonos realizados en el inventario de uso del suelo y vegetación para las ortofotos del año 1993 y 2003.

3.5. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE EROSIÓN HÍDRICA POR LÓGICA DIFUSA, EN LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

Para identificar las variables que intervienen en la intensificación del peligro de erosión hídrica acelerada se aplicó el índice de clases y se evaluaron mediante la lógica difusa. Se utilizaron los datos de la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la inclinación de la pendiente, la longitud de la ladera, el tipo de cobertura vegetal, el volumen de escurrimiento, la cantidad de lluvia por tormenta y el uso del suelo (Liu *et al.*, 2005; Morgan, 1995).

En este trabajo de análisis de erosión hídrica acelerada se utiliza la lógica difusa, con el fin de explicar la manera en que las variables biofísicas interactúan al interior de la cuenca, ya que con el criterio de ponderación ó valores índices, se puede conocer su pertenencia con respecto al peligro de erosión hídrica acelerada. La lógica difusa se puede aplicar a cualquier tipo de análisis, pero en los procesos complejos ó de análisis detallados, se verifica el grado de interacción que alcanzan las variables. Incluso, la aplicación del método es posible cuando en el sistema aparecen datos poco confiables ó cuando se tiene incertidumbre en la forma de calcularlas (Alves *et al.*, 2005).

El análisis requiere de combinar los mapas de uso del suelo y cobertura vegetal, edafología, geología, morfogénesis, morfometría y morfografía. Cada clase se ajusta a las funciones de propiedad para obtener los valores de pertenencia (dentro del intervalo de 0 a 1), de manera que entre más cercanos a la unidad, se está especificando que hay una relación muy cercana entre la variable analizada y la presencia del peligro de erosión hídrica acelerada; esto ayuda a ubicar los sitios en los que la erosión se presenta con más intensidad. Si el valor de pertenencia está próximo al cero, la clase muestra que no hay una relación entre la variable estudiada y la presencia de peligro de erosión hídrica acelerada. La comparación de los resultados obtenidos de la lógica difusa con el mapa morfodinámico, ayuda a definir con precisión las variables y sus clases que influyen en la degradación acelerada de la cuenca.

Hay dos factores que intervienen en la aceleración de la erosión por acción del agua, y son: la erosividad de la lluvia y la erodabilidad del suelo (Morgan, 1995). La erosividad, se relaciona con la intensidad de la lluvia, por su energía cinética y el volumen de escurrimiento generado. El gasto que circula sobre la superficie se calcula mediante la información física del suelo y por su capacidad de infiltración, el grado de cubierta vegetal, el uso del suelo y la cantidad de lluvia total que cae en la cuenca.

Wischmeier y Smith (1958) *cit.* en Morgan (1995) explican que los procesos erosivos acelerados aparecen junto a tormentas con intensidades de duración igual o mayor a 30 minutos, ya que en este tiempo la cantidad de lluvia excede a la capacidad de infiltración, lo que genera una acumulación de agua en la superficie y que conforme se mueve ladera abajo gana velocidad y volumen.

La erodabilidad del suelo, se refiere a su resistencia a ser dispersado y transportado. Para calcularla, se debe tener información de la posición topográfica, inclinación de la ladera, tipo y grado de perturbación de la ladera (terreno agrícola, caminos, etc.); textura, agregados, la resistencia al corte, la capacidad de infiltración y el contenido orgánico y químico del suelo. Existen otras variables que de manera directa influyen en la aceleración del proceso erosivo, como es el grado de cubierta vegetal, ya que los suelos desnudos pueden perder una gran cantidad de suelo (Morgan, 1977 *cit.* en Kirkby, 1993). Otras variables que intervienen en la aceleración de la erosión son la textura, los agregados, la rugosidad, la pedregosidad y la humedad inicial del suelo, el grado de inclinación, longitud y forma de la ladera (Kirkby, 1993; Morgan, 1995).

Se puede describir de modo general el funcionamiento en que los métodos de modelación de la erosión hídrica ayudan a explicar el proceso de erosión, debido a que se clasifican en tres grupos: físicos, análogos y digitales, estos últimos se subclasifican con base a leyes físicas, estocásticamente y de forma empírica (Morgan, 1995).

Los modelos empíricos más conocidos, son: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (*USLE*, en inglés), la cuál multiplica cada uno de los valores de las variables, como, la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud de la ladera, la inclinación de la pendiente, el factor por uso del suelo y el factor debido al control de erosión. Otro método es el Estimador de Pérdida de Suelo para África Septentrional (*SLEMSA*, en inglés). Evaluado por la relación entre la erodabilidad del suelo, la energía cinética de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud e inclinación de la pendiente y el factor de manejo de agricultura. El método de Morgan, Morgan y Finney, es otro tipo de cálculo empírico de la erosión hídrica. La evaluación, se hace mediante dos fases, la primera etapa mide la pérdida de suelo debido a la energía cinética e intensidad de la lluvia (periodo en que la infiltración excede a la lluvia), y la segunda etapa, se evalúa a través de la cantidad de sedimentos removidos por acción del flujo superficial.

Los modelos con base en aspectos físicos, incorporan las leyes de conservación de la energía y masa, fragmentan el terreno en porciones pequeñas y utilizan las ecuaciones de continuidad para evaluar la pérdida de suelo. Un método es Química, Escurrimiento y Erosión de los Sistemas de Manejo Agrícola (*CREAMS*, en inglés). Evalúa las fuentes de contaminación no fijas e investiga cuantitativamente las consecuencias ambientales del manejo agrícola y explica la hidrología, erosión y química del terreno. El Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (*WEPP*, en inglés), es un modelo orientado a los procesos de hidrología y erosión. Funciona en tres niveles, a escala relieve, en cuencas y malla. En su funcionamiento aplica las ecuaciones de continuidad, energía y materia, semejantes a las utilizadas en el método *CREAMS*. El Sistema de Erosión y Sedimentación de la Universidad Griffith (*GUESS*, en inglés) es un modelo matemático que simula el proceso de erosión y deposición sobre laderas. La aplicación difiere del modelo *CREAMS* y *WEPP*, de forma que separa la superficie en dos partes, una donde el suelo contiene determinado grado de cohesión que define la intensidad de dispersión y otra que evalúa el material que pasa a ser disperso por su pérdida de cohesión. El Modelo de Erosión del Suelo Europeo (*EUROSEM*, en inglés) simula la erosión en riachuelos, e incluye el transporte y deposición del material sobre el trayecto del río.

Estos modelos ayudan a integrar las variables y cuantificar los gastos generados en la cuenca, el volumen de sedimentos acarreados, etc.; por lo que en su evaluación considera una serie de variables físicas y bióticas, pero no explican el grado de intensidad con que interaccionan, lo que lleva a conocer las variables que más influyen, lo que puede ayudar a encontrar soluciones de mitigación, restauración, etc., para el medio.

Esto lleva a considerar el uso de la lógica difusa, ya que en la representación binaria de los elementos en el espacio, se aplican una de dos estrategias una con los conjuntos clásicos y otra con los conjuntos difusos. En estos conjuntos clásicos, el concepto de pertenencia se aplica a través de simbolismos que la definen con una afirmación o una negación, $A(x)$, $x \in X$, donde X es el universo de aplicación. De manera que el conjunto A consistirá en dos valores únicos para ese universo y que puede existir o no: $A: X \rightarrow \{0,1\}$; es decir, puede ser un conjunto vacío $\emptyset(x) = 0, \forall x \in X$ o un conjunto universo $U(x) = 1, \forall x \in X$ (Zadeh, 1965).

Mientras que en los conjuntos difusos, el concepto de propiedad toma otra dimensión, pues los límites son valores considerados como “poco claros”, por ejemplo si la inclinación interviene en la erosión, y se toma a la inclinación de 80° como muy escarpada, su valor de pertenencia son respecto a la erosión es igual a 1, pero si se considera la presencia de planicies (inclinaciones $\leq 2^\circ$), su pertenencia son respecto a la presencia de erosión es igual a cero. Este intervalo de inclinaciones presenta una gama amplia de pertenencia con respecto a la erosión ya que va de los 80° hasta menos de 2° , por lo que no basta con indicar los extremos y con ello dejar de lado lo que ocurre al interior del intervalo de clases.

La forma de evaluar la pertenencia de cada clase, es integrándolas en un conjunto difuso A , que explica la función de pertenencia que enlaza ó empareja los elementos de un dominio o universo X con los elementos del intervalo 0 y 1 (nula pertenencia o plena pertenencia, respectivamente). Un conjunto difuso se puede representar gráficamente como una función, más aún si el universo muestreado X es continuo (no discreto) (Zadeh, 1965).

En el eje de las abcisas, se integran los valores x del universo X , en el eje de las ordenadas los valores de pertenencia de dichas variables $[0, 1]$. Los elementos de un universo X , son un conjunto finito o infinito de valores. Estos se pueden dividir en subconjuntos, considerados potencias de X , es decir 2^X ó $P(X)$, de manera que son parte del universo, incluso los conjuntos vacíos. Cada uno de los 2^x elementos de $P(X)$ se representan como vectores (Zadeh, 1965). Es

decir, cada uno de los componentes del vector toma valores en el intervalo [0, 1], a comparación de los conjuntos clásicos, que solo toman valores extremos ó puntuales.

Ejemplo: si $n=2$, $P(X)=\{\emptyset, \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_1, x_2\}\}$. El conjunto tradicional, tomará los valores: $P(X)=\{[0,0], [0,1], [1,0], [1,1]\}$. A comparación de la lógica fuzzy, que tomarán todos los valores posibles dentro de superficie de influencia. Las funciones de lógica difusa que ayudan a explicar los valores de pertenencia, son de tipo Triangular, Gamma Γ , tipo S, Gaussiana, Trapezoidal, Pseudo-Exponencial, Trapecio extendido.

Para encontrar la solución de las variables que intervienen en las funciones de pertenencia, se aplican cálculos conocidos como Métodos, los cuales pueden ser el tipo: horizontal, vertical, comparación de parejas, definición del problema, optimización de parámetros y agrupación difusa. La utilidad de los mismos dependerá del grado de incertidumbre ó midiendo la incertidumbre, que permite alcanzar a tener información de calibración.

3.5.1. DESCRIPCIÓN Y CÁLCULO DE LAS VARIABLES BIOFÍSICAS DE LA CUENCA

Para indicar la pertenencia de las variables en el proceso de generación de erosión hídrica acelerada, se les aplica valores que muestran la pertenencia plena y nula. Esto datos expresan la información de los mapas temáticos, como son: inclinación de la pendiente, longitud de la ladera, uso del suelo y cubierta vegetal, erosividad de la lluvia y la erodabilidad del suelo.

3.5.1.1. INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE

El efecto de la inclinación de la pendiente se refleja por la velocidad que adquiere el agua al circular sobre el terreno y en el tiempo que transcurre para generar una acumulación superficialmente. McCool *et al.* (1987) *cit.* en Figueroa (1991), explican que otro de los efectos de la inclinación de la pendiente ocurre en el incremento acelerado de la pérdida de suelo, siempre que la inclinación de la pendiente se incrementa. Ellos han aplicado las ecuaciones 3.34 y 3.35, para hacer el cálculo del factor por inclinación, siempre y cuando el flujo superficial esté dominado por el grado de inclinación de la pendiente y se localice en laderas con inclinación (ladera recta).

$$S = 13.8 \text{ Sen. } \theta + 0.03 \text{ sí } \theta < 9\% \quad (3.34)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen. } \theta - 0.5 \text{ sí } \theta > 9\% \quad (3.35)$$

En el caso de que el cálculo del factor de inclinación de la pendiente se haga en mapas de tipo celdas o *ráster*, se aplica la ecuación 3.36, desarrollada por Moore y Burch (1986a y 1986b).

$$S = \left(\frac{\text{sen } \theta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (3.36)$$

3.5.1.2. LONGITUD DE LA LADERA

La longitud de la ladera implica que entre más larga sea, el volumen de agua superficial acumulado será mayor; además, la velocidad del flujo superficial se incrementa en conforme la distancia se alarga. El factor por longitud de ladera se calcula con la ecuación 3.37 desarrollada por Wischmeier y Smith (1965) *cit.* en Kirby *et al.* (1995). Esta ecuación 3.37, se obtuvo a partir de mediciones hechas en parcelas de 22.13 metros de longitud, de las que se tasaron los sedimentos producidos.

El relieve de la cuenca del río Guanajuato, presenta relieves como el piedemonte, originado por el material acumulado, donde el segmento de longitud de la pendiente disminuye y con ello la velocidad del flujo. En las laderas de montaña se presenta la mayor cantidad de actividad mecánica, pues las laderas presentan longitudes importantes que originan velocidades de erosión para eventos de tipo: riachuelos, cárcavas y barrancos. En las planicies, dada la poca inclinación del terreno, el evento erosivo más importante es la salpicadura del suelo por lluvia y flujo laminar.

$$L = \left(\frac{x}{22.13} \right)^m \quad (3.37)$$

donde: L , es el factor de longitud de ladera; x , es la longitud de la ladera, en metros y m , es una exponente que depende del grado de inclinación del terreno; para aplicarlo se debe seleccionar su valor con respecto al indicado en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Valores del exponente m , que calcula el grado de inclinación de la ladera.

Valor del exponente, m .	Relación con el grado de inclinación del terreno (%).
0.1	< 1
0.2	1 – 2
0.3	2 – 3
0.4	3 – 5
0.5	> 5

3.5.1.3. USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL

La información del tipo uso del suelo, ayuda a identificar a las actividades que intervienen para que se generen o aceleren los eventos erosivos del suelo, pueden ser: construcción de caminos, laboreo, pastoreo, etc. Además, de que logra identificar a las actividades antrópicas que

influyen en mayor medida para alterar el uso del suelo, por ejemplo, la deforestación, los incendios, la expansión de la frontera agrícola en terrenos que contenían vegetación, etc.

Wischmeier y Smith (1978) *cit.* en Morgan (1995) relacionan a través de un factor, la cantidad de suelo perdido debido a la erosión hídrica y las actividades agrícolas. Este coeficiente se aplica en métodos que estiman la pérdida potencial de suelos: las cantidades de material varían por el grado de erosividad de la lluvia y la falta de cubierta vegetal, o del grado de alteración del suelo.

El uso agrícola del terreno, se representa a partir de un factor *C*, que cambia a lo largo del año, por lo que se divide la anualidad en periodos, para que coincida con el crecimiento de las plantas (Morgan, 1995), como se lista:

- 1) Etapa en la que sólo aparecen surcos, terreno desnudo.
- 2) Labranza del terreno, al crecer las semillas sembradas presentan una cubierta del 10%.
- 3) Las plantas crecen y alcanzan a generar una cubierta entre el 10 y el 50%.
- 4) Las plantas siguen creciendo hasta cubrir entre el 50 y 70% del terreno.
- 5) Madurez, se alcanza una cubierta mayor al 75%, y las plantas están listas para cosecha.
- 6) Residuos ó rastrojos, que cubren temporalmente al terreno.

La Tabla 3.14, muestra un listado de los valores típicos del coeficiente *C*, aplicados en la generación eventos erosivos acelerados (Morgan, 1995).

Tabla 3.14. Valores para el factor *C*, Wischmeier y Smith (1978) *cit.* en Morgan (1995).

Actividad	Factor <i>C</i> , promedio anual.
Suelo desnudo	1.00
Bosque o matorral denso, mantillo espeso	0.001
Sabana o pradera de pastizal en condiciones buenas	0.01
Maíz, sorgo o mijo: baja productividad con poca labranza.	0.02 – 0.10
Maíz, sorgo o mijo, baja productividad, con labranza en residuos de cultivos anteriores.	0.30 – 0.45
Pastizal de pradera	0.01 – 0.025

3.5.1.4. EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

En cada lluvia la cantidad de agua que cae se mide en forma de intensidad, la cuál expresa tanto el volumen de lluvia caída como el tiempo en que ocurre el pico máximo. La extensión superficial que puede abarcar una tormenta es diversa, ya que mientras que en la parte norte de la

cuenca pueden ocurrir lluvias de intensidad fuerte, al mismo tiempo en la parte sur puede caer una lluvia de intensidad baja.

De esta forma, para describir en términos generales la forma en que se comporta la lluvia en la superficie de la cuenca, se han construido las tormentas sintéticas representadas en forma de curvas I-d-Tr, a partir de la información pluviométrica con que se cuenta en las estaciones climatológicas dentro y cercanas al parteaguas.

3.5.1.5. ERODABILIDAD DEL SUELO

La erodabilidad del suelo, se define como la resistencia a ser dispersado y transportado. Para su cálculo, se debe considerar la altitud, inclinación de la pendiente, textura, capacidad de infiltración y el contenido orgánico y químico del suelo (Morgan, 1995).

En la cuenca del río Guanajuato, existe información edáfica y de sus características físicas y químicas, como porcentajes de materia orgánica, arena, arcilla y limos (en el Anexo C, se detalla la física del suelo mediante la edafología), acidez, conductividad hidráulica, nitrógeno.

Estimar la forma en que la erodabilidad del suelo influye en la generación y aceleración de la erosión hídrica acelerada, se tuvo que expresar en forma de índices de erodabilidad, esto significa que de acuerdo con las características físicas y químicas, se obtuvieron valores con base, al método desarrollado por Wischmeier y Smith (1978) *cit.* en Neitsch *et al.* (2002). Donde se utiliza un nomograma que considera el porcentaje de limos, arenas muy finas y materia orgánica, calculado con la ecuación 3.38 (Neitsch *et al.*, 2002), expresa la forma en que el suelo puede ser dispersado.

$$K = \frac{0.00021M^{1.14}(12 - OM) + 3.25(ce - 2) + 2.5(cp - 3)}{100} \quad (3.38)$$

donde: K , es el factor de erodabilidad del suelo; M , es el parámetro que describe las relaciones con base al tamaño de las partículas; OM , es el contenido de materia orgánica (%); ce , clase de estructura del suelo (calculado con los valores de la Tabla 3.15); cp , clase de permeabilidad del suelo (calculado con los valores de la Tabla 3.16). M , se calcula con la ecuación 3.39, como:

$$M = (m_{limo} + m_{arenafina})(100 - m_{arcilla}) \quad (3.39)$$

donde: m_{limo} , es el contenido de limo, en porcentaje (partículas de diámetro 0.0012-0.05 mm). $m_{arenafina}$, es la cantidad de arena fina, en porcentaje (partículas de diámetro 0.05-0.10 mm). $m_{arcilla}$, es la cantidad de arcilla, en porcentaje (partículas de diámetro <0.002 mm).

El cálculo de la erodabilidad del suelo de la cuenca, se hizo para la capa más superficial, que es el horizonte A. Cada capa edáfica se clasificó como G1A1, G2A2, G3A3, G4A4, G5A5, G6A6, G7A7. Cada clave (G) corresponde a una clase edáfica.

Tabla 3.15. Descripción de valores aplicados al suelo por su textura.

Clase	Tipo de estructura
1	Muy fina
2	Fina
3	Medio a gravoso
4	Blocoso, lajas, masivo

Tabla 3.16. Descripción de valores aplicados al suelo por su permeabilidad.

Clase	Tipo de permeabilidad
1	Rápido (>150 mm/hr)
2	Moderado a rápido (50-150 mm/hr)
3	Moderado (15-50 mm/hr)
4	Lento a moderado (5-15 mm/hr)
5	Lento (1-5 mm/hr)
6	Muy lento (<1 mm/hr)

Los valores obtenidos de erodabilidad, indican cómo influyen las características del suelo con respecto a la fuerza con que ocurren las lluvias en la cuenca. De esta forma se generan mapas de valores índices o ponderados, para aplicarlos en el cálculo de lógica difusa. La lógica difusa integra estos valores de ponderación que ayudan a describir como se genera o acelera el proceso de erosión hídrica.

3.5.2. RESULTADOS DE LAS OPERACIONES APLICADAS EN EL ANÁLISIS POR LÓGICA DIFUSA

Se realizaron operaciones de lógica difusa, para obtener el valor de pertenencia, se indican mediante las ecuaciones 3.40, 3.41 y 3.42, mismas que fueron descritas por Zadeh (1965). El objetivo es integrar las diversas intensidades de las variables que aparecen en la cuenca, que intervienen en la generación o aceleración de la erosión hídrica.

3.5.2.1. PRODUCTO ALGEBRAICO

Es el cálculo que se realiza entre los valores de las clases, para cada una de las variables evaluadas. El resultado queda afectado por cada valor índice, ya que si alguna de las clases contiene significancia nula (valor cero), el resto quedará afectada por esta relación. La representación es un mapa que ilustra una gama amplia de resultados; de forma que los valores

índice cercanos a la unidad, reforzarán el resultado de que existe una interacción directa de las variables para que la erosión hídrica esté afectando las laderas de la cuenca. El cálculo se realiza al aplicar la ecuación 3.40, como:

$$\mu_{combinado} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (3.40)$$

Donde μ_i es el valor de asociación para el mapa i -ésimo de una variable en particular. Al ejecutar el cálculo.

3.5.2.2. SUMA ALGEBRAICA

Se calcula con la ecuación 3.41, como:

$$\mu_{combinado} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (3.41)$$

Donde μ_i es el valor de asociación para el mapa i -ésimo de una variable en particular. Al resolver la ecuación, se encuentra que el valor del resultado es siempre mayor (o igual) al valor de asociación máximo de uno de los mapas, por lo que se considera como “incrementado”, de esta forma, si hay dos o más mapas que apoyen a la hipótesis, se refuerza el resultado y el mapa final, que es una combinación de los demás mapas, tendrá la mayor ponderación, a comparación de si se considera solo el valor de uno de los mapas.

3.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LÓGICA DIFUSA CON LA INFORMACIÓN DEL MAPA MORFODINÁMICO

Para hacer la comparación entre los mapas obtenidos por lógica difusa (operación de suma y multiplicación), con respecto al mapa de tipo morfodinámico, se hizo un cambio en los datos, de formato vector a *raster*. Para ello, se tuvo la precaución de aplicar la misma información de georreferencia, con el fin de evitar divergencias en los datos.

3.6.1. RESULTADO DEL PRODUCTO DE VALORES DIFUSOS CON LA INFORMACIÓN MORFODINÁMICA

Una vez que los datos del mapa morfodinámico estuvieron en formato *raster*, se aplicó una operación de igualdad, para ubicar las porciones de relieve coincidentes entre mapas (ec. 3.42).

$$Erosion_laminar=if((morfo\text{dinámico_laminar}=logdifusa_suma)) \quad (3.42)$$

donde, *morfo\text{dinámico_laminar}*, es el mapa que sintetiza la información morfo\text{dinámica} a partir de la clase de erosión laminar en sus tres intensidades (severa, moderada y ligera); *logdifusa_suma*, es el mapa obtenido por suma difusa. La intersección de los valores para estos dos mapas, mostrará el terreno que coincide con la presencia del proceso de erosión laminar sobre la cuenca, explicado a partir de las relaciones dominantes entre variables evaluadas.

Para encontrar el terreno que contiene eventos de erosión tipo microcauces, se resolvió con ayuda de la operación de igualdad (ec. 3.43).

$$Erosion_microcauces=if((morfo\text{dinámico_microcauces}=logdifusa_suma)) \quad (3.43)$$

donde, *morfo\text{dinámico_microcauces}*, es el mapa que sintetiza la información morfo\text{dinámica}, a partir de la clase de erosión por microcauces en sus tres intensidades (severa, moderada y ligera); *logdifusa_suma*, es el mapa obtenido por suma difusa.

La intersección de los valores para estos dos mapas, mostrará el terreno que coincide en la presencia de eventos erosivos de tipo microcauce, explicado a partir de las relaciones dominantes entre variables evaluadas.

Para encontrar el área de la cuenca que contiene erosión por cárcavas, se resolvió con ayuda de la operación de igualdad (ec. 3.44).

$$Erosion_cárcavas=if((morfo\text{dinámico_cárcavas}=logdifusa_suma)) \quad (3.44)$$

donde, *morfo\text{dinámico_cárcavas}*, es el mapa que sintetiza la información morfo\text{dinámica}, a partir de la clase de erosión por cárcavas en sus tres intensidades (severa, moderada y ligera); *logdifusa_suma*, es el mapa obtenido por suma difusa.

La intersección de los valores para estos dos mapas, mostrará el terreno que contiene el proceso de erosión por cárcavas sobre el terreno de la cuenca, explicado a partir de las relaciones dominantes entre variables evaluadas.

3.6.2. RESULTADO DE LA SUMA DE VALORES DIFUSOS CON LA INFORMACIÓN MORFODINÁMICA

Una vez que los datos del mapa morfodinámico estuvieron en formato *raster*, se aplicó una operación de igualdad, para ubicar las porciones de relieve coincidentes entre mapas (ec. 3.45).

$$Erosion_laminar=if((morfodinamico_laminar=logdifusa_producto)) \quad (3.45)$$

donde, *morfodinámico_laminar*, es el mapa que sintetiza la información morfodinámica a partir de la clase de erosión laminar en sus tres intensidades (severa, moderada y ligera); *logdifusa_producto*, es el mapa obtenido por producto difuso. La intersección de los valores para estos dos mapas, mostrará el terreno que coincide con la presencia del proceso de erosión laminar sobre la cuenca, explicado a partir de las relaciones dominantes entre variables evaluadas.

Para encontrar el terreno que contiene eventos de erosión tipo microcauces, se resolvió con ayuda de la operación de igualdad (ec. 3.46).

$$Erosion_microcauces=if((morfodinamico_microcauces=logdifusa_producto)) \quad (3.46)$$

donde, *morfodinámico_microcauces*, es el mapa que sintetiza la información morfodinámica, a partir de la clase de erosión por microcauces en sus tres intensidades (severa, moderada y ligera); *logdifusa_producto*, es el mapa obtenido por producto difuso.

La intersección de los valores para estos dos mapas, mostrará el terreno que coincide en la presencia de eventos erosivos de tipo microcauce, explicado a partir de las relaciones dominantes entre variables evaluadas.

Para encontrar el área de la cuenca que contiene erosión por cárcavas, se resolvió con ayuda de la operación de igualdad (ec. 3.47).

$$Erosion_carcavas=if((morfodinamico_carcavas=logdifusa_producto)) \quad (3.47)$$

donde, *morfodinámico_carcavas*, es el mapa que sintetiza la información morfodinámica, a partir de la clase de erosión por cárcavas en sus tres intensidades (severa, moderada y ligera); *logdifusa_producto*, es el mapa obtenido por producto difuso.

La intersección de los valores para estos dos mapas, mostrará el terreno que contiene el proceso de erosión por cárcavas sobre el terreno de la cuenca, explicado a partir de las relaciones dominantes entre variables evaluadas.

4. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA

4.1. MAPA GEOMORFOLÓGICO ANALÍTICO

4.1.1. MORFOMETRÍA

En el relieve de la cuenca, se encontró que la elevación más baja es la 1,790 msnm localizada en la cercanía de la salida del parteaguas, al SW sobre las localidades de Zangarero Nuevo y San José de Llanos (Figura 4.1 y 4.2). La elevación más alta tiene un valor de 2,820 msnm ubicada hacia la parte este de la localidad denominada La Peregrina, sobre el cerro denominado Mesa el Paseo; además conforma el límite noreste de la cuenca, por lo que la amplitud de relieve es de 1,030 m.

Las laderas con inclinaciones escarpadas se ubican en terrenos de materiales rocosos, como por ejemplo, al centro de la cuenca están las riolitas del cerro La Bufa ubicada a un costado de las localidades de Campuzano y Calderones. Otra porción del relieve en la que el conglomerado rojo queda expuesto, son las laderas en las que la ciudad de Guanajuato se ha edificado.

4.1.2. MORFOGÉNESIS

Clasificar el relieve de la cuenca, a partir de su origen general y específico, ayudó a encontrar que la información morfocronológica de la cuenca muestra a las rocas más antiguas (Jurásico-Cretácico) se localizan en la parte central y al NW. Su presencia se debe al proceso tectónico de modelación del relieve, debido a que se han presentado diversas etapas de levantamientos orogénicos (Figuras 4.2), esto ha originado un relieve complejo que expone a los materiales de origen volcánico, marino y metamórfico. Algunas de las rocas son por ejemplo lutitas, limonitas, tonalita, plagiogranitos, granodioritas, basaltos, gabros, andesita, dacita (Figura 4.2). En estos relieves, la cobertura vegetal es de bosque de encinos y matorrales, seguidos por los pastizales.

Hacia la parte centro y S-SE de la cuenca aparecen las rocas de edad cenozoica, del Paleógeno-Neógeno, donde el material más antiguo es el conglomerado Guanajuato que presenta un color rojizo oscuro y una composición de detritos. La cobertura vegetal queda definida por el bosque de encinos, pastizales naturales; además, el uso del suelo de agricultura y de ciudad (Figura 4.2).

Al utilizar el SIG para generar la georreferencia de las fotografías aéreas, se alcanzaron las precisiones del listado que aparece en la Tabla 4.1, donde el valor mínimo es 1.616, y el valor máximo de 2.159.

Tabla 4.1. Fotografías por línea de vuelo, con el valor del error cuadrático, respectivo.

Línea de vuelo	No. de fotografía	Fecha del vuelo	Valor de sigma
146	16	Feb-94	2.003
145	16	ND	2.059
145	15	ND	2.006
145	2	Feb-94	1.616
146	2	Jun-93	2.159
147	15	Jun-93	2.067
147	16	Jun-93	1.876
146	3	Jun-93	2.053

El mapa geomorfológico morfogenético, queda resumido en forma de polígonos que integran la información analítica mediante la Tabla 4.2, donde se listan cada una de las unidades morfogenéticas, UM. Cabe indicar que algunas UM quedan fuera del parteaguas de la cuenca, ya que el relieve está clasificado por su origen general y específico, pero se les mantuvo en el mapa debido a que se han usado como referencia. Hay un total de 67 UM que forman parte del relieve de la cuenca (Figura 4.2).

De las 67 UM que clasifican genéticamente al relieve de la cuenca, 16 aparecen diferenciadas como planicies fluviales y una como planicie aluvial. En su interior y como rasgos de relieve, se encontraron 27 terrazas fluviales, en las riveras de los ríos Guanajuato y El Cubo. Además hay 6 lomeríos altos y 2 medios; las laderas de montaña son una cantidad de 42 UM, de ellas 20 corresponden a laderas de montaña altas, 12 son laderas de montaña medias y 10 como laderas de montaña bajas. Del número total de las UM, el 55% presentan origen endógeno y el 45% exógeno.

Las planicies abarcan el 25% de las UM y representan el 1.4% de superficie del territorio en estudio. Se clasificaron en aluviales y fluviales (en su interior aparecen terrazas), diferenciadas por el trabajo de campo realizado, en el que se revisó la topografía local y los materiales. Se localizan principalmente, en la parte centro-sur de la cuenca y en las áreas de inundación de los ríos Cubo y Guanajuato. Se encontró que los materiales de este relieve datan del pleistoceno a partir del cuaternario y son aluvión, arenas y gravas, de naturaleza como riolitas, tobas riolíticas y andesíticas, entre otras, desplazadas y depositadas por mecanismos gravitacionales.

En una primera interpretación de las fotografías aéreas, no se pudieron diferenciar las terrazas, sino en el momento de que se hizo la verificación de campo, pues se comprobó la forma escalonada de su posición topográfica, que destacan a estas planicies con respecto al resto del terreno.

En las planicies, la inclinación del terreno está entre el intervalo de 0° a 4°. La posición altitudinal va desde los 1,820 y hasta 1,988 m. La diferencia topográfica de nivel entre planicies llega hasta los 198 metros.

Los Lomeríos, abarcan el 8.8% del total de las UM cartografiadas, y representan el 19.3% de la superficie total de la cuenca. Se localizan principalmente en la porción sur-sureste de la cuenca, sobre el graben La Saucedá y forma el límite con la falla El Bajío. De edad general del Mioceno y de materiales como arenisca, conglomerado polimictico, ignimbrita, riolita, toba riolítica, andesita y dacita. Estos lomeríos aparecen en dos clases, diferenciados a partir de la altura relativa de cada elemento y por su distribución que guardan en el terreno. Esto influye en los intervalos de inclinación de la pendiente, ya que van desde los 0° hasta los 46°, con alturas relativas máximas de 380 metros y mínimas de 160 metros. Las elevaciones sobre las que se encuentran estas UM van desde la cota 1,788 y hasta los 2,170 msnm (Figura 4.2).

Los lomeríos contienen información morfométrica que involucra rupturas de pendiente, misma que presenta una inclinación de la pendiente con valores de hasta 20°. Aunque, esto sucede únicamente en el Lomerío alto 1 (Loa1) y Lomerío alto 3 (Loa3), y en sus laderas orientadas al norte.

Las laderas de montaña se ubican en un segmento de rumbo NW-SE (Figura 4.2), sobre este terreno se presentan los valores de inclinación de la pendiente con mayor gradiente, así como la elevación y altura relativa con mayor amplitud. Estas UM cubren el 46.2% del total de unidades, que representan el 78.1% de la superficie de la cuenca. El intervalo de elevación es de 990 metros, las elevaciones están entre 1,830 msnm a 2,820 msnm. La inclinación de la pendiente va de los 4.3° a los 42.7°. La altura relativa entre UM va desde los 430 metros y hasta un máximo de 990 metros. Los materiales que se encuentran al interior de estas UM son porfido riolítico, toba andesítica, brecha andesítica, toba riolítica, ignimbrita, andesita, roca metavolcanosedimentaria, diorita, granito y basalto.

En la Figura 4.1 aparecen los pisos de elevación de cada una de las UM que se localizan al interior de la cuenca (en las que se incluyen las terrazas). Cabe destacar que existe una relación entre la amplitud y la inclinación del terreno, como lo ilustra la Figura 4.1, es decir, en terrenos con amplitud de relieve grande (laderas de montaña) aparecen inclinaciones de la pendiente muy pronunciada, y en sitios donde el terreno indica poco cambio en las elevaciones (planicies), el valor de la inclinación de la pendiente es de leve a moderado (Fig. 4.5).

Cabe mencionar que los intervalos de elevación topográfico, entre curvas de nivel es de 10 m, y que en las cimas de los lomeríos y laderas montañosas aparecen porciones con poco detalle de curvas, de forma que estas cimas de terreno presentan cambios en la inclinación, de manera gradual y constante. Las laderas de montaña cubren la porción norte, noreste y noroeste, además del sur-sureste de la cuenca. Esto significa que la morfometría del terreno, establece un predominio de laderas inclinadas y de longitud extensa; además de que presentan como cubierta vegetal principal a los bosques y matorrales. Cada una de estas UM de ladera de montaña, presentan diversos grados de alteración por acción de eventos erosivos acelerados por el agua. Principalmente en los terrenos donde aparece la actividad de minería, como es la mina El Cubo, Peregrina y Las Torres,

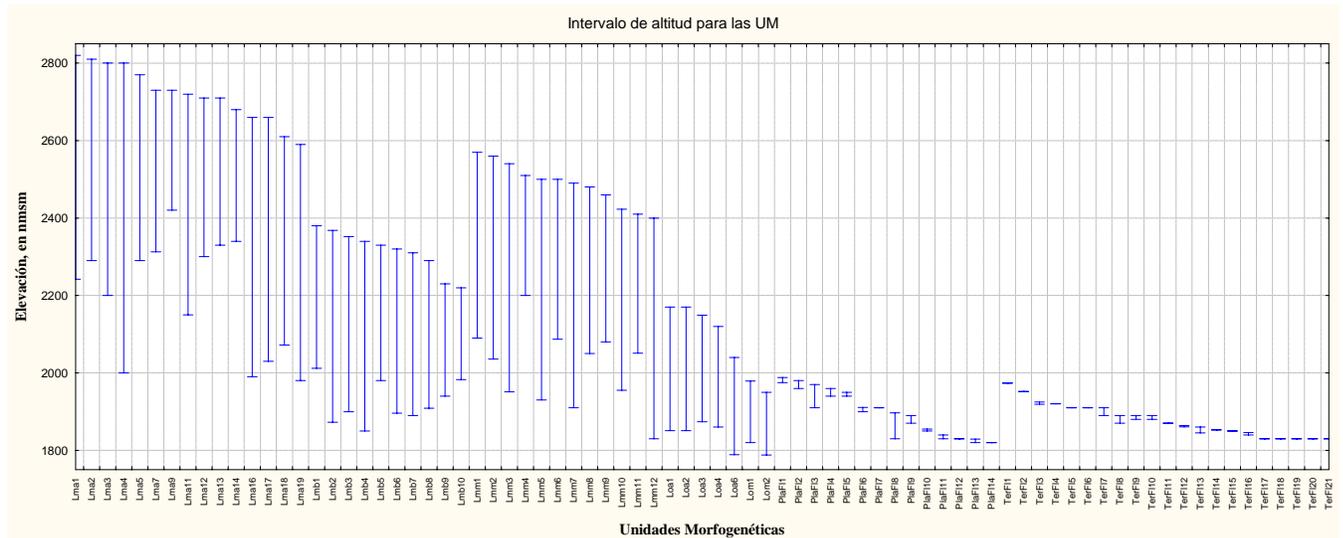
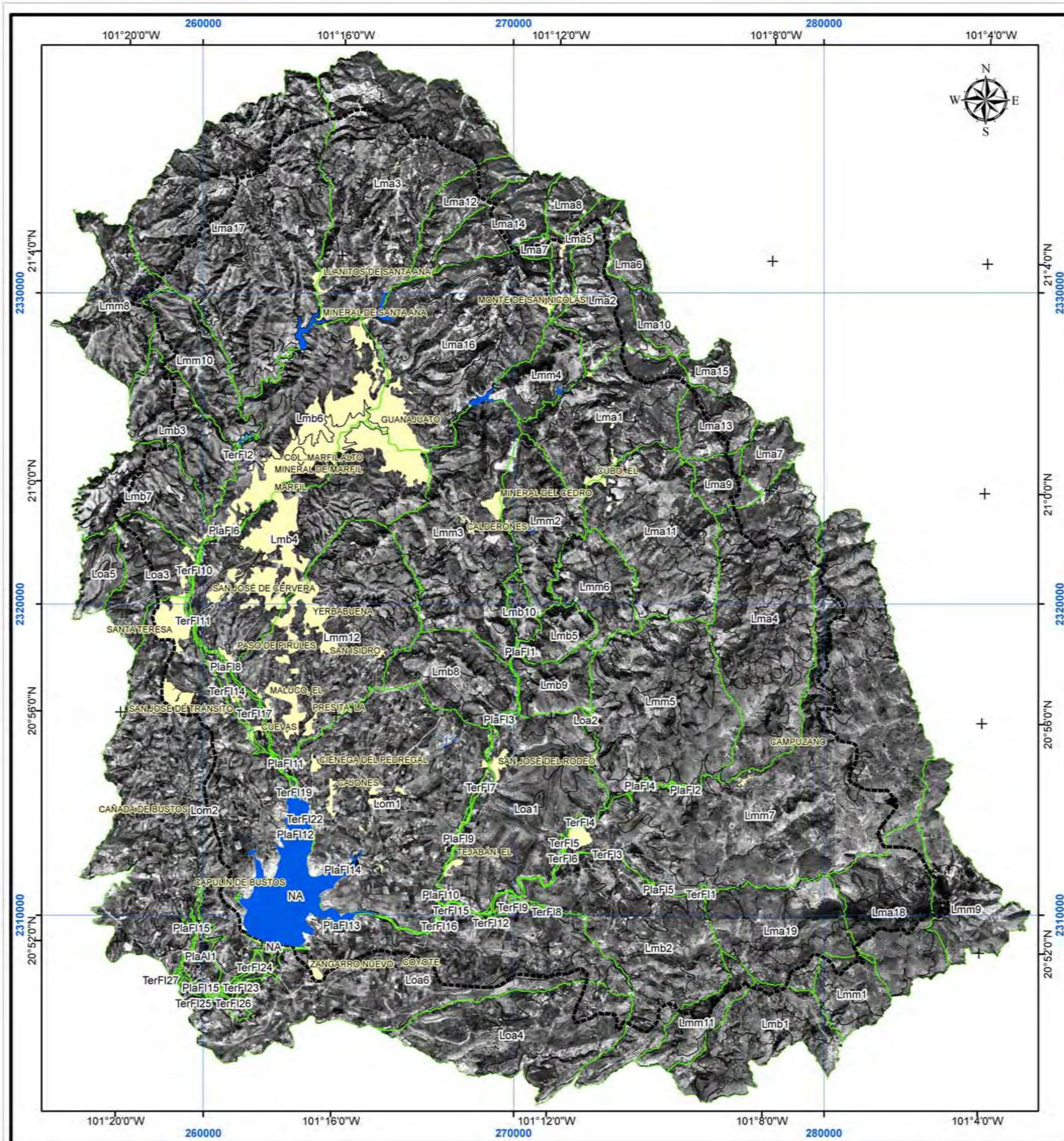


Figura 4.1. Intervalo de elevación del terreno al interior de las UM

Los mapas de las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5, ilustran las relaciones morfométricas y morfográficas, que ayudaron a definir y describir las UM que configuran el relieve de la cuenca. Los intervalos de inclinación de pendiente, muestran una diferencia marcada entre relieve ondulado y plano. La diferencia de valores de la inclinación al interior de los lomeríos es alta, mientras que la planicie presenta poco cambio (Fig. 4.5).



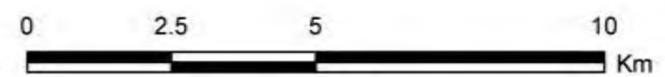
SIMBOLOGÍA

- PARTEAGUAS DE LA CUENCA
- CUERPOS DE AGUA
- ASENTAMIENTOS HUMANOS
- RED FLUVIAL

LEYENDA

CLAVE, TIPO DE RELIEVE, ORIGEN DEL RELIEVE

- Lmb1, Lmb3, Lmb5, Lmb8, Lmb9, Lmb10
Ladera de montaña baja, Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio tectonizado).
- Lmb2, Lmb6
Ladera de montaña baja, Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado.
- Lmb4, Lmb7
Ladera de montaña baja, Endógeno, acumulativo denudatorio (tectonizado)
- Lmm1, Lmm2, Lmm3, Lmm4, Lmm6, Lmm7, Lmm8, Lmm11, Lmm12
Ladera de montaña media, Endógeno, acumulativo volcánico modelado (denudatorio tectonizado).
- Lmm5, Lmm9, Lmm10
Ladera de montaña media, Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado.
- Lma1, Lma2, Lma3, Lma4, Lma5, Lma8, Lma12, Lma14
Ladera de montaña alta, Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado.
- Lma6, Lma9, Lma10, Lma13, Lma15, Lma17, Lma18, Lma19
Ladera de montaña alta, Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio tectonizado).
- Lma7, Ladera de montaña alta, Endógeno, acumulativo, tectonizado
- Lma11, Ladera de montaña alta, Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado.
- Lma16, Ladera de montaña alta, Endógeno, acumulativo de material marino, tectonizado.
- Lom1, Lom2
Lomerío medio, Exógeno, acumulativo denudatorio
- Loa1, Loa5
Lomerío alto, Exógeno, acumulativo denudatorio (tectonizado)
- Loa2, Lomerío alto, Exógeno, acumulativo denudatorio
- Loa3, Loa4, Loa6
Lomerío alto, Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio tectonizado).
- PlaF11, PlaF12, PlaF13, PlaF14, PlaF15, PlaF16, PlaF17, PlaF18, PlaF19, PlaF10, PlaF11, PlaF12, PlaF13, PlaF14, PlaF15
Planicie fluvial, Exógeno, acumulativo denudatorio



1:100,000
PROYECCIÓN UTM, WGS84, ZONA 14N

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FIGURA 4.10
MAPA DE UNIDADES MORFOGENÉTICAS

2008

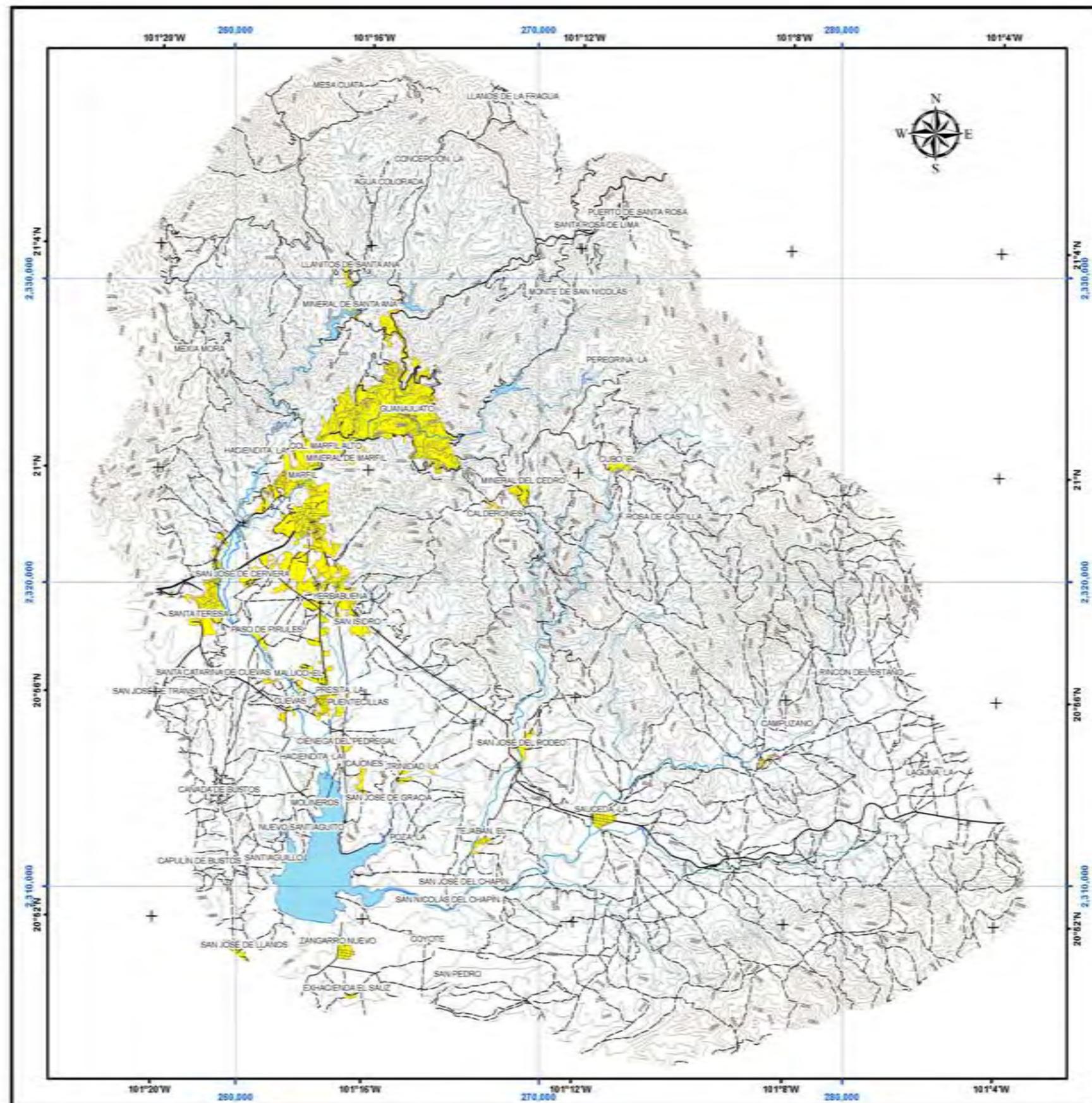
Tabla 4.2. Listado en detalle de las UM.

RELIEVE		EDAD DE LA ROCA	LITOLOGIA	MORFOMETRÍA (INTERVALO DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE, DE ALTITUD, Y AMPLITUD DE RELIEVE)	CLAVE	ÁREA, en m ²
TIPO	ORIGEN					
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Cretácico	Rocas basálticas, riolíticas, dioríticas y volcanosedimentarias	16.8-31.1°, 2200-2800m, 1010 m	Lma3	31,211,251.94
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Holoceno	Rocas andesíticas, dacíticas, riolíticas, toba riolítica, brecha riolítica	8.8-29.7°, 2150-2720 m, 930 m	Lma11	17,001,142.44
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Paleógeno	Complejo: Roca metavolcano-sedimentaria, riolitas, andesitas y dioritas	8.2-29.6°, 2300-2710 m, 920 m	Lma12	5,005,446.15
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Oligoceno	pórfido riolítico, toba andesítica, brecha andesítica y toba riolítica	8.5-31.9°, 2242-2820 m, 1030 m	Lma1	14,605,240.55
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, tectonizado	Cretácico	Complejo: Metavolcanosedimentaria, toba riolítica y brecha riolítica	8.5-27.5°, 2313-2730 m, 940 m	Lma7	3,088,273.76
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, tectonizado	Cretácico	Complejo: Metavolcanosedimentaria, toba riolítica y brecha riolítica	8.5-27.5°, 2313-2730 m, 940 m	Lma7	703,177.22
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Cretácico	Andesita, toba riolítica, brecha riolítica y metavolcanosedimentaria	13.4-31.7°, 2340-2680 m, 890 m	Lma14	6,023,691.23
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Cretácico	Complejo: Metavolcanosedimentaria, diorita, granito y basalto	17.8-32.1°, 2290-2770 m, 980 m	Lma5	2,837,596.43
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Cretácico	Complejo: Metavolcanosedimentaria, diorita, andesita, tonalita y congl. polimictico	8.8-32.4°, 2350-2730 m, 940 m	Lma8	2,307,646.45
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Eoceno	Complejo: Metavolcanosedimentaria, riolita, toba riolítica, andesita y basalto	17.5-32.3°, 2290-2810m, 1020 m	Lma2	7,937,870.98
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Mioceno	Riolita, toba riolítica, ignimbrita, andesita	6.5-33.7°, 2000-2800 m, 1010 m	Lma4	25,480,594.69
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo de material marino, tectonizado	Eoceno	Complejo: Metacaliza, Riolita, Diorita, Andesita, Metavolcanosedimentaria	17.6-32.4°, 1990-2660 m, 870 m	Lma16	25,328,006.35
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Eoceno	Tobas riolíticas, riolita, ignimbrita, conglomerado polimictico	8.7-42.7°, 1980-2590 m, 800 m	Lma19	12,344,935.60
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Cretácico	Tonalita, Riolita, Diorita	15.8-31.4°, 2030-2660 m, 870 m	Lma17	41,894,619.70
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica, conglomerado polimictico	5.0-32.8°, 2072-2610 m, 820 m	Lma18	12,247,705.01
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica, andesita, dacita	9.1-31.8°, 2420-2730 m, 940 m	Lma9	2,953,686.05
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Andesita, dacita, riolita, toba riolítica	9.4-31.1°, 2330-2710 m, 920 m	Lma13	4,671,119.35

RELIEVE		EDAD DE LA ROCA	LITOLOGIA	MORFOMETRÍA (INTERVALO DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE, DE ALTITUD, Y AMPLITUD DE RELIEVE)	CLAVE	ÁREA, en m ²
TIPO	ORIGEN					
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica	9.8-31.3°, 2380-2680 m, 890 m	Lma15	2,113,141.92
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica	17.4-34.5°, 2450-2730 m, 940 m	Lma10	2,093,727.28
Ladera de montaña alta	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica	9.2-30.6°, 2540-2750 m, 960 m	Lma6	1,778,912.20
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Eoceno	Riolita, toba riolítica, conglomerado polimictico e ignimbrita	4.5-12.2°, 1873-2368 m, 578 m	Lmb2	20,843,699.62
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Eoceno	Conglomerado polimictico, metavolcanosedimentaria, diorita	9.9-33.1°, 1896-2320 m, 530 m	Lmb6	18,905,474.25
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Mioceno	Riolita, toba riolítica, ignimbrita	8.7-29.8°, 1940-2230 m, 440 m	Lmb9	4,315,696.01
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Andesita, dacita, toba andesítica	16.4-31.5°, 1983-2220 m, 430 m	Lmb10	1,405,025.96
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Toba riolítica, arenisca	20.3-30.1°, 1980-2330 m, 540 m	Lmb5	3,023,254.12
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Roba riolítica, riolita, conglomerado polimictico	8.9-29.8°, 2012-2380 m, 590 m	Lmb1	11,041,988.84
Ladera de montaña baja	Exógeno, acumulativo denudatorio (tectonizado)	Eoceno	Arenisca, conglomerado polimictico, toba riolítica, grava-arena, Aluvión	6-24.8°, 1850-2340 m, 550 m	Lmb4	23,874,524.93
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Holoceno	Riolita, roba riolítica, toba andesítica, dacita, andesita	17.9-31.0°, 1909-2290 m, 500 m	Lmb8	8,765,189.01
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo denudatorio (tectonizado)	Eoceno	Complejo: Metavolcanosedimentaria, conglomerado polimictico	8.9-31.7°, 1890-2310 m, 520 m	Lmb7	9,228,482.18
Ladera de montaña baja	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Cretácico	Basalto, Diorita	7.8-32.9°, 1900-2352 m, 562 m	Lmb3	8,472,264.24
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Mioceno	Rocas de arenisca, conglomerado, andesítica, dacítica, ignimbrita y toba	4.3-32.7°, 2080-2460 m, 670 m	Lmm9	9,882,605.95
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Mioceno	Riolita, ignimbrita	9.1-33.2°, 1930-2500 m, 710 m	Lmm5	22,080,302.47
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo de material volcánico, tectonizado	Cretácico	Basalto, Tonalita	19.5-34.2°, 1955-2423 m, 633 m	Lmm10	7,747,173.63
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Eoceno	Tobas riolíticas y andesíticas, dacitas, pórfido riolítico y conglomerado polimictico	16-27.8°, 1951-2540 m, 750 m	Lmm3	21,347,656.65

RELIEVE		EDAD DE LA ROCA	LITOLOGIA	MORFOMETRÍA (INTERVALO DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE, DE ALTITUD, Y AMPLITUD DE RELIEVE)	CLAVE	ÁREA, en m ²
TIPO	ORIGEN					
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica, conglomerado polimictico	10.4-32.4°, 2090-2570 m, 780 m	Lmm1	4,698,572.91
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Eoceno	Andesita, brecha andesítica, toba andesítica, toba riolítica	10.5-33.2°, 2036-2560 m, 770 m	Lmm2	8,969,427.37
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Andesita, dacita, toba riolítica	9.4-31.6°, 2087-2500 m, 710 m	Lmm6	6,611,157.87
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica, conglomerado polimictico	8.8-29.5°, 2051-2410 m, 620 m	Lmm11	4,403,334.96
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Riolita, toba riolítica, ignimbrita, andesita, dacita	4.3-14.2°, 1910-2490 m, 700 m	Lmm7	56,040,945.63
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	pórfido riolítico, riolita, toba riolítica	16.8-29.6°, 2200-2510 m, 720 m	Lmm4	5,092,879.18
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Jurásico	Basalto, diorita	8.1-32.5°, 2050-2480 m, 690 m	Lmm8	9,795,400.66
Ladera de montaña media	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Oligoceno	Complejo: Toba andesítica, arenisca, conglomerado polimictico, toba riolítica	13-22.2°, 1830-2400 m, 610 m	Lmm12	25,377,972.07
Lomerío alto	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Mioceno	Riolita, toba riolítica, ignimbrita	4.0-13.4°, 1789-2040 m, 250 m	Loa6	35,368,167.14
Lomerío alto	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Mioceno	Ignimbrita, toba riolítica, arenisca, conglomerado polimictico	4.8-8.4, 1874-2149 m, 359 m	Loa3	7,044,634.35
Lomerío alto	Exógeno, acumulativo denudatorio (tectonizado)	Mioceno	Arenisca, conglomerado polimictico	8.7-32.8°, 1863-2072 m, 282 m	Loa5	3,193,933.75
Lomerío alto	Exógeno, acumulativo denudatorio (tectonizado)	Mioceno	Arenisca, conglomerado polimictico, ignimbrita	4.6-13.6°, 1851-2170 m, 380 m	Loa1	20,441,798.17
Lomerío alto	Endógeno, acumulativo, volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Mioceno	Riolita, toba riolítica, ignimbrita, andesita, dacita	4.2-14.5°, 1860-2120 m, 330 m	Loa4	17,304,289.80
Lomerío medio	Exógeno, acumulativo denudatorio	Cuaternario	Arenisca, conglomerado polimictico, grava-arena	4.7-15.6°, 1788-1950 m, 160 m	Lom2	49,701,451.12
Lomerío medio	Exógeno, acumulativo denudatorio	Mioceno	Arenisca, conglomerado polimictico, ignimbrita	2.1-5.7°, 1820-1979 m, 189 m	Lom1	34,519,141.35

RELIEVE		EDAD DE LA ROCA	LITOLOGIA	MORFOMETRÍA (INTERVALO DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE, DE ALTITUD, Y AMPLITUD DE RELIEVE)	CLAVE	ÁREA, en m ²
TIPO	ORIGEN					
Planicie aluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Pleistoceno	Grava-arena	0-4.9°, 1790-1799 m, 9 m	PlaAl1	1,686,272.76
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Pleistoceno	Grava-arena	0-2.4°, 1790-1795 m, 5 m	PlaFl15	270,257.65
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Pleistoceno	Grava-arena	0-2.4°, 1790-1795 m, 5 m	PlaFl15	146,272.20
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-3.1°, 1820-1829 m, 39 m	PlaFl13	324,506.84
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0°, 1830 m, 40 m	PlaFl12	56,345.93
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-1°, 1850-1855 m, 65 m	PlaFl10	422,838.55
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-2.5°, 1870-1890 m, 100 m	PlaFl9	154,124.44
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-3.2°, 1830-1897 m, 107 m	PlaFl8	587,694.82
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-0.5°, 1900-1911 m, 121 m	PlaFl6	75,279.56
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-1.6°, 1830-1840 m, 50 m	PlaFl11	95,132.96
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-0.8°, 1820 m, 30 m	PlaFl14	15,398.40
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0, 1910 m, 120 m	PlaFl7	11,370.25
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-4°, 1940-1960 m, 170 m	PlaFl4	77,292.86
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-2.5°, 1960-1980 m, 190 m	PlaFl2	74,796.50
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0-1.8°, 1940-1950 m, 160 m	PlaFl5	29,417.57
Lomerío alto	Exógeno, acumulativo denudatorio	Mioceno	Arenisca, conglomerado polimictico, ignimbrita	0-46.4°, 1851-2170 m, 380 m	Loa2	77,428.07
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	0.13-0.14°, 1910-1970 m, 180 m	PlaFl3	330,587.44
Planicie fluvial	Exógeno, acumulativo denudatorio	Holoceno	Aluvión	5.6-8.3°, 1975-1988 m, 198 m	PlaFl1	54,859.93



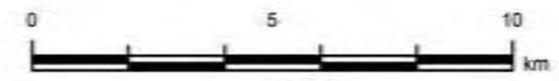
SIMBOLOGÍA

- PARTEAGUAS, CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO
- CUERPOS DE AGUA, HASTA EL AÑO 2003
- ASENTAMIENTO HUMANO, HASTA EL AÑO DE 2003

HIDROGRAFÍA
ORDEN DE LA CORRIENTE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6

- CALLE
- CARRETERA DE TERRACERÍA
- CARRETERA DE CUOTA DE 4 CARRILES
- CARRETERA LIBRE DE 2 CARRILES
- - - CAMINO_VEREDA
- - - CAMINO_BRECHA
- ⌘ PUEBLO
- ⌘ PUEBLO
- 1700 — CURVA DE NIVEL, CADA 50m.



1:150,000
PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD83, ZONA 14N
CURVA DE NIVEL, CADA 50 m.

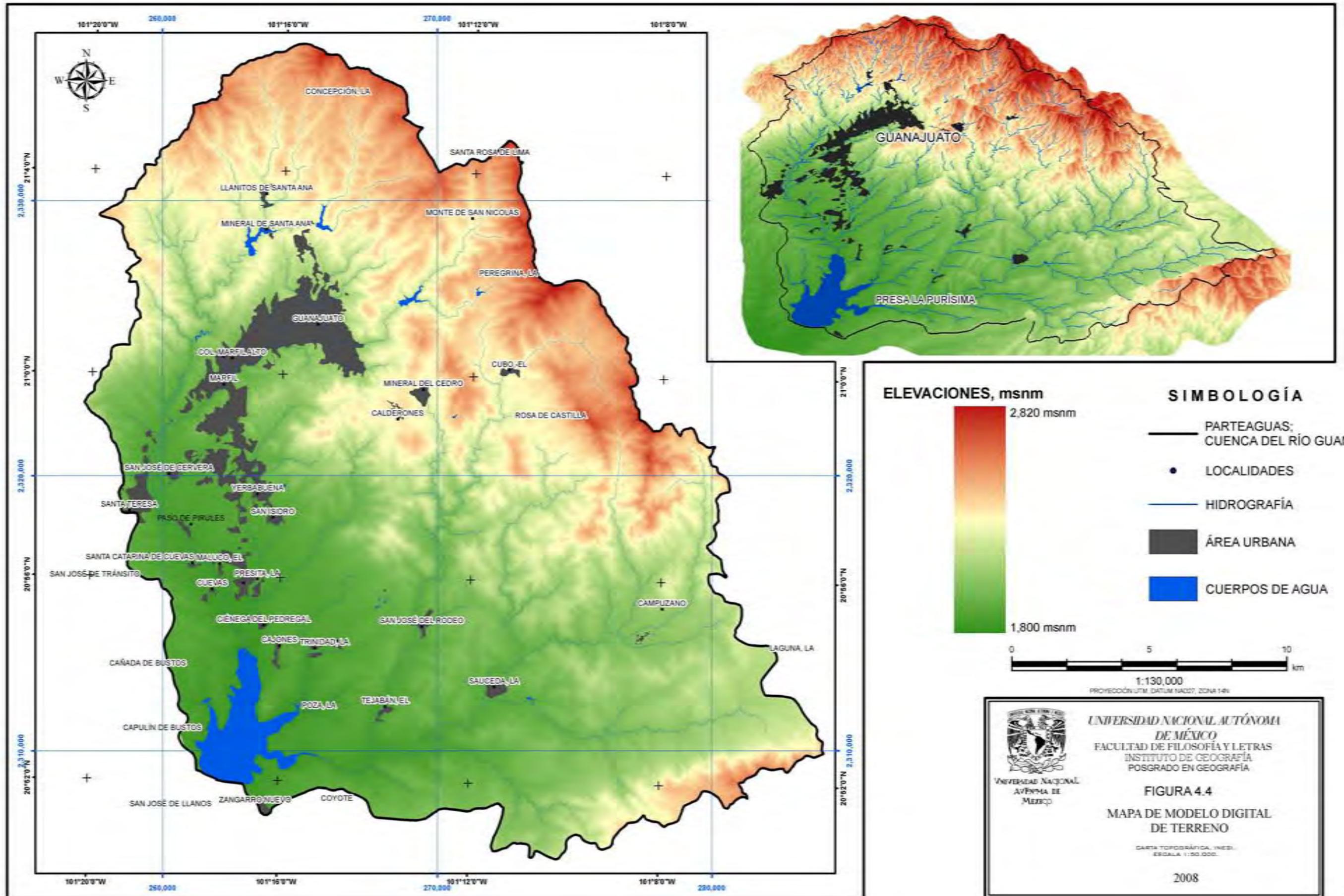


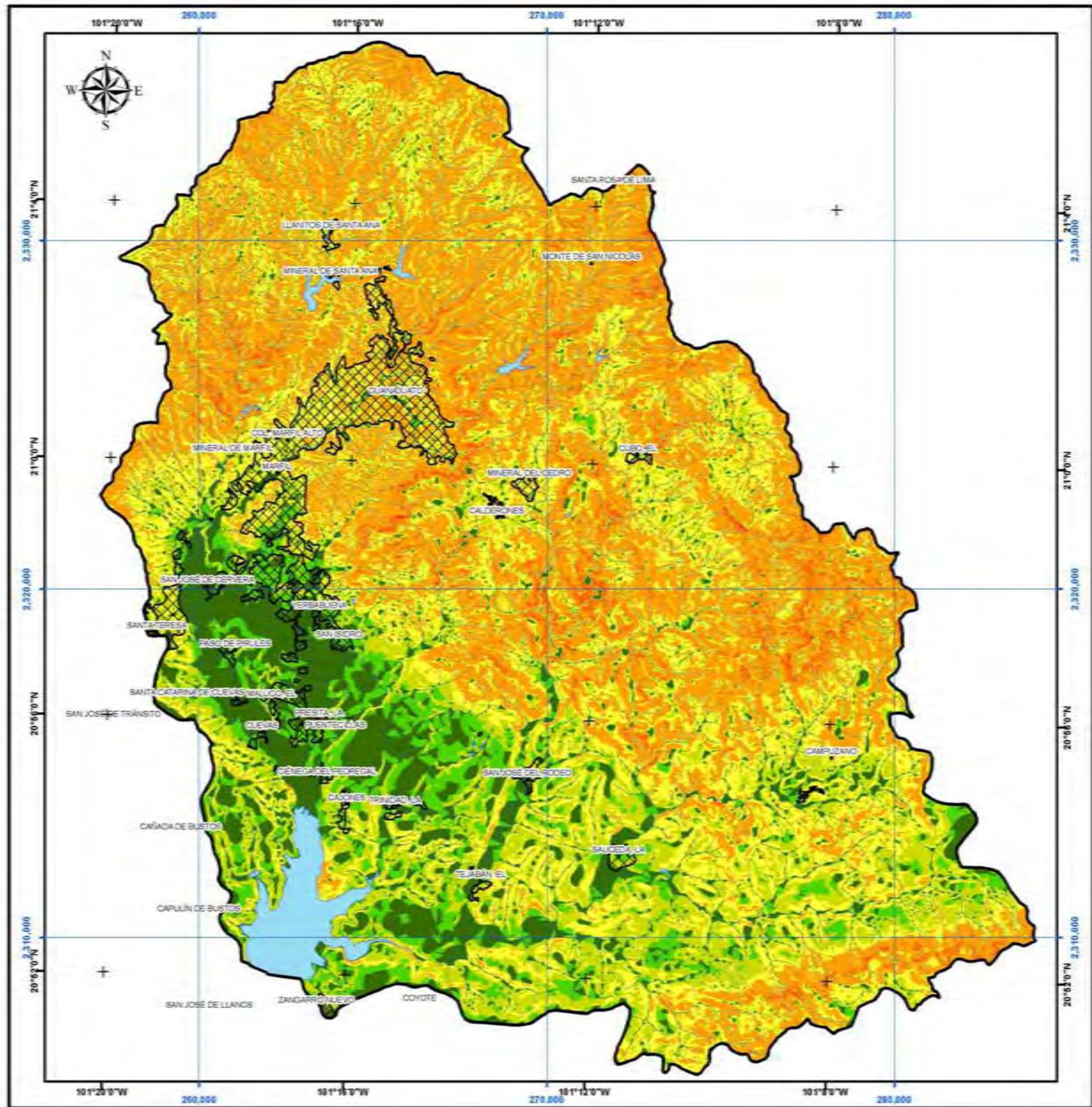
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FIGURA 4.3
MAPA TOPOGRÁFICO

CARTA TOPOGRÁFICA, INEGI
ESCALA 1:50,000
DATOS DE 1:50,000, DE 2003.

2008

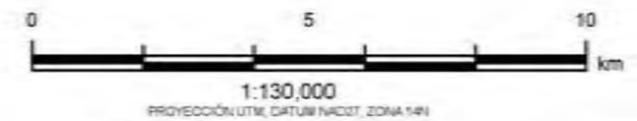




- SIMBOLOGÍA**
- CUENCA
 - HIDROGRAFÍA
 - ASENTAMIENTO HUMANO
 - CUERPOS DE AGUA
 - LOCALIDADES

INTERVALOS DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE (GRADOS)

- 0 - 2
- 2.0 - 4.0
- 4.0 - 8.0
- 8.0 - 16.0
- 16.0 - 35.0
- 35.0 - 55.0
- 55.0 - 90





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FIGURA 4.5
MAPA DE INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE

CARTA TOPOGRÁFICA 1:4043, 1:4053 DEL INEGI
ESCALA 1:50,000

2008

4.2 MAPA GEOMORFOLÓGICO MORFODINÁMICO, A ESCALA 1:20, 000

La Tabla 4.3 tiene el listado de la superficie que cubre cada tipo de erosión en la cuenca. Sobre el terreno, los eventos de erosión aparecen dispersos, lo que indica que se les puede encontrar sobre todo el terreno de la cuenca. La erosión de tipo laminar con intensidad moderada, es la que presenta la mayor cobertura con 223.18 km². La erosión laminar ligera abarca 6.01 km², esto significa que es el tipo de erosión con menor superficie. La Figura 4.6, muestra la ubicación de estos procesos erosivos.

Tabla 4.3. Resumen de las clases de erosión, localizadas en la cuenca, ordenadas por intensidad (calculados en la Figura 4.6).

Clase	Intensidad	Área, Km ²
Laminar	Ligera	6.01
	Moderada	223.18
	Severa	78.57
Microcauces	Ligera	6.77
	Moderada	20.38
	Severa	23.08
Cárcavas	Ligera	6.86
	Moderada	17.44
	Severa	37.15

Nota: la superficie que no contiene erosión hídrica del suelo evidente, cubre un total de 71.16 km².

La erosión hídrica acelerada, ocurren en todas las clases de relieve como son planicies, lomeríos y laderas de montaña (Figura 4.6). En la parte noreste, centro y sureste de la cuenca hay evidencia de la presencia de erosión por cárcavas y microcauces.

La erosión del suelo por flujo laminar en sus intensidades leve, moderada y fuerte, es la que cubre la mayor parte del área de la cuenca con un 77.12%. En segundo lugar, por cobertura de superficie, se localiza la erosión hídrica por cárcavas con un 12.58% y en tercer lugar, la erosión hídrica por microcauces, con un 10.3% de la cobertura total de la cuenca.

En la porción N y NE, ocurren la mayor parte de los flujos concentrados, en forma de erosión por microcauces y cárcavas (Figura 4.6). Las UM, sobre las que se concentran estos tipos de procesos son la Lma17, Lma3, Lma16, Lmm4, Lma1, Lma13 y Lma11. Cabe recordar que Lma, se refiere a las laderas de montaña altas; Lmm, son las laderas de montaña medias y el número corresponde a su posición relativa, de forma que entre más grande el número, más amplitud tiene el relieve. Los materiales son variados para estas UM, por ejemplo: las UM Lma17, Lma3 y Lma14 y que son las que presentan el mayor número de procesos erosivos

(Figuras 4.2 y 4.6) son datados del cretácico y de materiales como basaltos, dioritas, riolitas, andesitas y rocas volcanosedimentarias; los intervalos de inclinación de la pendiente predominante es desde los 15° y hasta los 32°. En la porción NE de la cuenca, las UM clasificadas como Lma1, Lma13 y Lma11, son tres áreas que contienen la mayor concentración de eventos erosivos por flujo concentrado (Figura 4.6), de materiales que datan del Oligoceno y Holoceno respectivamente. Contienen un intervalo de inclinación de la pendiente que se encuentra desde los 8° y hasta los 31° (Figuras 4.2, y 4.6). El uso del suelo y cubierta vegetal para las unidades Lma17 y Lma3, es de tipo pastizal y matorral (inermes-subinermes), con algunas áreas dedicadas a la agricultura. En las unidades Lma16, Lmm4, Lma1, Lma13 y Lma11, se presenta la cubierta de tipo bosque (en las partes altas de la unidad), de pastizal (sobre la porción media de las laderas) y matorrales (sobre las partes bajas de las laderas).

En el centro de la cuenca, sobre las localidades de Peregrina, Calderones, El Cubo y Capuzano, se encuentra otro grupo de procesos erosivos acelerados (Figura 4.6) de tipo cárcavas y microcauces. Las UM que contienen estos eventos son: Lmm3, Lmb10, Lmb8 y Lmb5. La datación de la litología es Eoceno para Lmm3, Oligoceno para Lmb10 y Lmb5, y del Holoceno para Lmb8. El intervalo promedio para la inclinación de la pendiente va desde los 10.5° y hasta los 32° (Figuras 4.2 y 4.6). Los materiales son de tipo riolita, andesita, dacita y porfido riolítico. En las unidades Lmm3, Lmb10, Lmb8 y Lmb5, dominan la cubierta vegetal de tipo pastizal, seguido de los matorrales y solo en la UM Lmm3 aparecen algunos campos de cultivo de temporal.

En el sureste de la cuenca, sobre el pie de monte ubicado en el límite entre la fosa tectónica La Saucedá, así como en las laderas de montaña, aparece otro grupo de procesos erosivos acelerados, de forma que la UM Lmm7 es la que contiene la mayor cantidad de procesos. La temporalidad de la litología de esta unidad es del Oligoceno y presenta un intervalo de la pendiente de 4° hasta 14.5°. Las otras UMs, que presentan una concentración de procesos erosivos son Lma18, Lma4 y Lma19.

La unidad Lma18, presenta una litología del Oligoceno, y un intervalo de inclinación de la pendiente de 5° hasta 32.8°. La Lma4, su litología es datada del Mioceno, con un intervalo de inclinación de 6.5° hasta 33.7°. La Lma19 tiene un intervalo de inclinación de 8° hasta 42°, con litología del Eoceno. Estas UM, ubicadas en la porción SE de la cuenca, presentan materiales de riolitas, tobas riolíticas, andesitas, ignimbritas y conglomerado polimictico (Figuras 4.6).

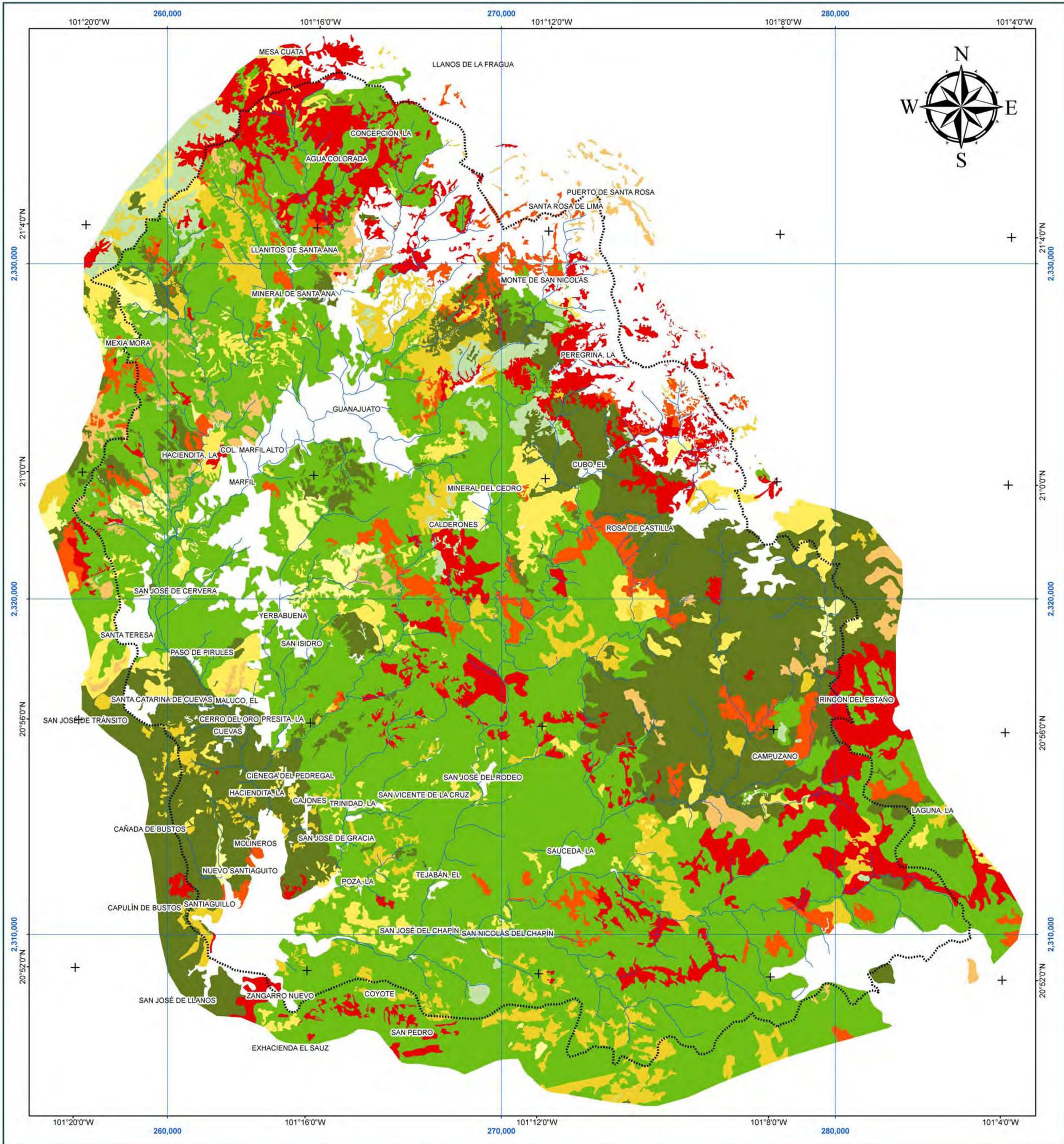
La UM Lmm7, tiene un uso del suelo de actividades agrícolas, en su porción alta aparecen bosques y matorrales. La unidad Lma4, presenta en su parte baja de ladera el uso del suelo de tipo agrícola, y algunas áreas forestales y de matorrales. Las UM, Lma18 y Lma19, tienen en sus partes bajas de la ladera el uso de suelo de tipo agrícola; Los bosques y matorrales cubren la mayor parte la superficie de esta porción de terreno.

Las UM con clave Lma3, Lma17, Lma16, Lmb6, Lmm4, Lma2, Lma1, Lma18, Lma19 y Lmm9, son las que contienen la mayor cantidad de eventos erosivos acelerados por flujo concentrado (Figura 4.6), y además presentan las alturas de lluvia efectiva con mayor valor, lo que significa que son áreas que generan los volúmenes más grandes en forma de escurrimientos, sobre la superficie de la cuenca. De esta forma, sobre la ladera y al pie de estas unidades, se tendrán eventos erosivos más intensos.

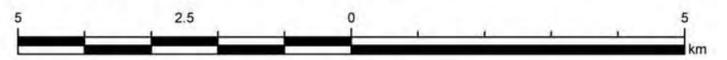
Finalmente, en las UM ubicadas al norte y NE de la cuenca definidas como Lma7, Lma5, Lma8, y Lma14, se registran valores muy altos de erosividad de la lluvia ($28.8 \text{ Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$). Las unidades Lma12, Lma16, Lma2 y Lma6, contienen valores altos de fuerza erosiva de la lluvia ($28.6 \text{ Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$). Las unidades Lmm10, Lmb3, Lmm8, Lma17, Lmb6, Lmm4, Lma1, Lma15, Lma13 y Lma10, tienen valores medios-altos de erosividad, ya que se registra un intervalo entre 28 y $28.6 \text{ Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$; lo mismo ocurre en las frontera sureste de la cuenca, en las unidades Lmb1, Lmm1, Lma18 y Lmm9.

El resto de las unidades se localiza con valores de erosividad entre 26.6 y $28 \text{ Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$. Siendo solo algunas porciones de las unidades Lma4, Lmm7, Lmm5, Lom2 y Loa6, las que registran los valores más bajos entre 26.6 y $26.8 \text{ Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$.

La Figura 4.6 ilustra el mapa morfodinámico, que contiene las porciones de relieve y los eventos erosivos acelerados de tipo hídrico. Se hace hincapié en que se ha creado en formato grande para lograr mayor detalle en la descripción de las porciones de relieve que contienen a los diferentes tipos de procesos erosivos acelerados.



MAPA MORFODINÁMICO DE EROSIÓN HÍDRICA ACELERADA



SIMBOLOGÍA

- Parteaguas de la cuenca del Río Guanajuato
- Red fluvial

LEYENDA

TIPO DE EROSIÓN, CLASE DE INTENSIDAD

	Laminar, Leve		Microcauces, Leve		Carcavas, Leve
	Laminar, Moderado		Microcauces, Moderado		Carcavas, Moderado
	Laminar, Fuerte		Microcauces, Fuerte		Carcavas, Fuerte
	SIN EROSIÓN HÍDRICA				

1:60,000
PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD27, ZONA 14N

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL AVENIDA DE MÉXICO

FIGURA 4.6

2008

5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA

5.1. DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA

El parteaguas ó divisoria (Figura 5.1) en el plano XY, tiene una longitud de 113,368.73 m. El área aproximada de la cuenca, es de 490,643,693.6 m² o 490.64 km².

Con base en la superficie de la cuenca y de la clasificación de las cuencas (Tabla 5.1), se le considera como pequeña a intermedia (Campos, 1984).

Tabla 5.1. Clasificación propuesta para cuenca, con base en el tamaño de la superficie (Campos, 1984).

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Pequeña-intermedia
500 a 2,500	Intermedia-grande
2.500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy grande

La corriente principal es el Río Guanajuato, con una longitud en el plano XY de 38,875.776 m. En XYZ de 39,006.036 m. El cual presenta un desnivel, desde inicio a fin, de 990 m. El orden de la corriente de la cuenca es de grado seis (Figura 5.1) (Campos, 1984).

La densidad de corrientes, calculada es: $D_c = 2534/490.64 = 5.16$ cauces/km².

La densidad de drenaje, resultante es: $D_d = 2.814$ km de cauce/km², $D_d = 0.002814$ m de cauce/m²

El cálculo de la inclinación media del cauce principal, mediante el método de Taylor y Schwarz (Aparicio, 2003) indica que: se obtuvieron 95 tramos de longitud variable que lo subdividen. El tramo de longitud más largo presenta un valor de 5,964.8 m y el más corto tiene apenas 10.1 m, en la Tabla 5.2, se listan los resultados.

Tabla 5.2. Valores calculados de la inclinación del cauce principal.

S mín =	0.00168	S =	0.03594 radianes	Taylor y Schwarz	Valores obtenidos entre todos los segmentos del cauce principal
S max =	0.83016	S =	3.594 %		
Cuartil(25%)	0.021745	S =	0.05575006	media	
Cuartil(75%)	0.173155	S =	5.57500561 %	geométrica	
Cuartil(media)	0.04213				
		S =	0.12767263	media	
		S =	12.7672632 %	aritmética	

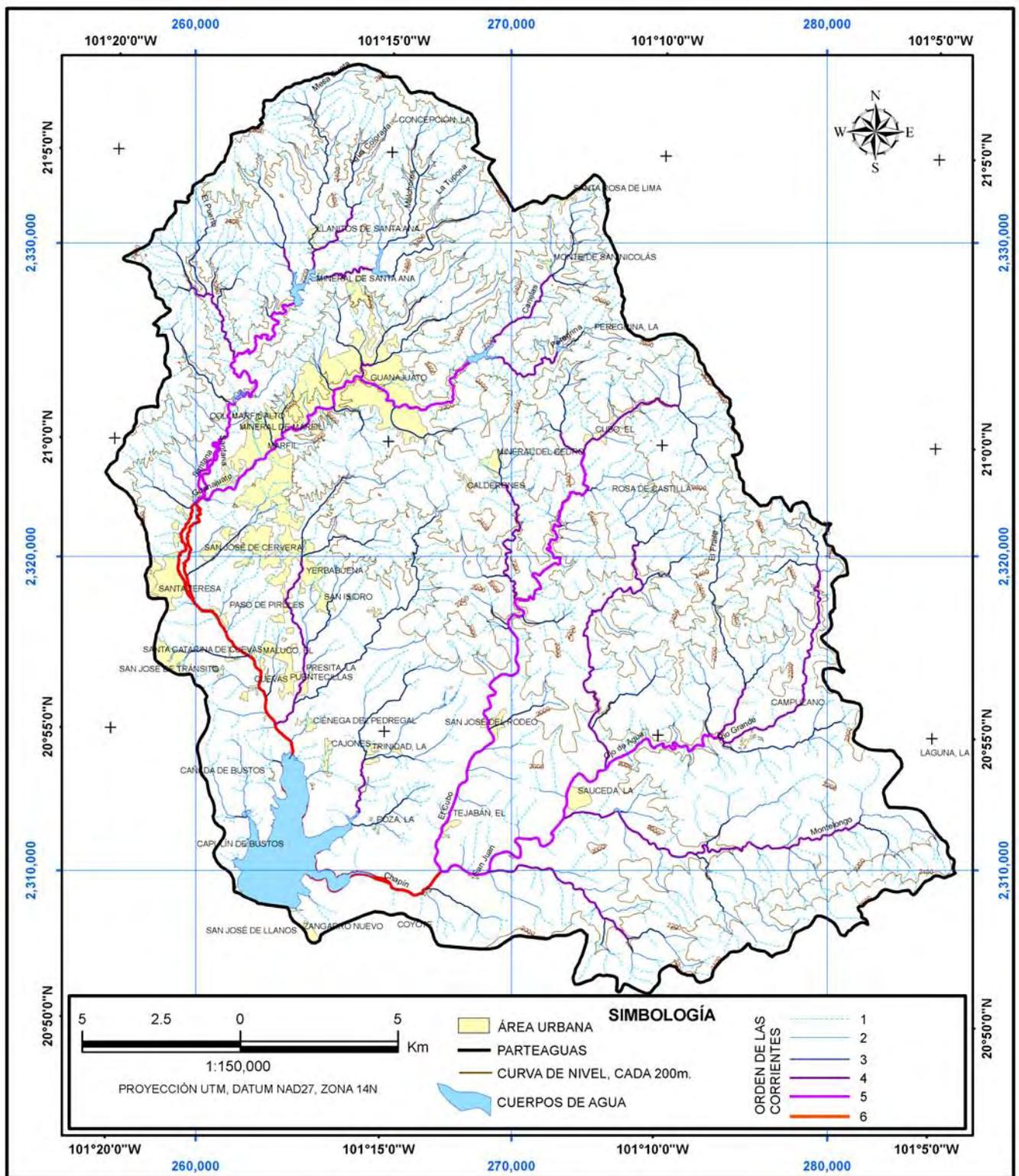


Figura 5.1. Mapa de la red hidrográfica y del orden de las corrientes.

5.2. ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD Y ALEATORIEDAD DE LOS REGISTROS DE LLUVIA

Una vez ordenada la información de lluvia (Figuras 5.3 y 5.4) y extraídos los datos de máximos mensuales y anuales, se procedió a evaluarlos mediante las pruebas de homogeneidad y aleatoriedad. Para que los resultados sean consistentes se utilizaron las estaciones que tienen más de 10 años de registro. Se encontró que las estaciones meteorológicas con clave 11089 y 11063, presentaron las mayores inconsistencias. Las estaciones 11147, 11130, 11135, 11166 y 11168 tienen menos de 10 años de registro. En el anexo B, aparece un listado de las pruebas estadísticas aplicadas a la información de las estaciones meteorológicas, y de sus resultados.

Tabla 5.3. Ejemplo de información arreglada por año para la estación 11166. Se listan los máximos mensuales en la parte baja.

año_1996_estación_m_166

ENERO					FEBRERO					MARZO					ABRIL					MAYO					JUNIO					
mes	tamb	tmax	tmin	precip	mes	tamb	tmax	tmin	precip	mes	tamb	tmax	tmin	precip	mes	tamb	tmax	tmin	precip	mes	tamb	tmax	tmin	precip	mes	tamb	tmax	tmin	precip	
1	1	11	20	4	0	1	10	25	9	0	1	11	27	10	0	1	15	29	12	0	1	14	31	12	0	1	17	30	16	0
2	2	9	22	4	0	2	9	24	7	0	2	11	28	10	0	2	12	29.5	8	0	2	13	36	12	0	2	17	30	16	0
3	3	8	20	5	0	3	7	27	6	0	3	16	29	10	0	3	13	24	12	0	3	16	25	14	0	3	16	28	15	0
4	4	8	24	5	0	4	11	25	7	0	4	12	29	10	0	4	16	30	11	0	4	17	29	15	0	4	17	29	15	0
5	5	7	24	4	0	5	9	20	3	0	5	13	29	12	0	5	13	29	12	0	5	14	32	13	0	5	18	32	16	0
6	6	9	25	4	0	6	5	25	4	0	6	15	28	10	0	6	16	25	11	0	6	16	28	15	0	6	18	32	16	0
7	7	12	24	4.5	0	7	6	25	5	0	7	15	28	11	0	7	13.5	26	12.5	0	7	17	31	14	0.6	7	20	32	18	0
8	8	6	20	3.5	0	8	7	26	6.5	0	8	10	27	7	0	8	17	26.5	12	0	8	16	32	11	2	8	16	28	15	20
9	9	5	25	4	0	9	9.5	25	7	0	9	6	24	5	0	9	17	28	9.5	0	9	17	32	16	0	9	15	27	14	11
10	10	7	25.5	4	0	10	9	26	8	0	10	7	23	5	0	10	13	29	10	0	10	16	34	12	0	10	15	26.5	14	28
11	11	10	26.5	5.5	0	11	10	25	8	0	11	8	24	7	0	11	12	30	11	0	11	19	33	17	0	11	22	26	17	0
12	12	9	24	7	0	12	12.5	13	10	0	12	10	27	7	0	12	15	30	12	0	12	18	31	16	0	12	24	29	16.5	4
13	13	5	25.5	2.5	0	13	8	25	7.5	0	13	10	26	9	0	13	14	29.5	13	0	13	17	32	15	0	13	16	28	15	5.9
14	14	10	25.5	3	0	14	10	27	7	0	14	13	28	9	0	14	13.5	29.5	12	0	14	17	33	14	0	14	23	29	16	0
15	15	10	27.5	1.5	0	15	12.5	27	11	0	15	11	28	9	0	15	13	29.5	11.5	0	15	18	32	14	0	15	19	29	14	0
16	16	7	26	5	0	16	13	27	10	0	16	14	29	10	0	16	11	29	10	0	16	16	31	13	0	16	19	30	15	1.5
17	17	7	25.5	5.5	0	17	18	26	12	0	17	15	22	9	0	17	15	28	12	0	17	17	31	14	0	17	19	27	16	18.5
18	18	11	20.5	7	0	18	9	27	8	0	18	11	28	9	0	18	13.5	30	12.5	0	18	16	33	13	0.7	18	17	28	16	1.5
19	19	10	26	8	0	19	13	28.5	7	0	19	12	26	12	0	19	14	30	13	0	19	18	32	13	6.3	19	17	29	16	0
20	20	11	25	6.5	0	20	9	29	8	0	20	10	24	8	0	20	15	31	14	0	20	17	33	16	0	20	16	28.5	15	0
21	21	10	26	7	0	21	10.5	29.5	8	0	21	11	27	8	0	21	14	30	12	0	21	23	34	18	0	21	17	26.5	16	1
22	22	9	26	7	0	22	10	29	10	0	22	14	26	10	0	22	15	31	12	0	22	19	31	17	0	22	17	27	16	0
23	23	7	27	6.5	0	23	11	29	10	0	23	13	28	9	0	23	17	29	12	0	23	22	32	19	0	23	20	30	16	1.5
24	24	9	27	6.5	0	24	12	29	11	0	24	15	27	9	0	24	14	28	13	0	24	22	30	20	0	24	23	31	15	8.5
25	25	9	27	7.5	0	25	13	28	12	0	25	13	29	10	0.5	25	16	24	14	0	25	19	31	18	0	25	20	31	15	0
26	26	6	26	6	0	26	12	29	10	0	26	14	22	11	0	26	13	33	12	0	26	21	29.5	18	0	26	19	28	18	10.5
27	27	11	25	6	0	27	12	27	11	0	27	13	27	11	0	27	16	31	13.5	0	27	19	30	18	0	27	19	29	16	0
28	28	11	26	7	0	28	11	27	11	0	28	13	21	11	0	28	18	29	13	0	28	18	29.5	17	0	28	19	27	14	0
29	29	8.5	28	7.5	0	29	11	27	10	0	29	13.5	27	11	0	29	16	29	15	0	29	20	28	19	0	29	16	27	15	12.5
30	30	9	27	8	0						30	15	29	12	0	30	15	29	14	0	30	20	28.5	19	0	30	15	27	14	0.6
31	31	8.5	27	7.5	0						31	16	29	12	0						31	19	29.5	18	16.5					
MAX-MIN			28	1.5	0.0			29.5	3	0.0			29	5	0.5			33	8	0.0			36	11	16.5			32	14	28.0

El análisis de homogeneidad y aleatoriedad, aplicado a la información de las estaciones meteorológicas ayudó a definir la información no consistente, por lo que en la Tabla 5.5 se listan las estaciones meteorológicas válidas para el cálculo de las curvas intensidad-duración-periodo de retorno ($I-D-Tr$) y altura de lluvia-duración-periodo de retorno ($Hp-D-Tr$), ya que son las que tienen valores óptimos de aleatoriedad y homogeneidad (Anexo C), además aparecen con un registro de datos mayor a 10 años. A partir de definir las estaciones meteorológicas usadas en el análisis espacial de las tormentas, se construyeron los polígonos de Thiessen, de forma que la

Figura 5.2 ilustra su trazo, esto permite conocer el área de influencia de cada una de las estaciones. En línea negra gruesa, aparecen los polígonos de Thiessen que interaccionan con la cuenca, el resto son áreas de las estaciones que rodean al área de estudio.

Tabla 5.4. Ejemplo del resumen mensual y anual para la estación 11004, los valores máximos anuales aparecen en la parte derecha.

ESTACION_M_004																												
MAYO			JUNIO			JULIO			AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			NOVIEMBRE			DICIEMBRE			TOTAL ANUAL	AÑO			
tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci	tmax	tmin	preci		
39.5	9.5	0.0	39.0	14.0	23.0	39.0	13.0	24.0	33.0	14.0	22.0	31.5	14.0	10.5	32.0	7.0	4.0	32.0	6.0	0.0	31.0	0.0	0.0					
		0.00			35.90			25.30			72.00			54.50			4.00			0.00			0.00	191.70	98			
35.0	11.0	10.0	38.0	11.0	20.0	35.5	12.0	22.0	37.5	12.5	0.0	35.0	10.0	0.0	35.0	4.0	0.0	36.0	0.0	0.0	19.5	0.0	0.0					
		50.00			116.50			183.00			0.00			0.00			0.00			0.00			0.00	349.50	95			
30.5	14.0	0.0	35.5	13.0	10.0	35.5	11.0	18.0	30.5	9.5	0.0	25.0	12.0	10.0	27.5	6.5	5.0	28.5	5.0	0.0	25.5	1.0	0.0					
		0.00			70.00			92.50			0.00			48.50			9.50			0.00			0.00	220.50	93			
30.0	9.0	10.4	32.0	11.0	13.6	32.0	12.5	37.0	27.0	10.5	24.2	27.0	10.0	29.9	30.5	5.0	29.7	29.0	1.5	11.6	26.0	1.5	0.0					
		45.30			28.30			168.80			97.20			132.80			76.30			25.20			0.00	701.80	92			
34.5	11.5	9.4	34.5	12.0	38.2	28.5	13.0	68.1	28.5	12.0	16.9	29.5	12.0	5.5	29.0	6.5	0.0	26.5	3.0	0.0	26.0	3.0	0.0					
		17.70			126.00			355.40			64.70			20.80			0.00			0.00			0.00	588.80	91			
0.0	0.0	0.0	33.0	13.0	21.7	34.5	12.5	31.3	27.0	11.0	52.5	27.0	11.0	29.0	26.5	7.0	38.4	27.0	4.0	9.0	26.0	0.0	0.0					
		0.00			45.00			162.50			216.40			121.50			112.10			9.00			0.00	666.50	90			
37.0	11.0	0.0	40.0	13.0	0.0	40.0	13.0	0.0	30.5	11.5	31.4	28.5	5.0	18.3	33.0	3.5	0.0	29.0	5.0	0.0	26.5	0.0	0.0					
		0.00			0.00			0.00			142.30			55.40			0.00			0.00			0.00	197.70	89			
36.0	12.5	25.6	0.0	0.0	0.0	28.5	9.5	25.4	28.0	10.0	45.2	30.0	8.5	30.9	27.5	6.5	0.0	33.0	5.0	0.0	30.0	5.0	0.0					
		74.70			0.00			147.80			216.50			57.90			0.00			0.00			0.00	541.70	88			
32.5	14.0	15.0	34.0	12.0	19.2	30.0	8.5	0.0	28.5	14.0	26.0	29.0	10.0	60.5	28.0	4.5	0.0	27.0	3.5	0.0	26.5	3.0	0.0					
		19.50			48.70			0.00			57.00			113.30			0.00			0.00			0.00	244.50	87			
34.5	10.5	7.0	30.0	12.0	30.5	28.5	12.5	32.0	27.5	12.0	20.0	28.0	12.5	41.3	27.5	4.0	20.1	26.0	4.0	8.0	0.0	0.0	0.0					
		7.00			152.30			65.50			65.80			132.50			45.30			8.00			0.00	476.60	86			

Tabla 5.5. Listado de estaciones meteorológicas utilizadas para el diseño de tormentas sintéticas (Figura 5.2).

ORDEN POR MUNIC.	NUM_EST	NOMBRE DE LA ESTACION	MUNICIPIO DONDE SE UBICA	LOCALIZACION						BASECLI															
				LATITUD (N_E)			LONGITUD (W_M_G)			ELEV. (msnm)	AÑO DE REGISTRO														
				grad.	min.	seg.	grad.	min.	seg.		INICIO	FINAL													
1	85	DOS ARROYOS	SAN MIGUEL DE ALLENDE	20	50	0	101	3	0	2160	72	98													
10	137	PRESA LA PURISIMA	GUANAJUATO	20	52	0	101	17	0	1800	77	99													
11	124	EL CHAPIN	GUANAJUATO	20	52	11	101	14	12	1850	77	99													
12	121	EL PINILLO	GUANAJUATO	20	55	12	101	7	52	2020	76	98													
13	7	CALDERONES	GUANAJUATO	20	59	22	101	13	39	2372	49	98													
14	94	GUANAJUATO	GUANAJUATO	21	0	43	101	15	54	1999	69	99													
15	103	VALENCIANA	GUANAJUATO	21	2	31	101	15	15	1995	73	99													
17	73	SANTA ROSA	GUANAJUATO	21	4	5	101	12	40	2571	62	88													

5.3. CONSTRUCCIÓN DE TORMENTAS SINTÉTICAS

A partir de los datos de lluvia máxima en 24 horas de cada una de las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas, se obtuvieron las funciones de mejor ajuste y de los valores calculados para la altura de lluvia máxima en 24 horas con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, mismos que se listan en la Tabla 5.6.

Una vez definida la curva I-D-Tr y Hp-D-Tr, mediante la selección de la función de mejor ajuste, se construyó el hidrograma del escurrimiento directo. Para ello se aplicó la información morfométrica de la cuenca y de las características físicas del suelo (Tabla 5.7).

El escurrimiento pico, está relacionado directamente con la intensidad de la lluvia y con las características morfométricas de la cuenca, de forma que la intensidad de la tormenta disminuye si su duración aumenta, esto significa que una lluvia de duración larga no necesariamente genera el escurrimiento pico más alto (Martínez, 1996). De tal forma que el tiempo de retraso y del tiempo de concentración, calculados, dan una idea del comportamiento de la cuenca ante la tormenta de diseño.

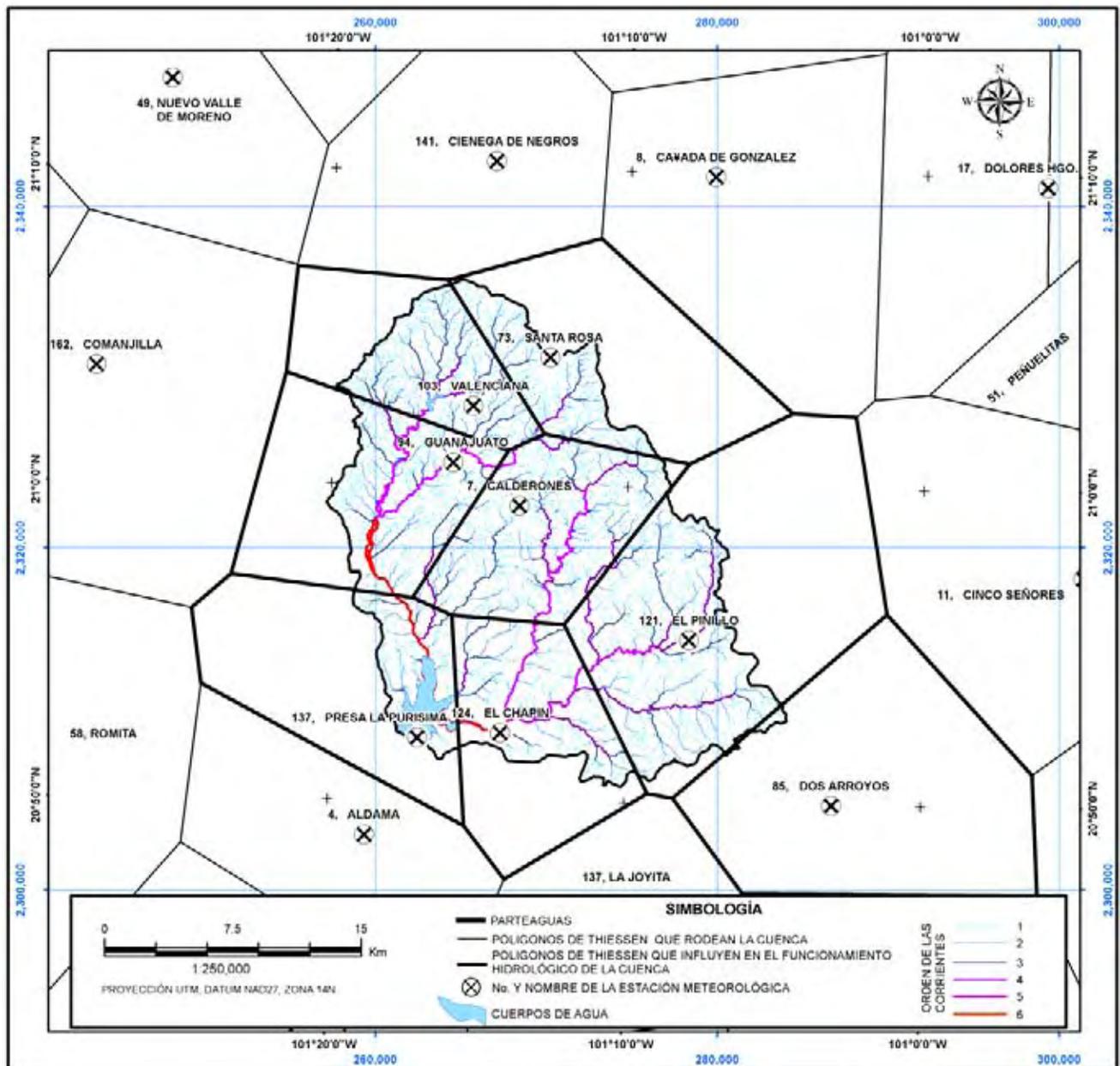


Figura 5.2. Polígonos de Thiessen, localizados al interior y en las cercanías de la cuenca del río Guanajuato.

$$t_r = 2.4 \text{ hr.}$$

$$t_c = 4.0015189 \text{ hr.} = 4 \text{ hr.}$$

Tabla 5.6. Estaciones meteorológicas en las que se indica la función de mejor ajuste y el valor de H_p ($d= 24$ hr), en mm, calculado para el Tr indicado.

		No. DE ESTACION METEOROLÓGICA													
Función aplicada		4	7	8	11	17	33	41	44	49	51	58	61	67	73
		Normal	Gumbel	Gumbel	Normal	Gumbel	Gumbel	Normal	Gamma 2p	Gamma 2p	Gamma 2p	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel 2p
Tr (años)	2	50.05	53	58.43	55.74	44.65	45.01	56.08	50.19	51.9	48.82	55.54	51.06	42.09	59.38
	5	60.94	70	77.57	66.83	60.39	58.48	66.92	63.62	62.74	61.2	68.34	64.38	58.42	87.93
	10	66.63	81.26	90.24	72.63	70.81	67.39	72.59	71.51	68.97	68.44	76.81	73.2	69.22	113.29
	20	71.34	92.06	102.39	77.42	80.81	75.94	77.28	78.49	74.41	74.83	84.94	81.65	79.59	128.54
	50	76.63	106.03	118.13	82.81	93.75	87.01	82.55	86.88	80.87	82.49	95.46	92.6	93.01	146.83
	100	80.15	116.51	129.91	86.4	103.45	95.3	86.06	92.79	85.37	87.87	103.35	100.81	103.07	158.28

		No. DE ESTACION METEOROLÓGICA												
Función aplicada		85	94	103	121	124	134	136	137	140	141	153	162	164
		Gumbel	Gamma 2p	Gumbel 2p	Gamma 2p	Pearson III p	Gamma 2p	Gamma 2p	Normal	Pearson III p	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gamma 2p
Tr (años)	2	39.90	59.65	66.15	48.2	49.63	52.43	55.00	50.09	58.98	54.04	44.29	45.97	56.80
	5	92.65	76.43	92.41	58.7	63.4	66.69	68.88	62.05	81.18	63.67	60.29	62.60	75.69
	10	132.55	86.35	110.80	64.76	71.83	75.08	76.99	68.30	94.64	70.05	70.88	73.62	87.05
	20	172.45	95.16	124.43	70.07	79.48	82.51	84.15	73.47	106.78	76.17	81.04	84.18	97.26
	50	225.20	105.76	141.15	76.38	88.85	91.45	92.72	79.28	121.60	84.09	94.19	97.85	109.65
	100	265.10	113.25	153.93	80.78	95.57	97.75	98.75	83.16	132.17	90.02	104.05	108.10	118.47

Se ha escogido una cantidad de 12 intervalos, en que se subdivide la duración total de la tormenta. Cada intervalo es de 20 minutos: $n = 12$ y $\Delta t = 20$ min.

Tabla 5.7. Resumen de la altura sintética, I-d-Tr y H_p -d-Tr, con un periodo de retorno de quince años, para las estaciones meteorológicas seleccionadas.

		ESTACION METEOROLOGICA							
		CALDERONES	SANTA ROSA	DOS ARROYOS	GUANAJUATO	VALENCIANA	EL PINILLO	EL CHAPÍN	P. LA PURÍSIMA
		7	73	85	94	103	121	124	137
variables	a	33.50	33.50	33.50	33.50	33.50	33.50	33.50	33.50
	b	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50	14.50
	c	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835
	R	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527
	$H_p^{10}_1$	42.82	59.71	69.85	45.51	58.39	34.13	37.85	35.99
	$H_p^{10}_{24}$	81.26	113.29	132.55	86.35	110.80	64.76	71.83	68.30
	$H_p^{100}_{24}$	116.51	158.28	265.10	113.25	153.93	80.78	95.57	83.16
	$F = \frac{H_p^{100}_{24}}{H_p^{10}_{24}}$	1.43	1.40	2.00	1.31	1.39	1.25	1.33	1.22
	I =	$\frac{1543.09}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{2141.18}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{2752.02}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1607.81}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{2090.39}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1193.69}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1341.66}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1252.37}{(d + 14.50)^{0.835}}$
	Hp =	$\frac{1543.09 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{2141.18 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{2752.02 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1607.81 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{2090.39 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1193.69 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1341.66 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$	$\frac{1252.37 d}{(d + 14.50)^{0.835}}$

Por su superficie, la cuenca es pequeña, por lo que se aplica que $d_e = t_c$. Cada hietograma, de las estaciones meteorológicas, está acomodado conforme al criterio de construcción del hidrograma en bloque, para cada uno de los intervalos de tiempo considerados de duración de la

tormenta. Además, se aplica el factor de corrección relativo al tamaño de la cuenca (Tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16).

De la información de las tormentas de diseño, calculados para cada una de las estaciones meteorológicas, aparecen listados los resultados de las tormenta de diseño, mostrado en las tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16, así como en las figuras de hietogramas 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11, se obtiene que las estaciones localizadas al norte de la cuenca, como son la 103-Valenciana y la 76-Santa Rosa, la altura máxima que puede alcanzar la tormenta de diseño es de 29.4 y 28.9 mm, respectivamente.

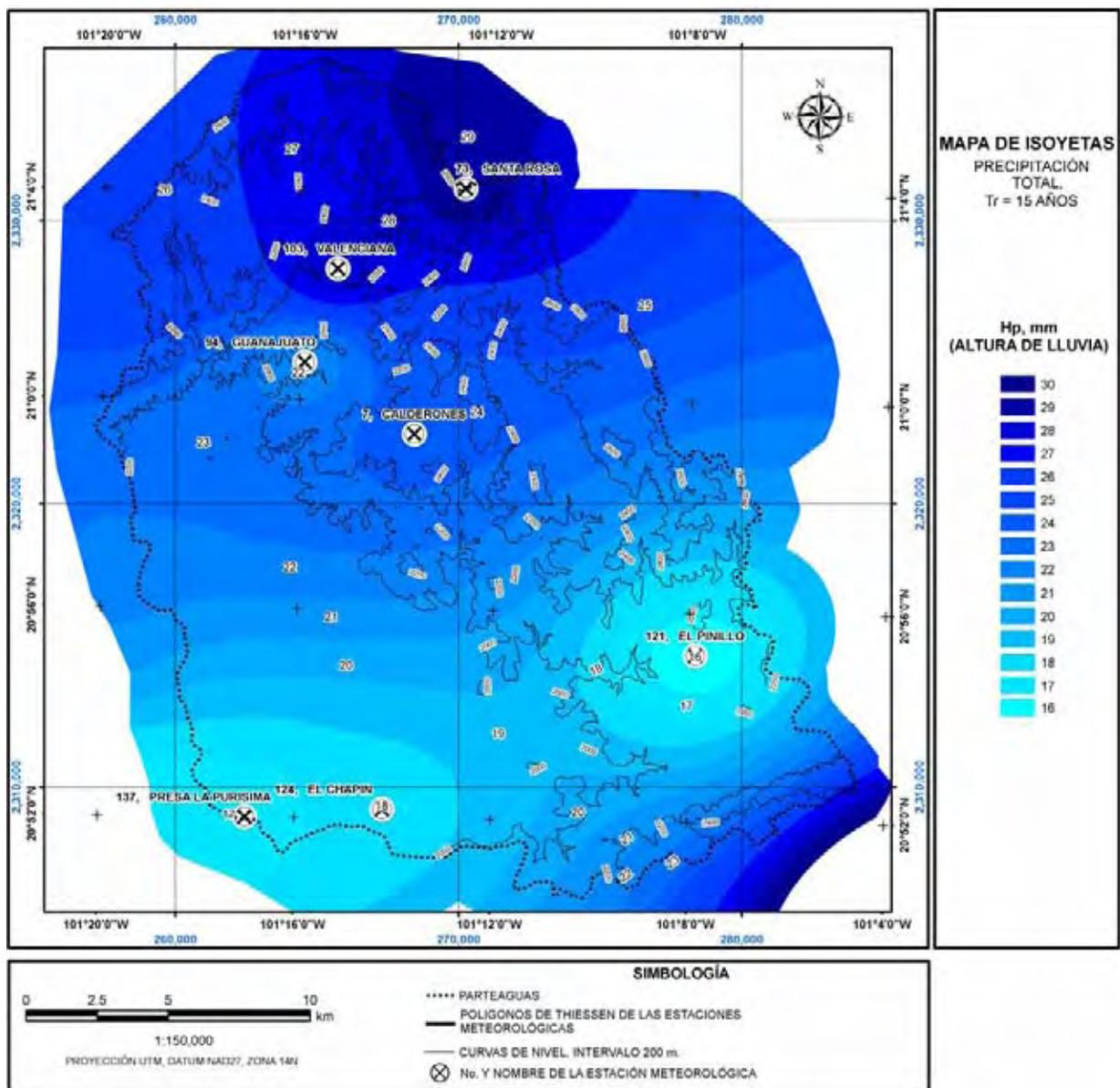


Figura 5.3. Isoyetas de altura de lluvia total, en la cuenca del río Guanajuato.

Al centro, están ubicadas las estaciones: 94-Guanajuato y 7-Calderones, que presentan como altura máxima de lluvia 22.15 y 21.25 mm, respectivamente (Figura 5.11). Al sur de la cuenca, las estaciones denominadas: 137-Presa de la Purísima, 124-El Chapín, 121-El Pinillo y 85-Dos Arroyos, tienen una altura de lluvia máxima de 17.2, 18.48, 16.44, 37.91 mm, respectivamente.

En la Figura 5.3 destaca que las alturas de lluvia máxima, y de intensidad, se alcanzan sobre las áreas localizadas en porciones de lomeríos altos y laderas de montaña, en dirección norte, noreste y sureste de la cuenca. Sobre estos sitios, la vegetación que predomina es el bosque, seguido de matorral y chaparral. Los valores de intensidad explican, incluso la forma en que se generan la energía erosiva de la lluvia, siendo más baja en la porción sur-suroeste de la cuenca, sobre la ubicación del graben La Saucedá.

El factor de reducción de altura de lluvia, se indica en cada uno de los hietogramas calculados, correspondientes a las estaciones meteorológicas, representados en valores de porcentaje en las Tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16.

Los parámetros obtenidos de los mapas de uso del suelo y cobertura vegetal del año 2003 y de edafología ayudaron a calcular los valores de la curva N, K y el factor S_f . Además se obtuvieron los valores de la saturación residual del suelo, la porosidad efectiva y la porosidad total (θ_r , θ_e , η); variables que se ingresan al modelo de filtración con el fin de calcular las retenciones al interior de las unidades edáficas de la cuenca.

Los resultados de la Tabla 5.8, sirven para calcular los valores de infiltración acumulada y por intervalo de tiempo, al aplicar la ecuación de Green-Ampt y con ello resolver la cantidad de lluvia en exceso.

Tabla 5.8. Resumen de porosidad, permeabilidad, saturación residual del suelo, la porosidad efectiva y la porosidad total calculados con base a la textura del suelo.

No. de estación	N media	K, cm/hr	% de arena	% de arcilla	% de limo	η	ψ_{cm}	θ_r	θ_e
7	78.9	0.16991	27.15	39.00	33.85	0.5023604920	23.572898828	0.11298486	0.389375632
73	45.1	1.37513	57.94	19.88	22.18	0.3535076894	38.635843074	0.08980525	0.263702439
85	27.6	2.43514	68.00	14.00	18.00	0.3028424490	46.431115697	0.08134230	0.221500149
94	77.0	0.18521	49.25	27.61	23.14	0.3824696620	36.605402227	0.09965861	0.282811052
103	62.1	0.71009	56.29	20.51	23.20	0.3461729355	41.101044163	0.09023550	0.255937436
121	58.8	0.83918	59.46	18.51	22.03	0.3286271468	43.449116785	0.08755978	0.241067367
124	70.2	0.39322	57.44	18.50	24.06	0.3230500300	46.618721977	0.08647533	0.236574700
137	58.9	0.83527	53.93	21.54	24.53	0.3643938190	38.683031295	0.09136215	0.273031669

Tabla 5.8 Continuación.

No. de estación	S_f , cm	M_d	θ_i	S_e
7	4.73471402	0.20085413	0.301506362	0.484163585
73	6.33258000	0.16390428	0.189603409	0.378449891
85	5.89568500	0.12697703	0.175865419	0.426740657
94	5.16108400	0.14099241	0.241477252	0.501460749
103	7.34841700	0.17878906	0.167383876	0.301434510
121	7.07111400	0.16274471	0.165882437	0.324899458
124	6.68696600	0.14343950	0.179610530	0.393681996
137	7.07875400	0.18299378	0.181400039	0.329770863

En las Tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16, se listan las tasas de infiltración por intervalo de tiempo para cada área de influencia de las estaciones meteorológicas. Además aparece el hietograma de altura de lluvia total junto al de altura de lluvia en exceso (Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11).

Tabla 5.9. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 7.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
0 - 0.33	26.6	79.9	21.25	21.25	0.91	0	2.73	3.21	28.51	0
0.33 - 0.66	36.37	79.9	29.06	7.81	1.07	1.98	4.14	21.47	4.07	0
0.66 - 1.0	42.18	79.9	33.7	4.64	1.38	3.36	5.91	16.46	5.45	0
1.0 - 1.33	46.08	79.9	36.82	3.12	1.97	5.33	9.36	12.54	7.42	0
1.33 - 1.66	49.05	79.9	39.19	2.37	3.12	8.45	23.43	9.33	10.54	0
1.66 - 2.0	51.52	79.9	41.16	1.97	7.81	16.26	63.75	7.72	13.35	2.91
2.0 - 2.33	53.51	79.9	42.75	1.59	21.25	37.51	13.92	6.80	15.76	18.84
2.33 - 2.66	55.23	79.9	44.13	1.38	4.64	42.15	7.11	6.19	17.92	2.48
2.66 - 3.0	56.79	79.9	45.38	1.25	2.37	44.52	4.77	5.74	19.91	0.39
3.0 - 3.33	58.13	79.9	46.45	1.07	1.59	46.11	3.75	5.44	21.50	0
3.33 - 3.66	59.35	79.9	47.42	0.97	1.25	47.36	2.91	5.24	22.75	0
3.66 - 4.0	60.49	79.9	48.33	0.91	0.97	48.33	5.09	23.72	0	

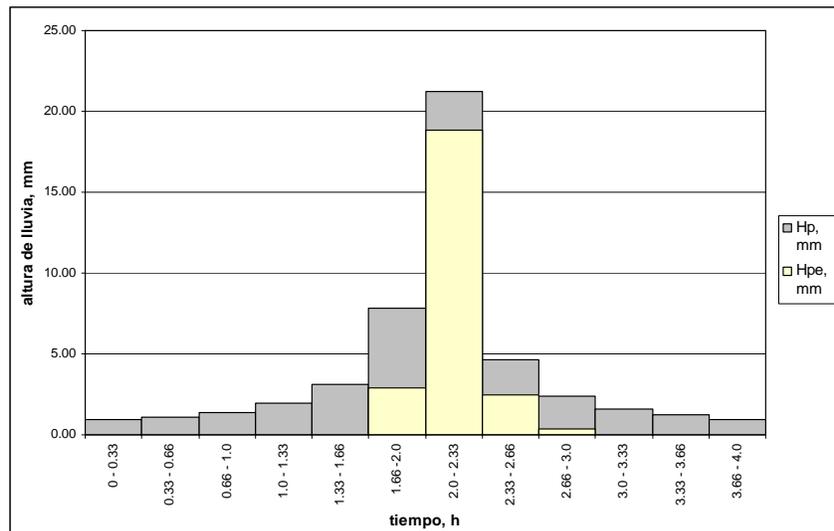


Figura 5.4. Histograma de lluvia total y lluvia en exceso de la estación meteorológica 7.

Tabla 5.10. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 73.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
							0	3.81		0
0 - 0.33	36.91	79.9	29.49	29.49	1.27	1.27	4.50	97.74	3	0
0.33 - 0.66	50.46	79.9	40.32	10.83	1.50	2.77	5.73	66.63	4.50	0
0.66 - 1.0	58.53	79.9	46.77	6.45	1.91	4.68	8.16	48.10	6.41	0
1.0 - 1.33	63.94	79.9	51.09	4.32	2.72	7.40	12.96	35.08	9.13	0
1.33 - 1.66	68.07	79.9	54.39	3.3	4.32	11.72	32.49	25.24	13.45	0
1.66 - 2.0	71.48	79.9	57.11	2.72	10.83	22.55	88.47	18.11	20.45	2.10
2.0 - 2.33	74.25	79.9	59.33	2.22	29.49	52.04	19.35	15.21	25.95	23.99
2.33 - 2.66	76.64	79.9	61.24	1.91	6.45	58.49	9.90	13.53	30.72	1.68
2.66 - 3.0	78.8	79.9	62.96	1.72	3.30	61.79	6.66	12.65	34.02	0
3.0 - 3.33	80.67	79.9	64.46	1.5	2.22	64.01	5.16	12.15	36.24	0
3.33 - 3.66	82.35	79.9	65.8	1.34	1.72	65.73	4.02	11.80	37.96	0
3.66 - 4.0	83.94	79.9	67.07	1.27	1.34	67.07		11.54	39.30	0

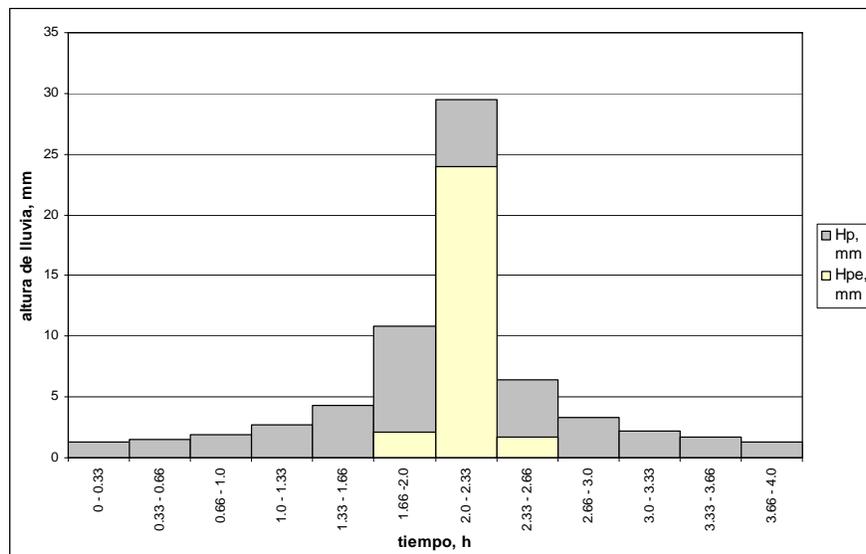


Figura 5.5. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 73.

Tabla 5.11. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 85.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
							0.00	4.89		0
0 - 0.33	47.45	79.9	37.91	37.91	1.63	1.63	5.76	120.40	3	0
0.33 - 0.66	64.86	79.9	51.82	13.91	1.92	3.55	7.35	75.69	4.92	0
0.66 - 1.0	75.23	79.9	60.11	8.29	2.45	6.00	10.53	52.47	7.37	0
1.0 - 1.33	82.18	79.9	65.66	5.55	3.51	9.51	16.65	37.42	10.88	0
1.33 - 1.66	87.48	79.9	69.9	4.24	5.55	15.06	41.73	26.75	16.43	0
1.66 - 2.0	91.88	79.9	73.41	3.51	13.91	28.97	113.73	20.12	24.05	4.92
2.0 - 2.33	95.44	79.9	76.26	2.85	37.91	66.88	24.87	17.20	30.22	31.74
2.33 - 2.66	98.51	79.9	78.71	2.45	8.29	75.17	12.72	15.47	35.65	2.87
2.66 - 3.0	101.28	79.9	80.92	2.21	4.24	79.41	8.55	14.45	39.89	0
3.0 - 3.33	103.68	79.9	82.84	1.92	2.85	82.26	6.63	13.87	42.74	0
3.33 - 3.66	105.85	79.9	84.57	1.73	2.21	84.47	5.19	13.48	44.95	0
3.66 - 4.0	107.89	79.9	86.2	1.63	1.73	86.20		13.19	46.68	0

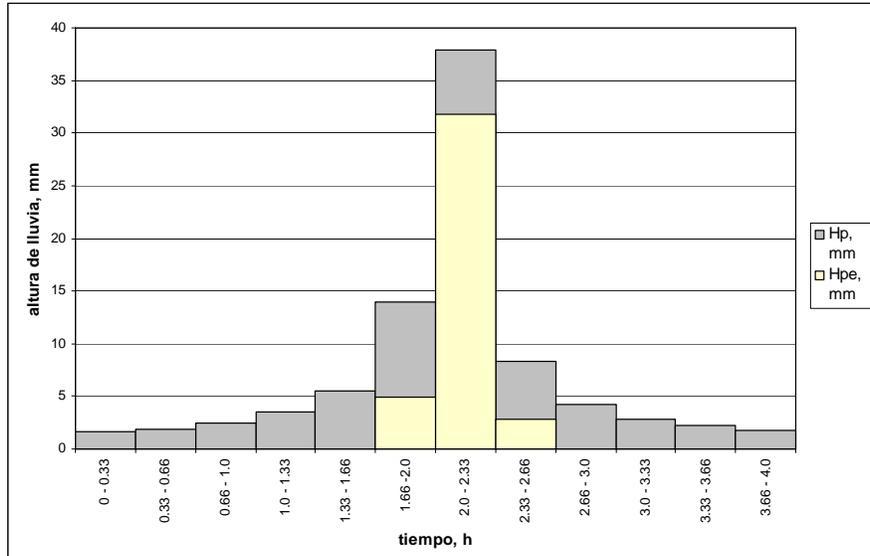


Figura 5.6. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 85.

Tabla 5.12. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 94.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
0 - 0.33	27.72	79.9	22.15	22.15	0.95	0	2.85	33.71	0	0
0.33 - 0.66	37.89	79.9	30.27	8.12	1.12	2.07	4.29	25.05	4.12	0
0.66 - 1.0	43.95	79.9	35.12	4.85	1.43	3.50	6.15	19.08	5.55	0
1.0 - 1.33	48.01	79.9	38.36	3.24	2.05	5.55	9.72	14.43	7.60	0
1.33 - 1.66	51.11	79.9	40.84	2.48	3.24	8.79	24.36	10.67	10.84	0
1.66 - 2.0	53.68	79.9	42.89	2.05	8.12	16.91	66.45	8.67	14.02	2.89
2.0 - 2.33	55.76	79.9	44.55	1.66	22.15	39.06	14.55	7.57	16.71	19.46
2.33 - 2.66	57.55	79.9	45.98	1.43	4.85	43.91	7.44	6.85	19.11	2.45
2.66 - 3.0	59.17	79.9	47.28	1.3	2.48	46.39	4.98	6.34	21.31	0.29
3.0 - 3.33	60.57	79.9	48.4	1.12	1.66	48.05	3.90	6.01	22.97	0
3.33 - 3.66	61.84	79.9	49.41	1.01	1.30	49.35	3.03	5.79	24.27	0
3.66 - 4.0	63.03	79.9	50.36	0.95	1.01	50.36		5.63	25.28	0

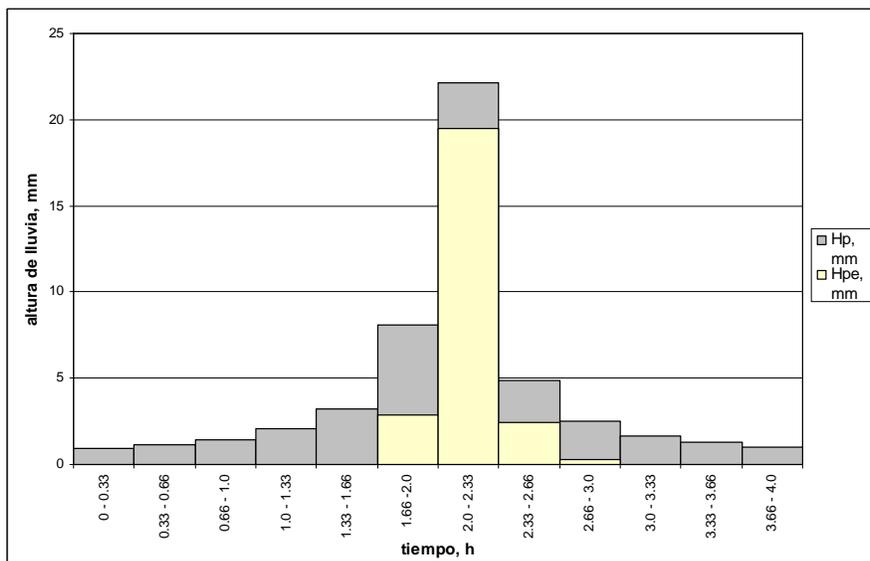


Figura 5.7. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 94.

Tabla 5.13. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 103.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
0 - 0.33	36.04	79.9	28.8	28.8	1.24	0	3.72	181.04	0	0
0.33 - 0.66	49.27	79.9	39.37	10.57	1.45	2.69	5.58	124.36	4.45	0
0.66 - 1.0	57.14	79.9	45.65	6.28	1.86	4.55	8.01	89.80	6.31	0
1.0 - 1.33	62.43	79.9	49.88	4.23	2.67	7.22	12.69	65.21	8.98	0
1.33 - 1.66	66.45	79.9	53.09	3.21	4.23	11.45	31.71	46.60	13.21	0
1.66 - 2.0	69.79	79.9	55.76	2.67	10.57	22.02	86.4	29.04	23.78	0
2.0 - 2.33	72.49	79.9	57.92	2.16	28.8	50.82	18.84	23.23	32.36	18.46
2.33 - 2.66	74.82	79.9	59.78	1.86	6.28	57.1	9.63	20.61	38.64	0
2.66 - 3.0	76.93	79.9	61.47	1.69	3.21	60.31	6.48	19.57	41.85	0
3.0 - 3.33	78.75	79.9	62.92	1.45	2.16	62.47	5.07	18.96	44.01	0
3.33 - 3.66	80.4	79.9	64.24	1.32	1.69	64.16	3.96	18.52	45.70	0
3.66 - 4.0	81.95	79.9	65.48	1.24	1.32	65.48	18.20	47.02	0	0

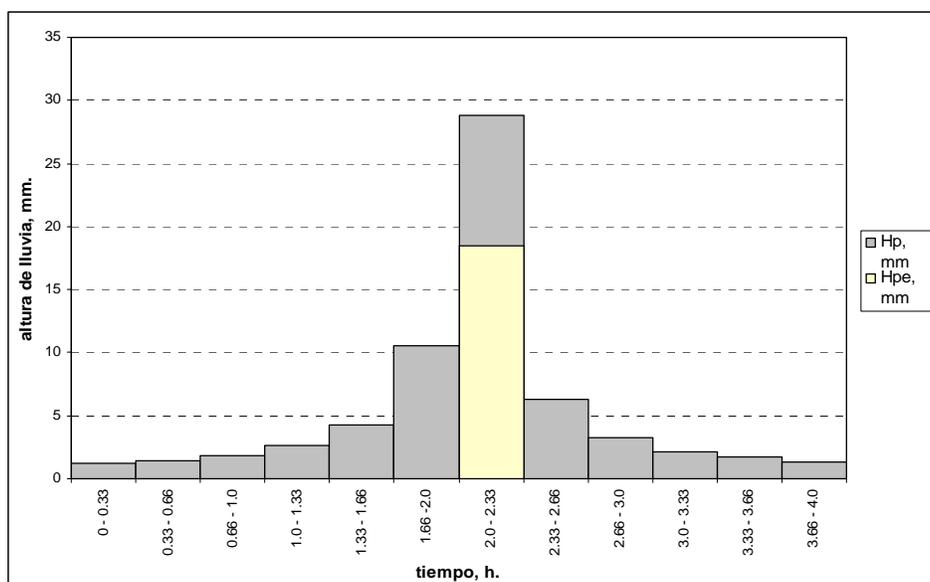


Figura 5.8. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 103.

Tabla 5.14. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 121.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
0 - 0.33	20.58	79.9	16.44	16.44	0.71	0	2.13	81.52	0	0
0.33 - 0.66	28.13	79.9	22.48	6.04	0.83	1.54	3.18	64.57	3.83	0
0.66 - 1.0	32.63	79.9	26.07	3.59	1.06	2.6	4.56	51.29	4.89	0
1.0 - 1.33	35.65	79.9	28.48	2.41	1.52	4.12	7.23	39.92	6.41	0
1.33 - 1.66	37.95	79.9	30.32	1.84	2.41	6.53	18.12	29.92	8.82	0
1.66 - 2.0	39.85	79.9	31.84	1.52	6.04	12.57	49.32	19.10	14.86	0
2.0 - 2.33	41.4	79.9	33.08	1.24	16.44	29.01	10.77	14.81	20.41	8.60
2.33 - 2.66	42.73	79.9	34.14	1.06	3.59	32.6	5.52	13.09	24.00	0
2.66 - 3.0	43.93	79.9	35.1	0.96	1.84	34.44	3.72	12.40	25.84	0
3.0 - 3.33	44.97	79.9	35.93	0.83	1.24	35.68	2.88	11.98	27.08	0
3.33 - 3.66	45.91	79.9	36.68	0.75	0.96	36.64	2.25	11.68	28.04	0
3.66 - 4.0	46.8	79.9	37.39	0.71	0.75	37.39	11.47	28.79	0	0

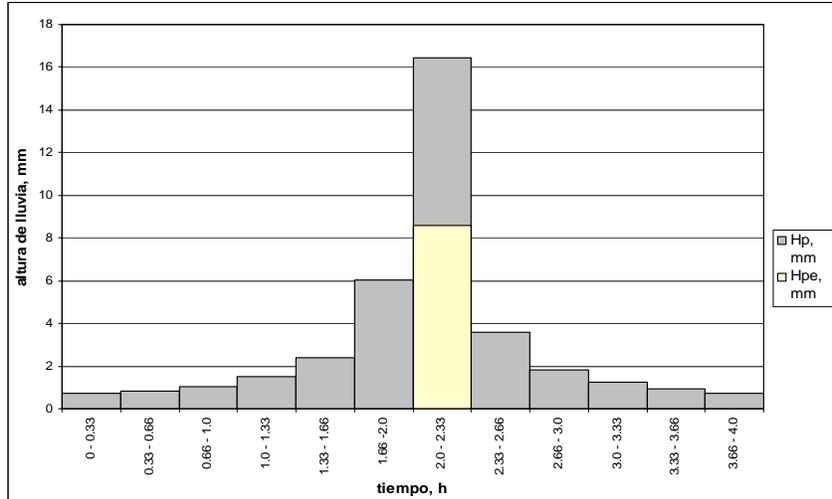


Figura 5.9. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 121.

Tabla 5.15. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 124.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
0 - 0.33	23.13	79.9	18.48	18.48	0.80	0	2.4	55.89	0	0
0.33 - 0.66	31.62	79.9	25.26	6.78	0.94	0.80	1.74	43.13	3	0
0.66 - 1.0	36.68	79.9	29.31	4.05	1.19	2.93	5.13	33.68	5.13	0
1.0 - 1.33	40.07	79.9	32.02	2.71	1.71	4.64	8.13	25.86	6.84	0
1.33 - 1.66	42.65	79.9	34.08	2.06	2.71	7.35	20.34	19.20	9.55	0
1.66 - 2.0	44.79	79.9	35.79	1.71	6.78	14.13	55.44	13.27	14.76	0
2.0 - 2.33	46.53	79.9	37.18	1.39	18.48	32.61	12.15	10.96	18.76	13.85
2.33 - 2.66	48.02	79.9	38.37	1.19	4.05	36.66	6.18	9.64	22.17	0.63
2.66 - 3.0	49.38	79.9	39.45	1.08	2.06	38.72	4.17	9.02	24.23	0
3.0 - 3.33	50.55	79.9	40.39	0.94	1.39	40.11	3.24	8.66	25.62	0
3.33 - 3.66	51.6	79.9	41.23	0.84	1.08	41.19	2.52	8.41	26.70	0
3.66 - 4.0	52.6	79.9	42.03	0.8	0.84	42.03	8.23	27.54	0	0

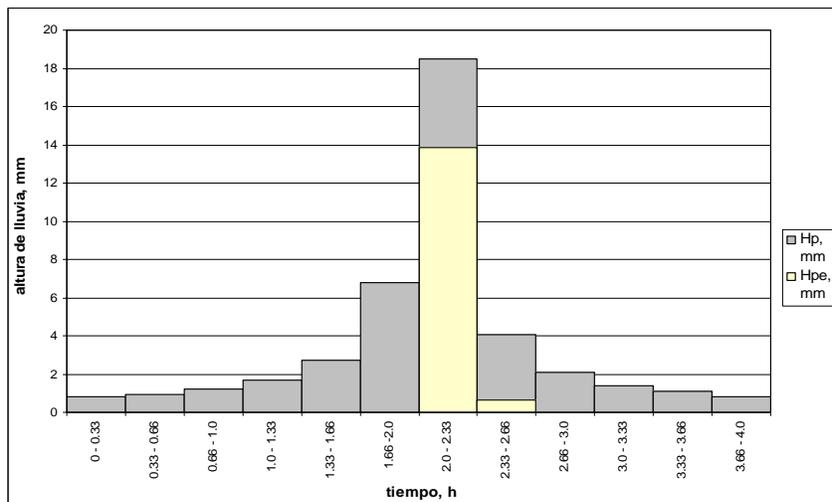


Figura 5.10. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 124.

Tabla 5.16. Lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 137.

Intervalos de tiempo, h	Hp acumulada, mm	Factor de corrección %	Hp acumulada corregida, mm	Hp incremental, mm	Hp, mm	Hp acumulada, mm	I por intervalo de tiempo, mm/h	f(t)	F(t)	Hpe, mm
							0	2.22	0	0
0 - 0.33	21.59	79.9	17.25	17.25	0.74	0.74	2.61	81.40	3.00	0
0.33 - 0.66	29.52	79.9	23.59	6.34	0.87	1.61	3.36	63.85	3.87	0
0.66 - 1.0	34.24	79.9	27.36	3.77	1.12	2.73	4.8	50.26	4.99	0
1.0 - 1.33	37.4	79.9	29.88	2.52	1.6	4.33	7.56	38.86	6.59	0
1.33 - 1.66	39.81	79.9	31.81	1.93	2.52	6.85	19.02	29.03	9.11	0
1.66 - 2.0	41.81	79.9	33.41	1.6	6.34	13.19	51.75	18.47	15.45	0
2.0 - 2.33	43.43	79.9	34.7	1.29	17.25	30.44	11.31	14.54	20.86	9.58
2.33 - 2.66	44.83	79.9	35.82	1.12	3.77	34.21	5.79	12.82	24.63	0
2.66 - 3.0	46.09	79.9	36.83	1.01	1.93	36.14	3.87	12.13	26.56	0
3.0 - 3.33	47.18	79.9	37.7	0.87	1.29	37.43	3.03	11.72	27.85	0
3.33 - 3.66	48.17	79.9	38.49	0.79	1.01	38.44	2.37	11.43	28.86	0
3.66 - 4.0	49.1	79.9	39.23	0.74	0.79	39.23		11.21	29.65	0

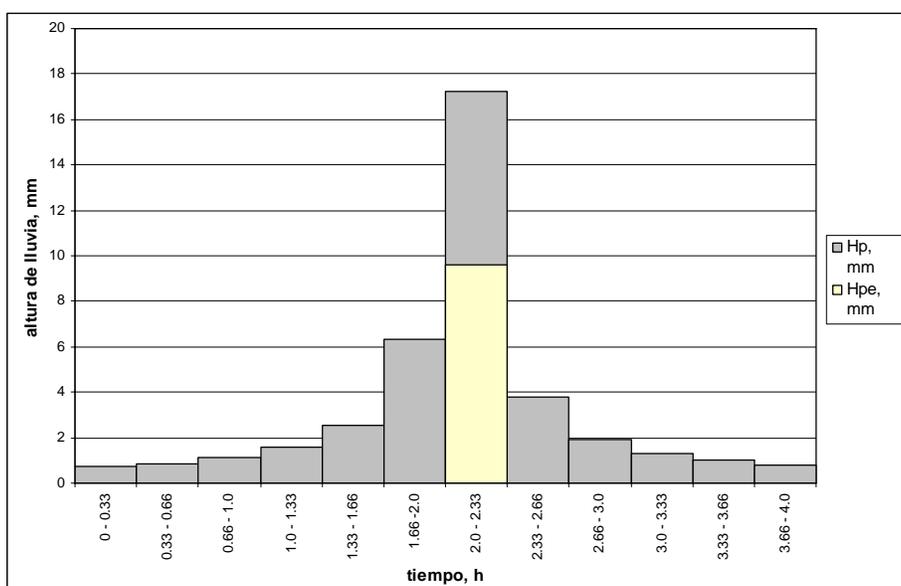


Figura 5.11. Histograma de lluvia total y en exceso de la estación meteorológica 137.

Además, las Tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16, así como las Figuras de los hietogramas 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12, indican que las estaciones localizadas al norte de la cuenca denominadas como 103-Valenciana y 73-Santa Rosa, la altura de lluvia total reducida a lluvia efectiva llegó al orden del 28.2 y 41.4 %, respectivamente (Tabla 5.17). En el centro, están ubicadas las estaciones 94-Guanajuato y 7-Calderones, que presentan una reducción de la altura de lluvia total a efectiva de 49.8 y 50.9%, respectivamente (Figura 5.12 y Tabla 5.17). Al sur de la cuenca, las estaciones denominadas 137-Presa La Purísima, 124-El Chapín, 121-El Pinillo y 85-Dos Arroyos (fuera de la cuenca), presentan una reducción de la lluvia total a lluvia efectiva en un 24.4, 34.5, 34.5 y 45.8%, respectivamente. Lo que significa que sólo este porcentaje de la lluvia total calculada es el que se transforma en escurrimiento.

Tabla 5.17. Resumen de la relación entre lluvia total y efectiva

No. DE EST. METEOROL ÓGICA	Hp (mm)	Hpe (mm)	Hpe/Hp (%)
7	48.33	24.60	50.9
73	67.07	27.76	41.4
85	86.2	39.52	45.8
94	50.36	25.07	49.8
103	65.48	18.46	28.2
121	37.39	8.6	23.0
124	42.03	14.48	34.5
137	39.23	9.57	24.4

Hp = altura de precipitación total

Hpe = altura de precipitación efectiva

Las alturas de lluvia efectiva (Hpe), presentan una superficie de cobertura, como lo indica la Figura 5.12. Esta cobertura sólo es referencia con base a la altura de lluvia promedio en la cuenca, por lo que los valores de 19, 18 mm (en la parte norte de la ciudad de Guanajuato, sobre la localidad de Valenciana, Santana y La Luz, y en las laderas bajas de la Sierra de Guanajuato) y 13 mm (en el graben La Saucedá), son los que abarcan mayor área con respecto al total de la cuenca, con un acumulado de 43.6%. La Figura 5.12 ilustra que ocurre una correspondencia entre la altitud del relieve, el tipo de uso del suelo y la cobertura vegetal, ya que en las partes altas aparecen las cantidades de lluvia con mayor valor. En la Tabla 5.18 se lista la superficie que cubren las isoyetas de lluvia efectiva en la cuenca, y la curva de 19 mm, es la de mayor cobertura.

Tabla 5.18. Superficie que cubren las alturas de lluvia efectiva en la cuenca.

Hpe, mm	Área, m ²	Área, %
8	3836225.522	0.782
9	13334848.399	2.718
10	15826150.233	3.226
11	17865282.790	3.640
12	24667164.621	5.028
13	66043670.738	13.460
14	39725138.067	8.097
15	32773304.340	6.680
16	29618407.363	6.037
17	39091981.072	7.967
18	70935582.926	14.458
19	77801699.911	15.857
20	34092436.662	6.949
21	9553303.408	1.947
22	8948710.922	1.824
23	6529786.702	1.330
Total	490,643,693.676	100

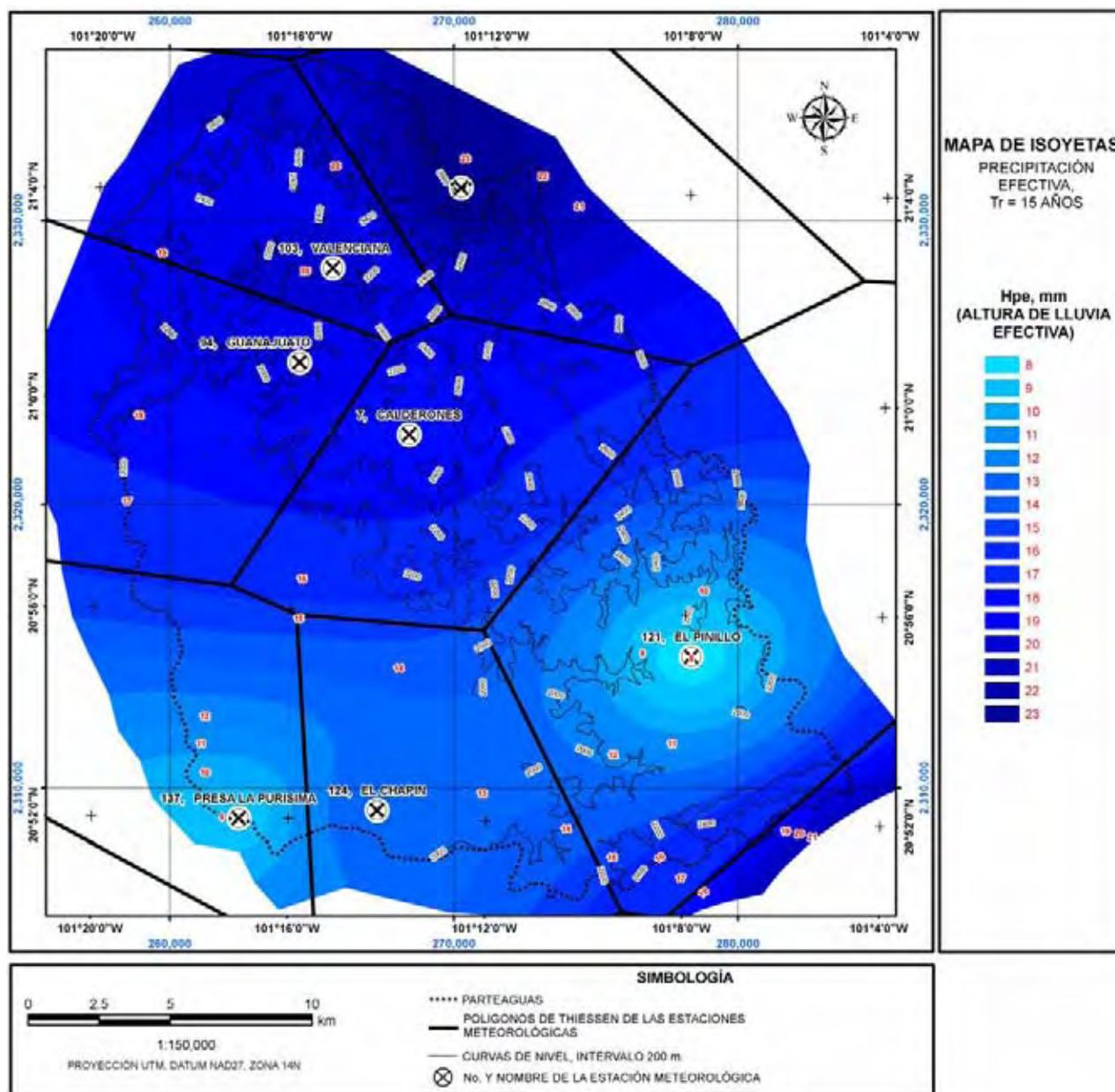


Figura 5.12. Isoyetas de altura de lluvia efectiva, en la cuenca del río Guanajuato.

La altura de lluvia efectiva refleja el volumen de escurrimiento que se genera la cuenca, una vez que se relaciona con las áreas de influencia del terreno. En este caso, en la cuenca del río Guanajuato, aparecen los valores de precipitación efectiva más elevados en la porción centro-norte. En estas áreas, la cobertura vegetal está definida por bosques de encinos, pastizales (naturales e inducidos), matorrales y escasas áreas de agricultura; aunque los pastizales son los que ocupan la mayor superficie de esta porción de la cuenca. Sobre estos terrenos, el grado de inclinación de la pendiente es de moderada a fuerte y su longitud de ladera es de media a larga.

Cabe indicar que en esta porción centro-norte, los escurrimientos quedan regulados por la presencia de seis presas de agua y varias más de jales. Las presas que retienen agua son La Esperanza en la porción noreste y La Soledad al noroeste y contiene la cuenca de La Esperanza, la presa de Mata y Peregrina ambas al este, y al centro la de San Renovato y la de La Olla. De forma que estos cuerpos de agua influyen de manera importante en la respuesta hidrológica de la cuenca, toda vez que éstos retienen el mayor volumen de escurrimiento incluyendo los sedimentos que acarrear. Las presas de jales son otra forma de retener parcialmente el agua que fluye superficialmente, se pueden encontrar estos retenes en las cercanías de las minas de Cata, Rayas, El Cubo, Las Torres y Calderones.

Cada Hidrograma Unitario Instantáneo (HUI) calculado por área de influencia de las estaciones meteorológicas, aparece en la Tabla 5.19. Las Tablas 5.20, 5.21 y 5.22, agrupan los resultados obtenidos para el Hidrograma Unitario Sintético, calculados por el método de Chow, Triangular y Adimensional del SCS, respectivamente. Para ello se aplicó: $t_p = 4.4$ h., $t_b = 11.7$ h., $N = 28$.

De los valores de las Tablas 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22, indican que los gastos generados en las diferentes porciones de la cuenca varían con respecto a la altura de precipitación efectiva. De forma que en la estación 7 (Calderones), ubicada al centro de la cuenca y en la 94 (Guanajuato), localizada al centro-oriente, es donde se generan los escurrimientos con valores más altos (gastos del orden de los $100 \text{ m}^3/\text{s}$).

La relación entre lluvia total-lluvia efectiva arrojó que las áreas ubicadas en la porción norte-noreste de la cuenca presentan los porcentajes más bajos de retención de la lluvia, que transformados a escurrimiento muestran las áreas que tienen una interacción directa con volúmenes importantes de agua superficial. Estos escurrimientos grandes, se generan tanto por efecto de la litología como por el tipo de uso del suelo y cobertura vegetal, ya que los materiales son rocas de tipo riolitas, tobas riolíticas, dacitas y conglomerados, principalmente, y la cobertura vegetal es forestal, de matorrales y pastizales. El uso del suelo en las laderas altas es de agricultura de temporal y pastizales inducidos. El tiempo de respuesta del terreno se ve afectada por el grado de inclinación y de longitud de la ladera, ya que sobre estas unidades de relieve las pendientes van de inclinadas a escarpadas y de longitud mediana a larga.

Tabla 5.19. Resumen de los gastos calculados para la precipitación efectiva, por el método del Hidrograma Unitario Instantáneo, dentro del área de influencia de la estación meteorológica.

Intervalo de tiempo, h	NÚMERO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA															
	07		73		85		94		103		121		124		137	
	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s
0 - 0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.33 - 0.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.66 - 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0 - 1.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.33 - 1.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.66 - 2.0	2.91	2.9	2.1	2.1	4.9	4.9	2.9	2.9	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0 - 2.33	18.84	24.7	24.0	28.1	31.7	41.5	19.4	25.2	18.5	18.5	8.6	8.6	13.8	13.8	9.6	9.6
2.33 - 2.66	2.48	48.9	1.7	55.8	2.8	80.9	2.4	49.9	0	0	0	0	0.6	28.2	0	0
2.66 - 3.0	0.39	73.5	0.0	75.1	0	100.7	0.3	74.9	0	0	0	0	0	1.2	0	0
3.0 - 3.33	0	83.6	0.0	5.1	0	8.4	0	85.4	0	0	0	0	0	0	0	0
3.33 - 3.66	0	11.1	0	0	0	0	0	10.5	0	0	0	0	0	0	0	0
3.66 - 4.0	0	0.4	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.20. Resumen de los gastos calculados para la precipitación efectiva, mediante el Hidrograma Unitario Sintético, método de Chow.

Intervalo de tiempo, h	NÚMERO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA															
	07		73		85		94		103		121		124		137	
	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s
0 - 0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.33 - 0.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.66 - 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0 - 1.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.33 - 1.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.66 - 2.0	2.91	16.6	2.1	4.6	4.9	0.5	2.9	11.3	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0 - 2.33	18.84	107.4	24.0	52.8	31.7	3.2	19.4	75.7	18.5	59.2	8.6	54.2	13.8	52.4	9.6	19.2
2.33 - 2.66	2.48	14.1	1.7	3.7	2.8	0.3	2.4	9.4	0	0	0	0	0.6	1.2	0	0
2.66 - 3.0	0.39	2.2	0	0	0	0	0.3	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0 - 3.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.33 - 3.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.66 - 4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.21. Resumen de los gastos calculados, mediante el Hidrograma Unitario Sintético, método Triangular.

Intervalo de tiempo, h	NÚMERO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA															
	07		73		85		94		103		121		124		137	
	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s
0 - 0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.33 - 0.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.66 - 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0 - 1.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.33 - 1.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.66 - 2.0	2.91	14.2	2.1	4.0	4.9	0.5	2.9	9.6	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0 - 2.33	18.84	92.3	24.0	45.6	31.7	3.2	19.4	64.0	18.5	50.0	8.6	46.4	13.8	44.2	9.6	16.3
2.33 - 2.66	2.48	12.2	1.7	3.2	2.8	0.3	2.4	7.9	0	0	0	0	0.6	1.0	0	0
2.66 - 3.0	0.39	1.9	0	0	0	0	0.3	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0 - 3.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.33 - 3.66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.66 - 4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.22. Resumen de los gastos calculados para la precipitación efectiva, mediante el Hidrograma Unitario Sintético, método del SCS.

No.	Δt	NÚMERO DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA															
		07		73		85		94		103		121		124		137	
		Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s	Hpe, mm	Q, m3/s
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
6	1.66	2.91	0.00	2.10	0.00	4.90	0.00	2.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	2.00	18.84	0.20	24.00	0.06	31.70	0.00	19.40	0.15	18.50	0.00	8.60	0.00	13.80	0.00	9.60	
8	2.33	2.48	2.36	1.68	1.01	2.80	0.05	2.40	1.70	0.00	0.74	0.00	0.69	0.60	0.69	0.00	
9	2.66	0.39	9.18	0.00	4.04	0.00	0.42	0.30	6.51	0.00	3.70	0.00	3.53	0.00	3.34	0.00	
10	3.00	0.00	19.30	0.00	8.55	0.00	0.81	0.00	13.57	0.00	7.96	0.00	7.40	0.00	7.18	0.00	
11	3.33	0.00	33.24	0.00	14.95	0.00	1.20	0.00	23.31	0.00	14.06	0.00	12.99	0.00	12.73	0.00	
12	3.66	0.00	50.70	0.00	22.96	0.00	1.65	0.00	35.66	0.00	21.46	0.00	19.95	0.00	19.58	0.00	
13	4.00		70.50		31.80		2.41		49.46		29.97		27.86		27.32		
14	4.33		89.90		40.50		3.15		62.98		38.48		35.78		35.10		
15	4.66		104.20		46.88		3.57		73.01		44.40		41.37		40.81		
16	5.00		113.70		51.00		3.90		79.50		48.50		45.10		44.50		
17	5.33		117.20		52.60		3.90		81.90		50.00		46.40		46.00		
18	5.66		115.00		51.50		3.90		80.40		49.00		45.50		45.30		
19	6.00		108.50		48.50		3.50		75.80		45.90		42.70		42.50		
20	6.33		99.10		44.30		3.20		69.20		42.00		39.00		38.90		
21	6.66		88.70		39.60		3.10		62.00		37.60		34.80		34.70		
22	7.00		78.00		34.60		2.70		54.40		32.90		30.60		30.60		
23	7.33		65.80		29.20		2.30		45.90		27.90		26.00		26.00		
24	7.66		50.40		22.30		1.60		35.10		20.90		19.50		19.60		
25	8.00		38.40		17.00		1.20		26.70		15.90		14.90		14.90		
26	8.33		28.80		12.80		0.80		20.00		12.00		11.20		11.20		
27	8.66		21.50		9.50		0.70		14.90		9.10		8.30		8.50		
28	9.00		6.10		1.50		0.20		4.00		0.00		0.00		0.70		
	9.33		3.30		0.70		0.10		2.10		0.00		0.00		0.30		
			1.90		0.50		0.00		1.20		0.00		0.00		0.20		
			1.30		0.30		0.00		0.90		0.00		0.00		0.10		

Cabe resaltar que para obtener la solución del Método del Hidrograma Unitario Sintético del SCS, se usaron las ecuaciones de convolución, ya que calculan el escurrimiento para cada intervalo de tiempo en el que se divide la tormenta (Tabla 5.22).

5.4. CÁLCULO DE LA EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

De las tormentas de diseño, se obtuvo el valor de intensidad de la lluvia, misma que explica cómo es que se comporta la erosividad de la tormenta en el espacio de la cuenca (Figura 5.13). El valor más bajo de energía cinética de la lluvia es de 281.5 Jm^{-2} , en la estación meteorológica 121 (El Pinillo) al SE de la cuenca, mientras que el valor máximo es de 766.2 Jm^{-2} , en la estación 85 (Dos Arroyos), en el extremo SE del parteaguas. La superficie que cubre cada valor de energía cinética en la cuenca se resume en la Tabla 5.23. El 24.0% de la superficie de la cuenca recibe la energía cinética con valores entre 600 y 700 Jm^{-2} (Figura 5.13), y son los valores más altos de erosividad en la cuenca.

El terreno que recibe las cantidades de energía más altas de la intensidad de la lluvia, se ubica en las porciones centro-norte de la cuenca, con relieve de tipo lomeríos medios y altos, además de las laderas de montaña. Las rocas dominantes son de material volcánico y sedimentario muy antiguas. El material volcánico es de tipo riolitas, dacitas, tobas, esquistos pizarras. El uso del suelo y la cobertura vegetal, en estas unidades, son principalmente de matorrales, pastizal, bosque y agricultura.

Tabla 5.23. Superficie que ocupan la erosividad al interior de la cuenca.

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA, Jm^{-2}	SUPERFICIE, m^2	SUPERFICIE, %
350	8,171,047.70	1.7
400	61,286,814.50	12.5
450	104,500,475.15	21.3
500	120,977,889.43	24.7
550	77,720,005.81	15.8
600	34,485,556.42	7.0
650	49,649,557.48	10.1
700	33,852,347.24	6.9
TOTAL	490,643,693.75	100.0

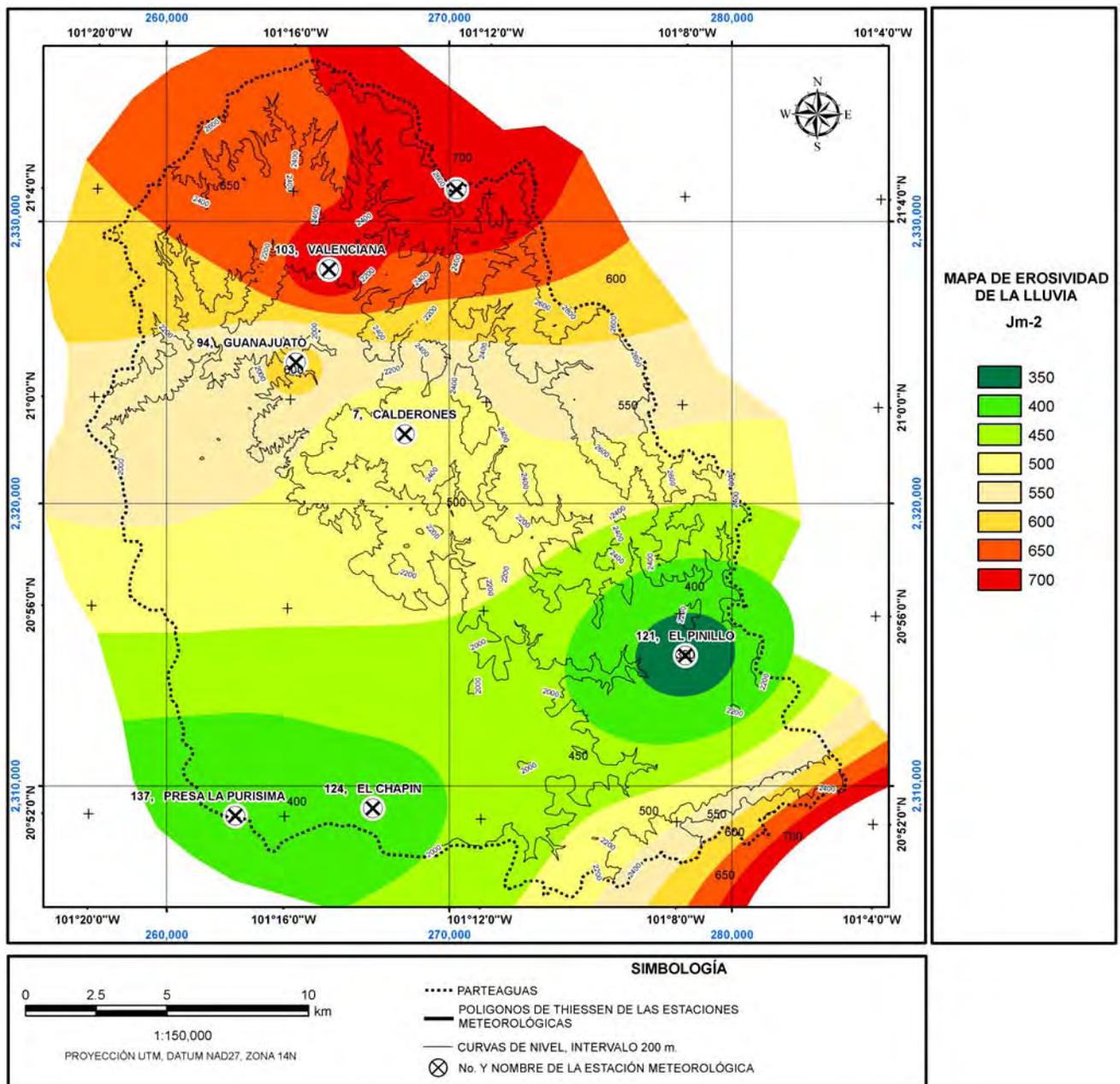


Figura 5.13. Mapa de erosividad de la lluvia.

6. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DEL USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL, DE LA CARTA A ESCALA 1:50,000 DE 1977 Y POR FOTOINTERPRETACIÓN DE ORTOFOTOS A ESCALA 1:20,000, PARA LOS AÑOS DE 1993 Y 2003

6.1 RESULTADOS

En el año de 1977, la extensión de terrenos dedicados a la agricultura, ocupaba mayormente la porción suroeste de la cuenca, desde la elevación 1,800 msnm hasta la cota 2,100 msnm, sobre planicies aluviales y fluviales, lomeríos bajos y medios, y de forma limitada en algunos lomeríos bajos localizados sobre el graben La Saucedá que tienen una elevación desde los 2,200 msnm hasta los 2,400 msnm, y algunas porciones aisladas al norte sobre las ranherías Mineral de Santana, Llanitos de Santa Ana, Agua Colorada y La Concepción, que van de la cota 2,400 msnm hasta la 2,550 msnm (Figura 6.4). Para la fecha de 1993, la cobertura de agricultura se extendió por toda la porción sur de la cuenca, limitada en gran medida por las rupturas de pendiente y la litología. Dentro del graben La Saucedá, los pastizales y matorrales que rodeaban a las áreas de cultivo, disminuyeron su extensión para 1993 a comparación de la superficie que ocupaban en 1977. Estos cambios se deben a que fueron transformados como terrenos de cultivo; situación que ocurrió en los lomeríos bajos y medios (Figura 6.5). En 2003 las áreas transformadas a uso de suelo a agricultura fueron mínimas, a comparación del intervalo ocurrido entre 1977 y 1993; es decir, no hay crecimiento espacial importante, excepto en la porción noreste, en el bosque de encino (Fig. 6.6). Estas áreas son deforestadas para usar la leña y de paso se han ocupado los terrenos con agricultura de temporal.

Se compararon las áreas que abarcaba este tipo de uso del suelo entre los años de 1977 y 1993, por lo que se encontró una diferencia, que mostraba un incremento del 19.76% (Tabla 6.1), mientras que la comparación entre fechas de 1993 y 2003, presenta una disminución del 10.2% (Tabla 6.1). Para esta segunda comparación, el tipo de cambio considerado como una disminución, se debe a que los asentamientos humanos ejercen una presión fuerte que eliminan estos terrenos dedicados a la agricultura. En esta evaluación se destaca el crecimiento de las localidades de Puenteillas, Marfil, Las Teresas, La Saucedá, Valenciana y Santa Teresa. Este crecimiento de la mancha urbana afecta incluso a los terrenos dedicados a cultivos de riego, que

se ubican sobre las terrazas fluviales localizadas en la parte sudoccidental de la cuenca, cercanas a las localidades de Santa Teresa, Cuevas y Yerbabuena.

Para el año 1977, los asentamientos humanos presentan una distribución y cobertura, en forma de tres núcleos poblacionales importantes, como son la ciudad de Guanajuato, la localidad de Marfil y Santa Teresa, ubicadas al centro y al oeste de la cuenca. Las rancherías, como La Saucedá, Cajones, Los Cedros y Campuzano mostraban una dispersión en la distribución de sus caseríos. La localidad La Saucedá es sitio de paso en la carretera federal libre Guanajuato-Juventino Rosas, el resto forman parte de viviendas aledañas a las minas de El Cubo, Peregrina, Valenciana, Cata y Mineral de Santana (Figura 6.4). En el año de 1993, se destacan, por su extensión, a cuatro núcleos importantes, en primer lugar, la ciudad de Guanajuato, que se le ha unido espacialmente, en conurbación la localidad de Marfil; segundo, la localidad de La Yerbabuena, que para este año contiene la nueva central camionera y oficinas de gobierno federal y estatal, tales como la Procuraduría General de Justicia, Policía Federal Preventiva, la Secretaría de Educación del Estado, el Hospital General y la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato; en tercer lugar, la localidad de Santa Teresa, no contiene ningún tipo de oficina de gobierno ó empresa, pero es paso de la carretera libre Guanajuato-Silao-Irapuato, y su actividad es de servicios; cuarta posición: la localidad de la Saucedá, que se convierte en un punto de paso importante en la carretera libre Guanajuato-Juventino Rosas por su actividad de servicios.

La disposición espacial de estos núcleos habitacionales se muestra en la Figura 6.5, y se debe resaltar que este crecimiento espacial ocurre en el área centro y sur de la cuenca. Las rancherías como El Cubo, Peregrina, entre otras, muestran poco crecimiento de superficie. En el año de 2003, el crecimiento paulatino de la superficie urbana crea una conurbación entre la ciudad de Guanajuato y las localidades de Marfil, Valenciana, La Yerbabuena, Cúpulas y Las Teresas. En la Figura 6.6, se observa que la distribución espacial de los asentamientos humanos, se localiza en un corredor que toca las carreteras federales libres Guanajuato-Juventino Rosas y Guanajuato-Silao-Irapuato, sobre la porción centro-sur de la cuenca; es decir, la tendencia de los desarrollos habitacionales es cubrir los lomeríos bajos y las planicies aluviales, ya que la dotación de servicios como la de agua potable y el drenaje es menos costoso, pues tener desarrollos en laderas inclinadas y cimas de lomeríos provoca un encarecimiento en los costos, que tiene que cubrir el gobierno municipal. Las localidades

cercanas de minas, como Campuzano, Peregrina, El Cubo, muestran un crecimiento más acelerado en comparación del lapso 1977-1993.

El pastizal natural, definido como la vegetación de tipo rastrera, ocurre un solo estrato herbáceo, donde dominan las gramíneas. Presenta una altura de 5 a 70 cm. Las especies dominantes encontradas son: *Bouteloa gracilis*; *Muhlenbergia rígida*; *Lycurus phleoides* y *Bouteloa radicata* (INEGI, 1998e; INEGI, 2005). Para 1977, al interior de la cuenca se muestra una distribución preferente en dirección NW-SE, sobre los lomeríos medios y altos y laderas de montaña bajas y medias (Figura 6.4). En el mapa de 1993, esta clase sufre la presión que ejerce el crecimiento de la mancha urbana y la agricultura. Presión que se ubica principalmente en la porción central, sobre los límites de la ciudad de Guanajuato, incluso en los lomeríos bajos y medios que forman el graben La Saucedá (Figura 6.5). Para el año 2003, los campos de cultivo y la urbanización (Puentecillas, Cebada, Los Cedros, Yerbabuena) eliminan muchos de los pastizales en la porción sur, sobre todo los localizados sobre las planicies aluviales que forman parte de los lomeríos bajos y medios. Quedando con una extensión importante en la porción centro y noroeste de la cuenca. Las superficies, y su relación de superficies por intervalos de tiempo quedan resumidas en la Tabla 6.1, y la Figura 6.7 y 6.8 muestran las relaciones espaciales, de los cambios que ha sufrido la cuenca.

El pastizal inducido, queda definido en el momento en que es eliminada la vegetación original, ya sea por acciones como desmonte de cualquier otra especie, por incendios naturales o provocados, y por la invasión de plantas rastreras a los campos agrícolas abandonados (INEGI, 2005). Para el año de 1977, no se presenta este tipo de vegetación, ya que el INEGI no lo destaca en su cartografía temática. En el año de 1993, algunos de los campos de cultivos abandonados en la parte centro-occidente muestran esta vegetación tal como se observa en la Figura 6.7 y 6.8, cubriendo áreas destinadas a la vegetación de tipo matorral. Para el año de 2003, este tipo de vegetación se extendía en la porción central de la cuenca (Figura 6.6).

Para el Bosque natural, se identificaron las especies de la familia *Fagaceae*, específicamente *Quercus crassifolia* (INEGI, 1998e; Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005), alcanzan alturas de una par de decenas de metros, conocida localmente como encino prieto ó encino colorado, localizados en la porción noreste de la cuenca sobre pisos altitudinales desde los 2,100 metros y hasta los 2,600 metros; además de *Quercus rugosa*, que alcanza una altura máxima de 8 metros y conocido localmente como encino de miel ó palo cuero (INEGI, 1998e;

Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005), ubicados al sureste de la cuenca, en elevaciones que van desde los 2,400 y hasta los 2,800 metros. Perennifolios y caducifolios con ramas surcadas y pubescentes, de hojas simples alternas; inflorescencias unisexuales (monoicas) de tipo masculino, con flores apétalas arregladas en amentos colgantes y alargados e inflorescencia femenina formando un amento reducido con una o varias flores (Terrones *et al.*, 2004).

Los suelos donde se desarrollan los encinos son someros y pueden presentar abundante hojarasca; por su pendiente son bien drenados; toleran sequías pero no toleran excesos de humedad o inundaciones y resisten las heladas. Su sistema radicular es profundo y son de lento crecimiento, viven hasta 150 años (Terrones *et al.*, 2004). Su distribución en la cuenca para el año de 1977, está definida hacia dos porciones, una en un segmento de dirección noroeste-sureste, sobre el parteaguas noreste de la cuenca, donde se encuentran laderas de montaña bajas y medias y un segundo tramo, en la porción sureste, cortado por el graben La Saucedá, también sobre laderas de montañas bajas y medias (Figura 6.4). Para el año de 1993 y 2003, los cambios se deben a las actividades mineras por deforestación (Figura 6.5 y 6.6). Las actividades mineras crean caminos que provocan deforestación y erosión de suelos, lo que intensifica la acción de los agentes erosivos como la lluvia y viento. También se destaca que los lugareños aprovechan la hojarasca para venderla como tierra orgánica en viveros y casas, resultando en la alteración del suelo (Figura 6.7 y 6.8).

El chaparral está conformado por arbustos resistentes al fuego, generalmente densos; en su población de especies, puede aparecer junto a encinos. Estas especies de la familia *Ericaceae* son *Quercus* spp. (encinillo, charrasquillo), *Arctostaphylos pungens*, conocido localmente como pingüica manzanita ó madroño colorado, *Camarostaphylis polifolia*, conocido como cacuato o madroño prieto y *Arbutus xalapensis* (madroño rojo) (INEGI, 1998e; Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005). Aparecen en barrancas o en laderas húmedas. Se desarrollan sobre suelos poco fértiles, de textura granular, calcáreos, arenosos o pedregosos, con un pH de valor entre 7.5 a 7.8 o incluso ácidos (Terrones *et al.*, 2004). Son sensibles a sequías y heladas. Los arbustos que lo conforman miden de 1 a 3.5 metros de altura, con una fisionomía de tipo caducifolia, de corteza rojiza que se desprende en láminas apergaminadas (INEGI, 1998e; Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005).

Para el año de 1977, su distribución sobre la cuenca es variada, se les encuentra a partir de la cota 1,800 hasta la 2,650 m, en porciones de terreno que van desde lomeríos bajos, medios y

altos, hasta laderas de montañas bajas y medias, localizados (Figura 6.4) al norte de la cuenca, al noreste, este y sureste, sobre el parteaguas. Para el año de 1993, en la porción sur y sureste, se presentan los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo más importante, debido a que se implementó en estos terrenos la agricultura (Figura 6.5). En 2003, la superficie que ocupa este tipo de vegetación, cambia poco en su extensión superficial con respecto a la fecha de 1993, pero la dinámica más acelerada se tiene en las porciones cercanas a las ciudades y localidades, debido al incremento de los desarrollos urbanos (Figura 6.4, 6.5 y 6.6).

Los matorrales son la vegetación arbustiva que presenta ramificaciones desde la base del tallo, cercano a la superficie del suelo; de altura variable y que puede alcanzar los 10 metros, dependiendo de la especie. Para definir las asociaciones se toma la predominancia relativa de cada especie, la densidad es variable entre localidades, como al interior de la misma, y se hace con base a su fisonomía, hábitat y composición florística. Por fisonomía, se describe la abundancia de las plantas, en cada asociación; los grupos se clasifican como:

Matorral inerme, formado por más del 70% de plantas sin espinas, de especies como los matorrales de *Larrea tridentata* (gobernadora), *Flourensia cernua* (Hojasén), *Ipomoea murucoides* (casahuate) y *Bursera copallifera* (copalillo). Localizado en forma variada al interior de la cuenca, para las tres fechas de análisis. Los mapas muestran, que las porciones más vulnerables a los cambios, son las que están cercanas a los campos de cultivo y a los asentamientos humanos, pues son eliminados por los diversos desarrollos urbanos nuevos. Las elevaciones en que se les encuentra van desde la cota 1,800 hasta la cota 2,600 m. Sobre lomeríos y laderas de montaña bajas y medias. En materiales diversos, tanto sedimentarios como volcánicos.

Matorral subinerme, se define por la composición de su comunidad de plantas espinosas e inermes, con una proporción entre primeras y últimas de un 30% y menor a un 70%. Las elevaciones en que se les encuentra van desde la cota 1,700 hasta la cota 2,700 m (Figura 6.6), en lomeríos altos y laderas de montaña bajas, sobre vertientes húmedas.

Matorral espinoso, se define por la presencia de un 70% de las plantas espinosas, como la *Acacia amentaceay*, la *Acacia vernicosa* (chaparro prieto), *Acacia greggii*. var. *wrightii*, conocida como Uña de gato ó gato; *Acacia pringlei*, conocida como Gavia ó quebracho; además *Acacia shaffneri* ó Huizache chino, *Acacia farnesiana* conocido como Huizache yórdiro, *Acacia pennatula* ó Huizache tepame. Con alturas que van desde 0.9 a 12 m.

Generalmente se le encuentra como acompañante del mezquite de la especie *Prosopis laevigata* (INEGI, 1998e; Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005).

Los suelos en este tipo de vegetación son someros, calizos, arenosos, pedregosos, bien drenados; con pH de 5 a 8; toleran sequías y heladas. Acompañados por algunas plantas crasas, con alturas que van desde los 5 a los 10 metros, de las especies como *Myrtillocatus geometrizans* (*garambullo*), *Stenocereus* spp. y *Pachycereus* spp. (Órganos, candelabros y cardones) (INEGI, 1998e; Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005); y de forma escasa aparecen los nopales, principalmente las especies del género *Opuntia*. La presencia de estas plantas es mezclada con otros grupos como matorrales subinermes, inermes y chaparral (INEGI, 1998e; Terrones *et al.*, 2004; INEGI, 2005).

En la Tabla 6.1 está el listado de las superficies que ocupan cada una de las clases de cobertura vegetal y de uso del suelo (columna 3, 4 y 5), en la columna 6 y 7 aparecen la relación de superficie por fecha de análisis. La Figura 6.1, ilustra la superficie que abarcan estas clases de acuerdo a la fecha de análisis y junto a la Figura 6.2, los porcentajes indican que la superficie de cobertura vegetal y uso del suelo cambió para cada una de las fechas.

Las clases que presentaron la mayor dinámica de cambio fueron los asentamientos humanos, la agricultura, y el pastizal (Figura 6.3). En los dos periodos de estudio, muestran variaciones importantes en las tasas, pues para el intervalo de 1977-1993, se obtuvo que el 37.9% de la superficie total de la cuenca presentaba algún tipo de cambio, debido a cambios en el uso del suelo ó en el tipo de cobertura vegetal. Para el periodo de 1993-2003 el 21.2% de la superficie de la cuenca presentaba algún tipo de cambio (Tablas 6.1 y 6.2).

Tanto de la información gráfica como tabular, se desprende, que el pastizal natural es la vegetación que cubre la mayor superficie del territorio en las tres fechas de análisis (Tabla 6.1), misma variable que presentó una reducción brusca entre el periodo de 1977-1993, y un poco más lenta en el periodo de 1993-2003. En la Figura 6.3, se ilustran dichas transformaciones, donde el mayor porcentaje de cambio es el que va de pastizal a agricultura con un 7.84% en el periodo de 1977-1993 (Tabla 6.2) o como lo muestra el cambio de pastizal a chaparral con un 3.6%.

La transformación de uso agrícola a asentamiento humano para el periodo de 1977-1993, cubre solo el 0.84% de la superficie total de la cuenca, que sin embargo representan 4.12 km² y para 1993-2003 la superficie urbana se incrementó en 0.89%, es decir 4.37 km², del total de la

cuenca. Valores que contrastan con las transformaciones ocurridas de pastizal a chaparral, de pastizal a agricultura, de chaparral a pastizal, de pastizal a matorral ó de bosque a chaparral, mismas que para el periodo de 1977-1993 sumaban el 19.32% de la superficie transformada, y para el periodo de 1993-2003 era el 8.55% de la superficie con cambios.

Tabla 6.1. Resumen de cambios, en área, que abarcan los distintos tipos de usos de suelo y vegetación.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE, EN km ²			VARIACIÓN DE SUPERFICIE POR PERIODO, %		TIPO DE CAMBIO POR PERIODO			
		1977	1993	2003	1977 - 1993	1993 - 2003	1977 - 1993		1993 - 2003	
		3	4	5	6	7	8 AUMENTO	9 REDUCCIÓN	10 AUMENTO	11 REDUCCIÓN
A	AGRICULTURA	109.41	131.00	117.80	19.73	-10.08	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
AH	ASENTAMIENTO HUMANO	7.70	16.04	22.62	108.31	41.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CA	CUERPO DE AGUA	0.39	8.78	8.88	2151.28	1.14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ch	CHAPARRAL	52.65	66.24	52.94	25.81	-20.08	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
FBL(Q)	BOSQUE NATURAL DE LATIFOLIADAS	53.28	45.48	59.07	-14.64	29.88	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Me	MATORRAL ESPINOSO	0.54	0.69	2.36	27.78	242.03	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mi	MATORRAL INERME	7.56	7.60	15.70	0.53	106.58	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ms	MATORRAL SUBINERME	23.90	27.38	25.71	14.56	-6.10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pi	PASTIZAL INDUCIDO	0.00	0.59	1.82	100.00	208.47	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pn	PASTIZAL NATURAL	232.66	184.29	179.47	-20.79	-2.62	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
RJ	PRESA DE JALES	0.00	1.03	1.18	100.00	14.56	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
S	VEGETACIÓN SECUNDARIA	2.55	1.52	3.09	-40.39	103.29	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

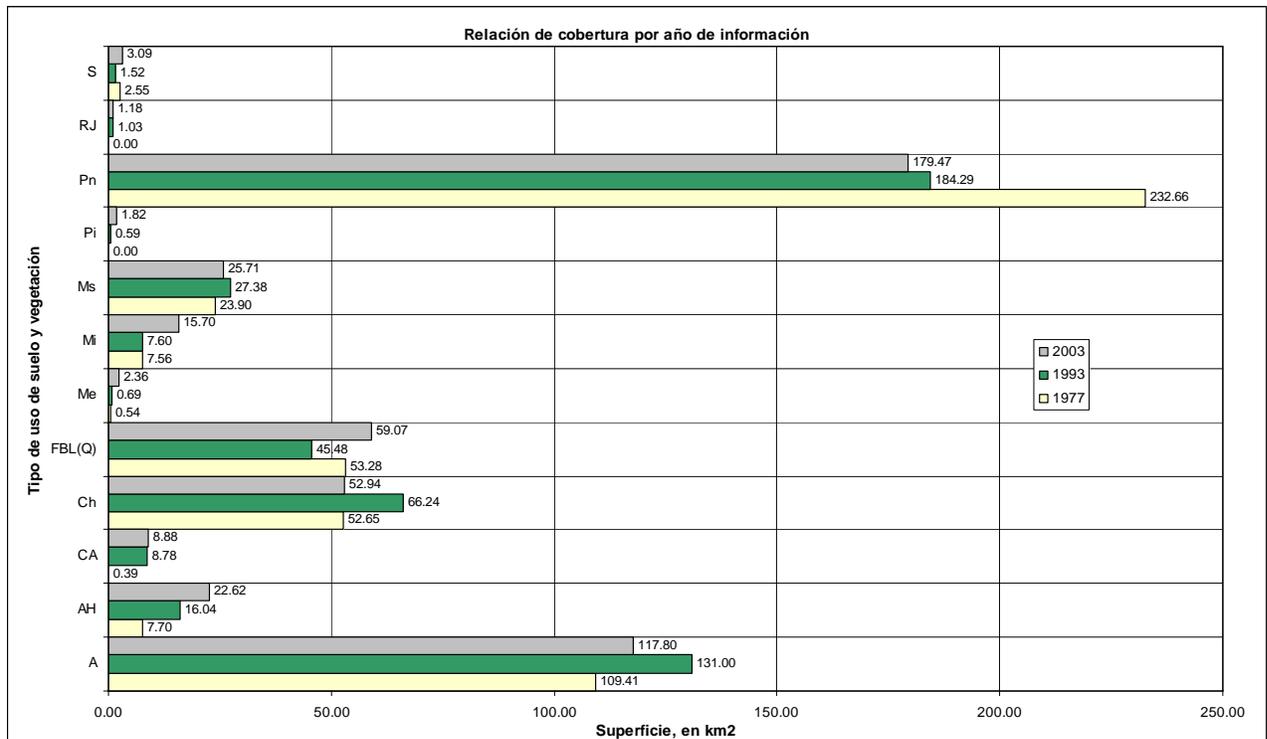


Figura 6.1. Resumen de superficie que abarca cada clase por uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca, por fecha de levantamiento.

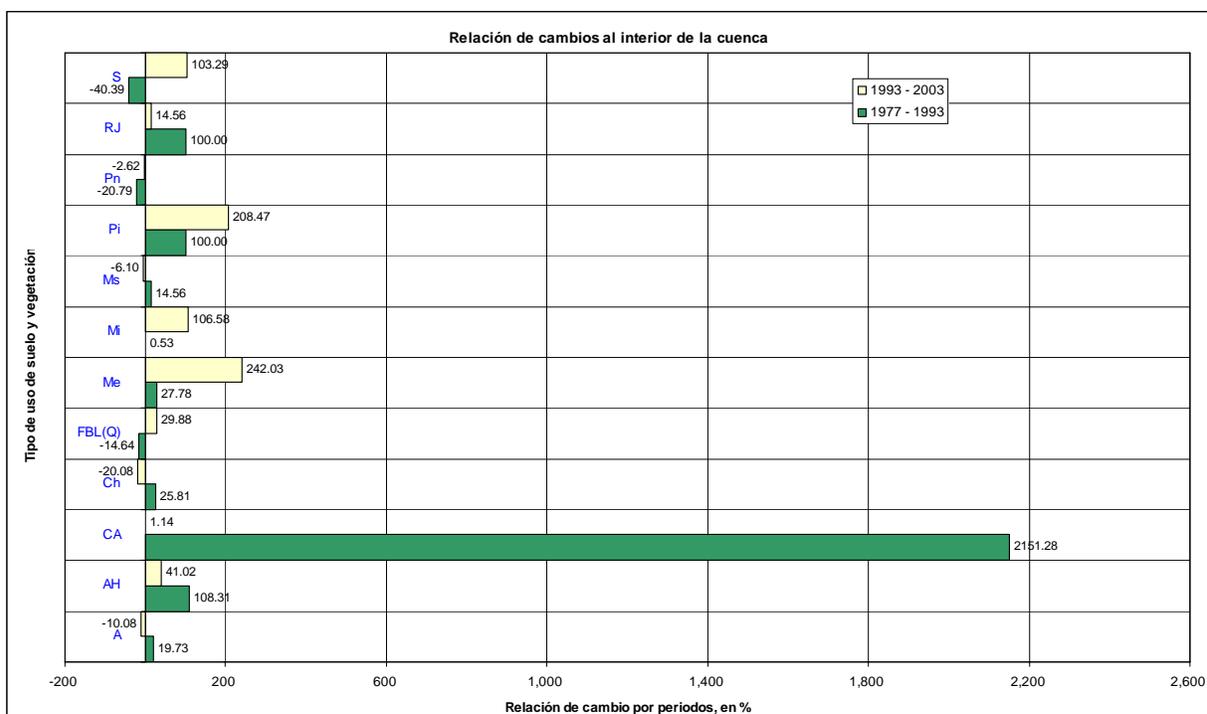


Figura 6.2. Relación de cambios, por periodos, para cada uso del suelo y cobertura vegetal, en la cuenca.

Tabla 6.2. Relación de superficie transformada al interior de La cuenca, y el tipo de cambio ocurrido.

TIPO DE CAMBIO	RELACIÓN DE SUPERFICIE: TIPO DE CAMBIO EN EL USO DEL SUELO Y LA CUENCA, en %.		RELACIÓN DE SUPERFICIE: TIPO DE CAMBIO EN EL USO DEL SUELO Y LA CUENCA, en km ²		ECUACIÓN QUE DEFINE AL MAPA RESPECTIVO
	1977-1993	1993-2003	1977-1993	1993-2003	
DE AGRICULTURA A CUERPO DE AGUA	1.57	0.03	7.70	0.15	IF(((1977=PASTIZAL)AND(1993=ASENTAMIENTO HUMANO))OR((1993=PASTIZAL)AND(2003=ASENTAMIENTO HUMANO)),2,0)
DE AGRICULTURA A URBANO	0.84	0.89	4.12	4.37	IF(((1977=AGRICULTURA)AND(1993=CUERPO DE AGUA))OR((1993=AGRICULTURA)AND(2003=CUERPO DE AGUA)),3,0)
DE BOSQUE A CHAPARRAL	2.12	1.08	10.40	5.30	IF(((1977=AGRICULTURA)AND(1993=ASENTAMIENTO HUMANO))OR((1993=AGRICULTURA)AND(2003=ASENTAMIENTO HUMANO)),2,0)
DE BOSQUE A MATORRAL	0.12	0.12	0.59	0.59	IF(((1977=BOSQUE)AND(1993=CHAPARRAL))OR((1993=BOSQUE)AND(2003=CHAPARRAL)),4,0)
DE CHAPARRAL A MATORRAL	0.52	0.86	2.55	4.22	IF(((1977=BOSQUE)AND(1993=MATORRAL))OR((1993=BOSQUE)AND(2003=MATORRAL)),6,0)
DE PASTIZAL A AGRICULTURA	7.84	2.06	38.46	10.11	IF(((1977=CHAPARRAL)AND(1993=PASTIZAL))OR((1993=CHAPARRAL)AND(2003=PASTIZAL)),10,0)
DE PASTIZAL A MATORRAL	3.39	2.12	16.63	10.40	IF(((1977=PASTIZAL)AND(1993=AGRICULTURA))OR((1993=PASTIZAL)AND(2003=AGRICULTURA)),1,0)
DE PASTIZAL A URBANO	1.24	0.38	6.08	1.86	IF(((1977=PASTIZAL)AND(1993=MATORRAL))OR((1993=PASTIZAL)AND(2003=MATORRAL)),8,0)
DE MATORRAL A AGRICULTURA	2.45	1.76	12.02	8.63	IF(((1977=PASTIZAL)AND(1993=PRESA DE JALES))OR((1993=PASTIZAL)AND(2003=PRESA DE JALES)),11,0)
DE PASTIZAL A CUERPO DE AGUA	0.07	0.01	0.34	0.05	
DE PASTIZAL NATURAL A CHAPARRAL	3.60	1.91	17.66	9.37	
DE CHAPARRAL A PASTIZAL	2.37	1.38	11.63	6.77	
DE CHAPARRAL A BOSQUE NATURAL	3.43	1.36	16.83	6.67	
SUB-TOTAL	29.56	13.96	145.01	68.48	
DE MATORRAL A PASTIZAL NATURAL	NA	NA	NA	NA	
DE AGRICULTURA A PASTIZAL	NA	NA	NA	NA	
DE AGRICULTURA A VEGETACIÓN SEC.	NA	NA	NA	NA	
SE VEGETACIÓN SEC. A AGRICULTURA	8.37	7.29	41.09	35.78	
DE PASTIZAL NATURAL A BOSQUE NATURAL	NA	NA	NA	NA	
DE AGRICULTURA A MATORRAL	NA	NA	NA	NA	
OTRAS RELACIONES	NA	NA	NA	NA	
TOTAL	37.93	21.25	186.10	104.261	

NA = NO APLICA, EL VALOR DE SUPERFICIE ES MUY PEQUEÑO

Otro de los usos que describen una dinámica acelerada es la referente a la de vegetación de chaparral hacia bosque, es decir, deja de ser un área con arbustos y vegetación mediana y en algunos casos con presencia de matorrales espinosos, que se transforma en bosque. Para el periodo de 1977-1993 se veía incrementada su superficie del orden de 3.43%, y de 1993-2003 en un 1.38%. Esto no indica, necesariamente, que el paisaje se esté degradando ó que presente una recuperación, o que existan eventos lluviosos que sean más benéficos que perjudiciales, y que se puede ver afectado por el grado de detalle de la escala.

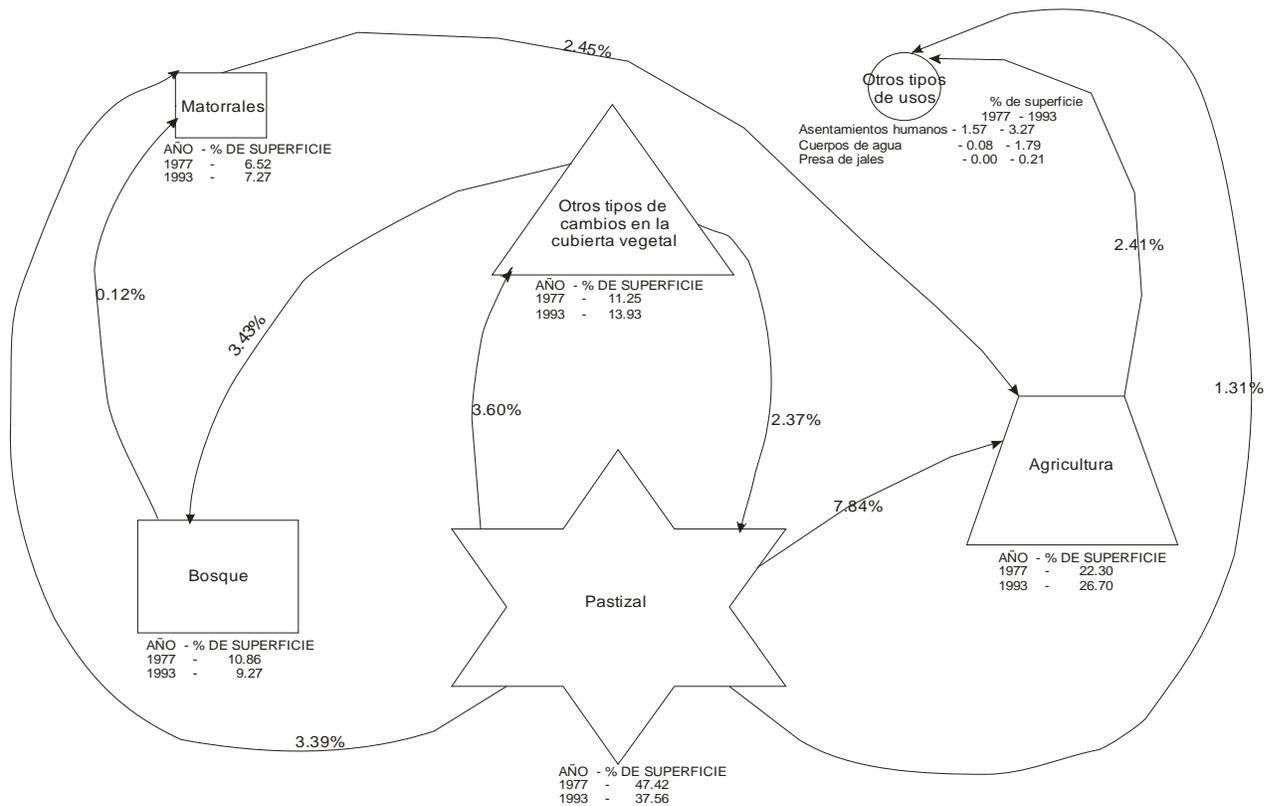
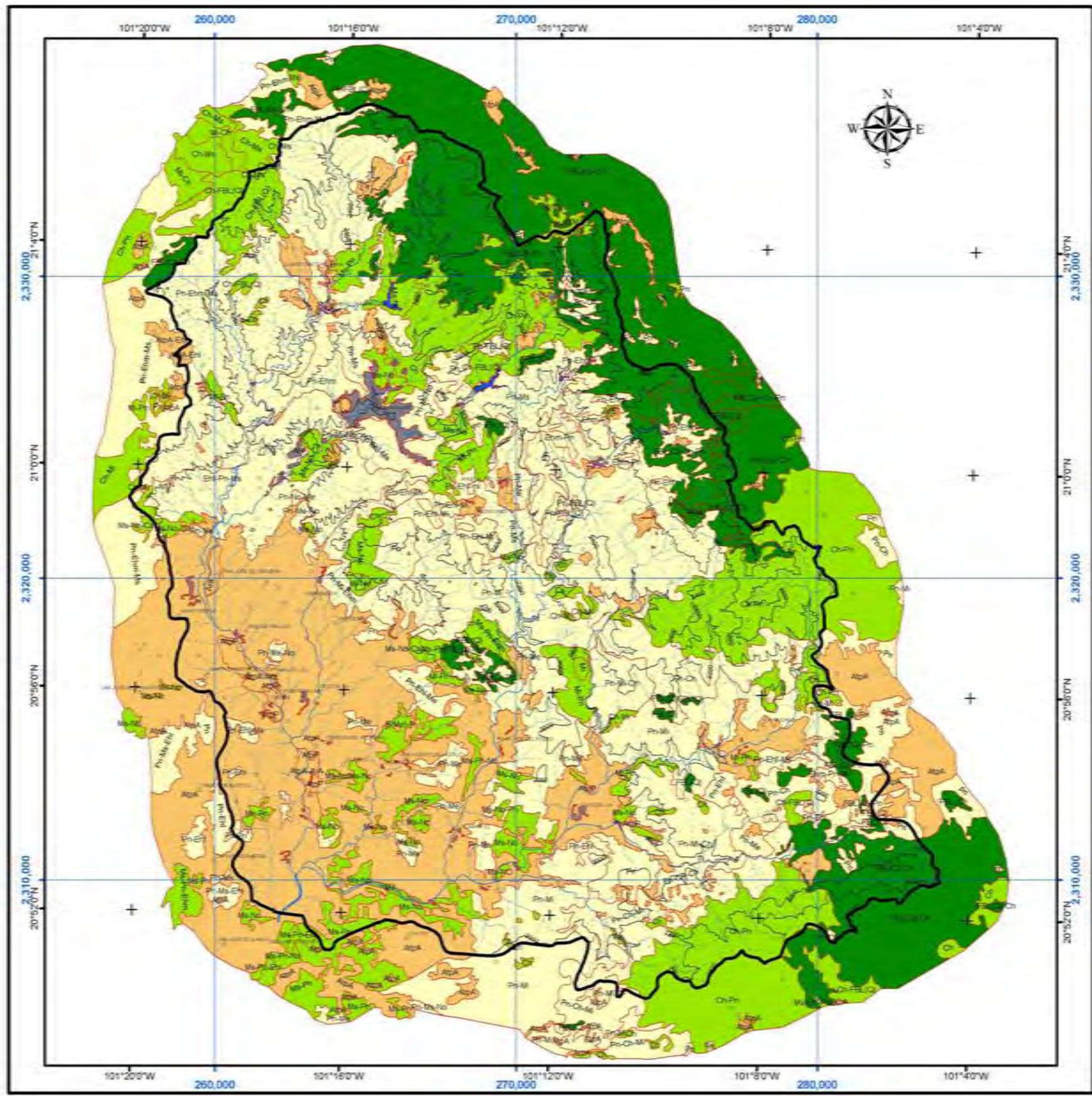


Figura 6.3. Esquema general que ilustra las relaciones que originan los cambios de uso del suelo y cobertura vegetal al interior de la cuenca.

Los cambios en el tipo de uso del suelo y de la cubierta vegetal, se ven afectados por el tamaño de la clase, representado por la superficie que ocupa en la cuenca. De esta forma, la superficie cambió en 41.09 km², para el periodo de 1977-1993, de vegetación secundaria (matorrales inermes, subinermes) a agricultura. El segundo cambio importante se presenta de pastizal a agricultura con 38.46 km².

Para el periodo de 1993-2003, la clase de mayor superficie con cambio fue la de vegetación secundaria a agricultura, con 35.78 km², mientras que en segundo lugar de cambio fue la clase pastizal a matorral y pastizal a agricultura, con 10.40 y 10.11 km², respectivamente.

En el periodo de análisis, para el cambio de uso del suelo y cobertura vegetal, entre 1977-1993 y 1993-2003, la superficie que abarca la mancha urbana creció hacia terrenos dedicados a la agricultura y pastizal, en forma que en el primer periodo, se tuvieron 4.12 km², de área urbana en terrenos que eran destinados a la agricultura. Para 1993-2003, la mancha urbana creció 4.37 km².



AH	ASENTAMIENTO HUMANO		
USO AGRÍCOLA			
Ar	AGRICULTURA DE REGO	ANUAL	A
Atp	AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	PERMANENTE	P
Atn	AGRICULTURA DE TEMPORAL NOMADA		
USO PECUARIO			
Pn	PASTIZAL NATURAL		
Pi	PASTIZAL INDUCIDO		
USO FORESTAL			
B	BOSQUE NATURAL	LATIFOLIADAS	L
En	ENCINO		
ASOCIACIONES ESPECIALES DE VEGETACIÓN			
Ca	CARDONAL		
No	NOPALERA		
Ch	CHAPARRAL		
Me	MATORRAL ESPILOSO		
Mi	MATORRAL IERME		
Ms	MATORRAL SUBIERME		
Mz	MEZQUITAL		
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN			
Eh	EROSIÓN HÉRICA	FUERTE MODERADA LEVE	f m l
CUERPOS DE AGUA			
CA	PERMANENTE		
SIMBOLOGÍA			
	PARTEAGUAS, CUENCA DEL RÍO GUAMAUATO		HIDROGRAFÍA
			CURVA DE NIVEL CADA 250 m

0 5 10 Km

1:150,000
PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD83, ZONA 14N


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
 INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
 POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FIGURA 6.4
USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL DEL AÑO 1977
 CREADO DE LAS CARTAS DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN, DEL INEGI A ESCALA 1:50,000, EDITADAS EN 1977.
 2008




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
 INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
 POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FIGURA 6.5

USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL DEL AÑO 1993

MAPA

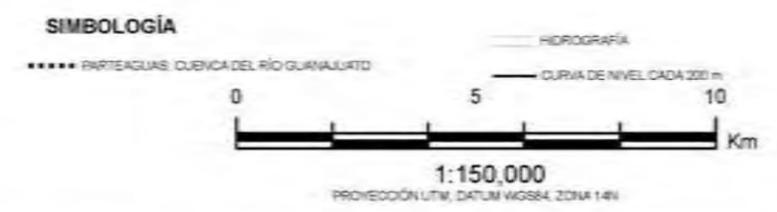
CREADO DE DRTOFOTOS ESCALA 1:20,000 DEL AÑO 1993

2008



- AH** ASENTAMIENTO HUMANO
- USO AGRÍCOLA**
 - Ar** AGRICULTURA DE REGO
 - Atp** AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE
 - Atn** AGRICULTURA DE TEMPORAL NOMADA
- USO PECUARIO**
 - Pn** PASTIZAL NATURAL
 - Pl** PASTIZAL INDUCIDO
- USO FORESTAL**
 - BOSQUE NATURAL** LATIFOLIADAS **L**
 - ENCINO**
- ASOCIACIONES ESPECIALES DE VEGETACIÓN**
 - Ca** CARDONAL
 - Ne** NOPALERA
 - Ch** CHAPARRAL
 - Me** MATORRAL ESPINOSO
 - Mi** MATORRAL IBERIC
 - Ms** MATORRAL SUBSERVIE
 - Mz** MEZQUITAL
- DESPROVISTO DE VEGETACIÓN**
 - Eh** EROSIÓN HÍDRICA

FUERTE	1
MODERADA	2
LEVE	3
- CUERPOS DE AGUA**
 - CA** PERMANENTE
- OTROS USOS**
 - Ba** BASURERO MUNICIPAL
 - RJ** REPRESA DE JALES




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
 INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
 POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FIGURA 6.6
MAPA USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL DEL AÑO 2003
 CREADO DE ORTOFOTOS ESCALA 1:20,000 DEL AÑO 2003
 2008

EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL, POR PERIODO

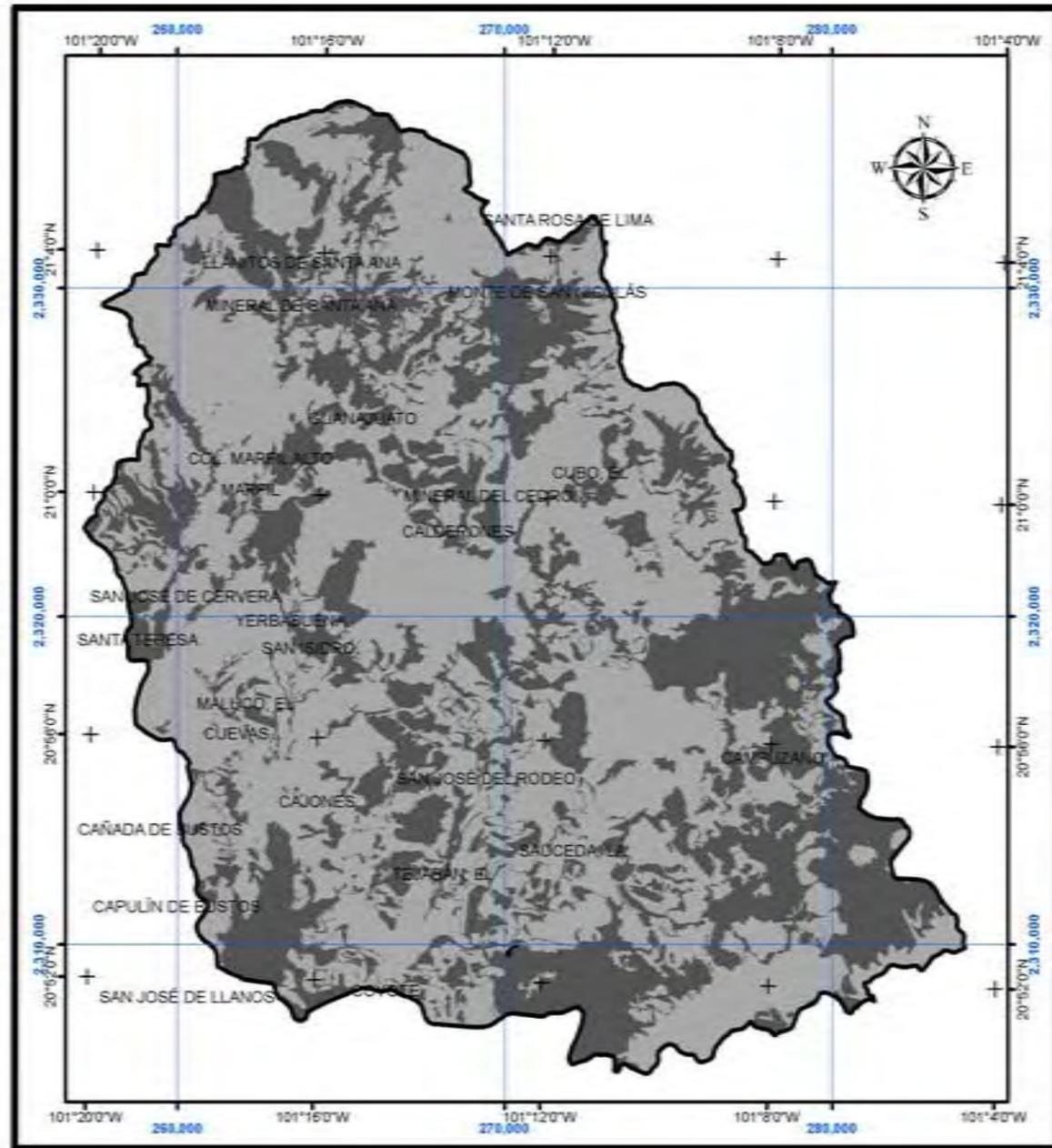


FIGURA 6.7
PERIODO 1977-1993

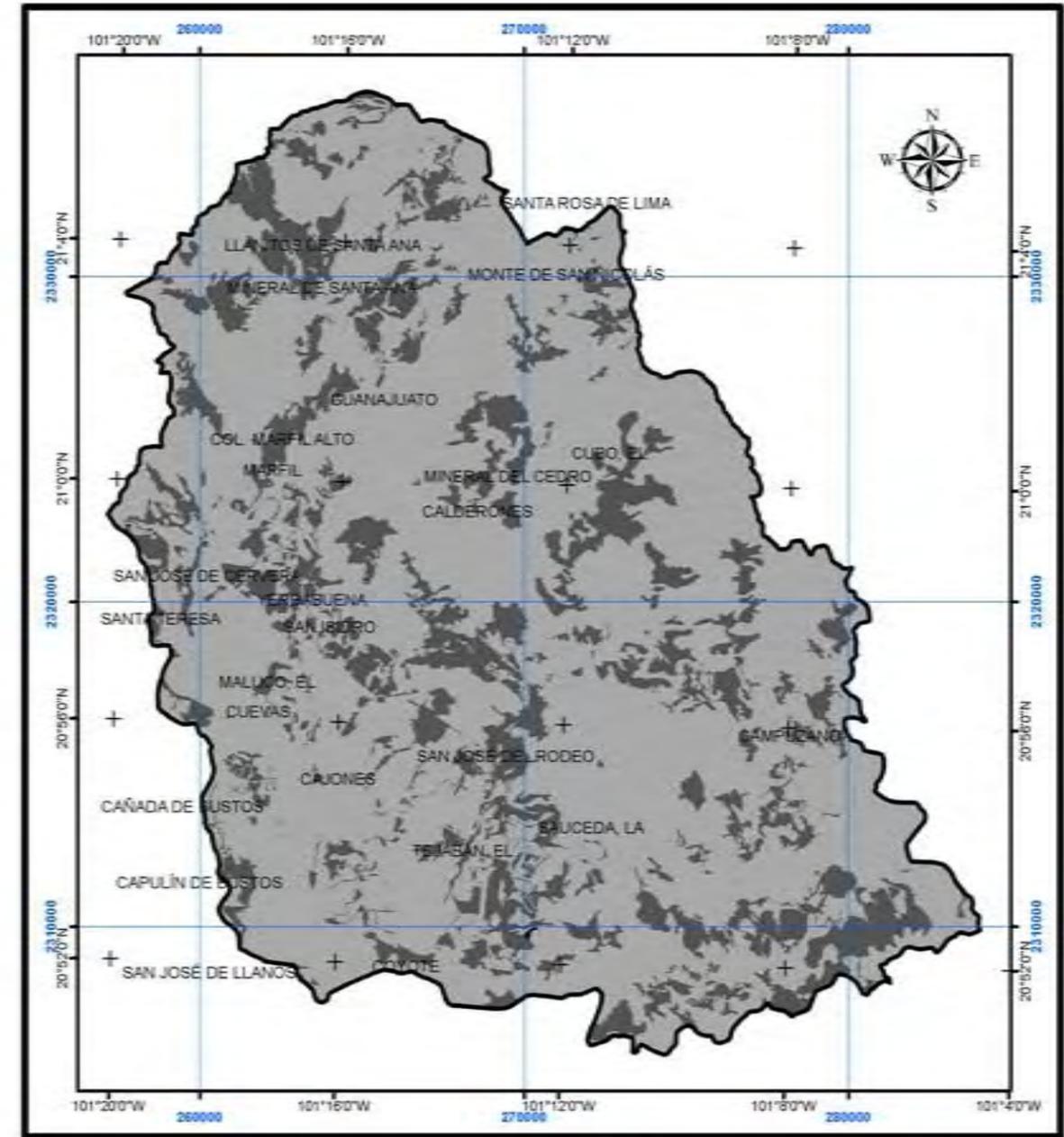


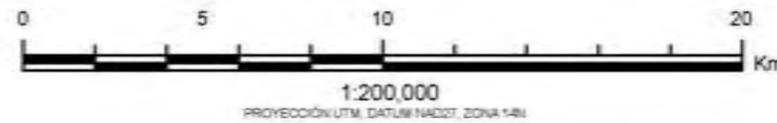
FIGURA 6.8
PERIODO 1993-2003

LEYENDA

- SIN CAMBIOS
- CON CAMBIOS

SIMBOLOGÍA

- PARTEAGUAS; CUENCA DEL RIO GUANAJUATO





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

FUENTE INEGI: MAPA DE USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL DE EDICIÓN DEL AÑO DE 1977, ORTOFOTOS A ESCALA 1:20,000, DE EDICIÓN DEL AÑO 1993 Y 2003.

2008

7. EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE EROSIÓN HÍDRICA POR LÓGICA DIFUSA

7.1 RESULTADOS

7.1.1. INCLINACIÓN DE LA PENDIENTE

Las clases aplicadas al factor de inclinación de la pendiente, se resume en la Tabla 7.1, donde los valores ayudan a definir la función de pertenencia (Fig. 7.1), evaluada en las operaciones de lógica difusa. El resultado se representa como mapa, denominado *factor de inclinación de la pendiente* (Fig. 7.4a). La función de pertenencia, se definió a partir de los datos estadísticos del factor de inclinación de la pendiente como: máximo: 22.09, mínimo: 0, media: 3.44, desviación estándar: 3.1580.

Los valores cercanos al máximo, corresponden a las inclinaciones del terreno escarpadas. Si el valor se acerca al cero, muestra correspondencia con los valores de inclinación de la pendiente para terrenos planos. El valor de la media y de la desviación estándar, permiten verificar el intervalo de datos centrales para la variable definida como factor de inclinación de la pendiente y que se implican en la función de pertenencia (Tabla 7.1). Estos datos se hacen equivalentes con respecto a los valores de ponderación (segunda columna). Cuando se define la función de pertenencia, se aplican los valores índices a las clases en las variables.

Tabla 7.1. Descripción de valores fuzzy aplicados al factor S.

Intervalo de clase para el factor S.	Valor de pertenencia
< 2.5	0
5	0.48
> 7.5	1

$$x = S$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x < 2.5 \\ \left(\frac{\text{sen } \theta}{0.0896}\right)^{1.3} & 2.5 < x < 7.5 \\ 1 & x > 7.5 \end{cases}$$

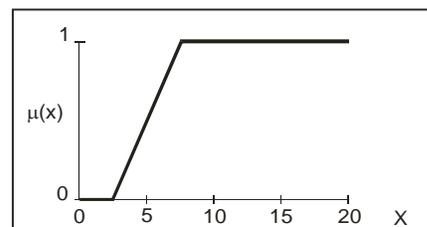


Figura 7.1. Función de pertenencia resultante para los datos de la variable S.

La Figura 7.4a, muestra que los valores de pertenencia, de las clases de la inclinación de la pendiente, que se encuentran en los lomeríos altos y laderas de montaña bajas y altas (al norte, oeste y este del área de estudio), es el relieve que se aparece con la mayor cantidad de eventos de procesos hídricos acelerados tipo cárcavas y microcauces con intensidades de moderadas a

severas. Además, en la porción sur, en el límite del parteaguas se muestra otra área en la que la inclinación de la pendiente es un factor de considerar en la evaluación de los procesos erosivos acelerados. La litología de estas unidades es de origen endógeno (tectónico-volcánico) y de materiales como riolitas, dacitas, esquistos, pizarras, tobas riolíticas y dacíticas. Las unidades edáficas son litosol y phaeozem háplico, phaeozem calcárico y phaeozem lúvico; además de cambisoles. Las amplitudes de relieve van desde los 2,300 msnm y hasta los 2,800 msnm. El grado de inclinación de la pendiente influye en la velocidad con que impacta el flujo superficial al terreno, ya que en inclinaciones fuertes a escarpadas, el agua erosiona de manera intensa a los materiales.

7.1.2. FACTOR DE LONGITUD DE LA LADERA

El factor de longitud de la ladera (L), presenta como información estadística que el valor máximo alcanzado es de 1.9202, el mínimo es 0.9513, la media es de 1.0546 y la desviación estándar es 0.0966 (usados en la definición de la función de pertenencia).

Se encontró que los valores del factor de longitud de ladera (L) inferiores a 0.96 (Fig. 7.4b), representan terrenos donde la ladera presenta un longitud corta; el caso contrario ocurre en las laderas con valores del factor L superiores a 0.99. Estos datos, no representan si la longitud de las laderas queda expresada para terrenos planos o inclinados, pues en la generación de escurrimientos superficiales, una longitud extensa sí interviene en la generación de procesos erosivos acelerados.

La Tabla 7.2 muestra los valores índice (difuso), aplicados para cada clase en que se dividen los valores de la longitud de la ladera. Para asignar los límites de la función de propiedad, se consideró que las distancias cortas e inclinación fuerte, deben representar valores altos para el factor L , incluso aún cuando la inclinación sea nula (plana) o casi plana, o cuando sea una longitud grande.

La longitud de la ladera se relaciona con otras variables como son la textura del suelo, la lluvia que cae, expresada en intensidad y duración, el tipo de cubierta vegetal, la inclinación de la ladera, el grado de humedad en el suelo, el uso del suelo, agregados, etc., de forma que por sí sola no puede indicar si una vertiente ó un terreno pueden generar procesos erosivos hídricos acelerados, esto implica que es difícil mostrar la intensidad con que aparece sobre el terreno. Sin embargo, una vez que se combinan las variables, estas ayudan a ubicar los espacios más susceptibles de iniciar o intensificar, este peligro de erosión hídrica.

Tabla 7.2. Valores de clase y fuzzy para el factor L.

Intervalo de clase para el factor L .	Valor de pertenencia
< 0.96	0
$0.96 < x < 0.999$	0.25
1.14	0.75
> 1.14	1

$$x = L$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.96 \\ \left(\frac{l}{22.13}\right)^m & 0.96 < x < 0.999 \\ 1 & x > 1.14 \end{cases}$$

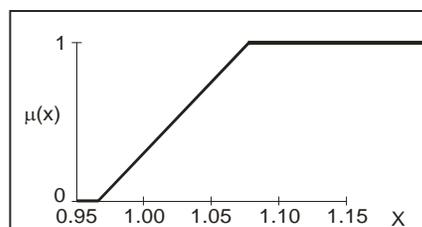


Figura 7.2. Descripción de la función de pertenencia de los datos de la variable L .

El mapa de la Figura 7.4b, muestra que el valor de la longitud de la ladera del terreno, no coincide ni interviene en el resultado obtenido para la inclinación. Esto se debe a que la ladera entre más extensa sea, genera escurrimientos superficiales de forma independiente a la inclinación que registre el terreno.

La Figura 7.4b, destaca que el mapa ilustra dos porciones espaciales importantes, la primera, que contienen los valores más bajos del factor de longitud de la ladera, localizada sobre los lomeríos bajos y medios, en las fosas tectónicas El Bajío y La Saucedá, así como en los terrenos que contienen al embalse de la presa La Purísima. Los valores más altos, de la longitud de la ladera, se localizan en los lomeríos medios y altos, así como en las laderas de montaña, en el relieve que corresponde a la Sierra de Guanajuato. La información morfogenética indica que los materiales corresponden a rocas de tipo riolítico, dacítico, de basaltos, tobas riolíticas y esquistos.

7.1.3. USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL

El uso del suelo y la cobertura vegetal, son variables que inciden en el proceso de erosión hídrica acelerada. La Tabla 7.3, muestra un listado de las clases representativas del tipo de cobertura vegetal y uso del suelo para el área en estudio. Además, se listan los valores correspondientes al factor C y al valor de ponderación o difuso.

Tabla 7.3. Resumen de usos de suelo y vegetación, con valor difuso aplicado.

Clases	Descripción del uso del suelo y cubierta vegetal	Superficie, (km ²)	Valor del factor C	Valor de pertenencia de la clase
A	Agricultura	117.65	0.45	1.0
AH	Actividad humana	32.66	0.001	0.25
M	Matorral	100.01	0.01	0.20
P	Pastizal	181.25	0.02	0.35
FBL(Q)	Bosque natural	59.07	0.001	0.12

La Figura 7.4c, ilustra los valores de pertenencia de la variable uso del suelo y cobertura vegetal, ponderada con relación a la presencia de peligro de erosión hídrica acelerada. Este mapa resultante, ilustra que los valores de pertenencia más altos (cercaos a la unidad), son considerados como espacios con mayor probabilidad de estar relacionados con eventos de erosión hídrica acelerada. Se les localiza, en el área de estudio, sobre la porción Centro-Norte, pero de modo más acentuado en la parte sur, sobre los campos de cultivo, aledaños a las comunidades de La Yerbabuena, Puenteceillas, Santa Teresa y La Saucedá. Abarcan una superficie de 298.9 km², que corresponde al 61% de la superficie total de la cuenca. La actividad agrícola es de temporal principalmente, y solo las parcelas ubicadas en las terrazas del río Guanajuato, cercanos a la presa de la Purísima son de riego y de cultivos como el sorgo, maíz, alfalfa y avena. Además, la evaluación de los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal de los años 1977, 1993 y 2003, muestra que en la porción Centro-Sur de la cuenca existe la presencia de un crecimiento acentuado de la mancha urbana. Es decir, los campos dedicados a la agricultura en estas planicies y lomeríos bajos, se están transformando en fraccionamientos e infraestructura urbana (vialidades, parques y jardines).

7.1.4. EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

En la Tabla 7.4, aparecen listados los valores de erosividad de la lluvia, calculados a partir de la intensidad y altura de lluvia. La Figura 7.4d, muestra la distribución de los valores de la erosividad de la lluvia sobre la cuenca, con base a la manera en que las tormentas se registran en cada estación meteorológica. De forma que los valores más altos aparecen en la parte norte, sobre las laderas de montaña altas (área de la Sierra de Guanajuato). Los valores más bajos erosividad ocurren en el área de los lomeríos bajos y las planicies onduladas (sur, sureste), localizados en la fosa tectónica El Bajío y La Saucedá. La cobertura vegetal, que aparece en la Sierra de Guanajuato es de tipo matorral y forestal; mientras que los campos de cultivo y pastizales, se desarrollan en las porciones sur y sureste de la cuenca.

Los valores de erosividad, calculados por estación meteorológica, se listan en la Tabla 7.4, de manera que los valores inferiores a 400 J/m², se tomaron como aquellos que no influyen de forma determinante en la generación o aceleración del peligro de erosión, el resto muestra una transición entre una pertenencia media a fuerte.

Tabla 7.4. Valores típicos de la erosividad de la lluvia, calculada para tormentas con una duración de cuatro horas y un periodo de retorno de 15 años.

No. Estación meteorológica	I, mm/hr	E, Jm ⁻² mm ⁻¹	Hp, mm	E total, Jm ⁻²	Valor de pertenencia
7	64.39	24.22	21.25	514.7	0.50
73	89.36	25.42	29.49	749.6	1.00
85	114.88	26.34	37.91	998.5	1.00
94	67.12	24.37	22.15	539.8	0.50
103	87.27	25.33	28.80	729.5	1.00
121	49.82	23.28	16.44	382.7	0.00
124	56.00	23.70	18.48	438.0	0.00
137	52.27	23.45	17.25	404.5	0.00

$$x = E$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 450 \\ E = 8.95 + 8.44 \log_{10} I & 450 < x < 600 \\ 1 & x \geq 600 \end{cases}$$

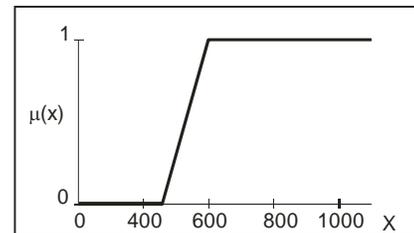


Figura 7.3. Función de pertenencia de la erosividad de la lluvia.

7.1.5. ERODABILIDAD DEL SUELO

La erodabilidad del suelo se ha calculado para cada una de las unidades edáficas. Estas clases edáficas se han clasificado como G1A1, G2A2, G3A3, G4A4, G5A5, G6A6, G7A7, y quedan resumidas en la Tabla 7.5, donde se lista además, su valor de pertenencia ante el evento de erosión hídrica acelerada. La unidad edáfica de litosol, muestra un valor de erodabilidad medio-baja, pero debido a que en el terreno hay porciones de afloramientos rocosos se genera la presencia de flujos superficiales de velocidades importantes, a comparación del resto del terreno. Estos flujos concentrados provocan una mayor cantidad de erosión localizada en las partes bajas de las laderas rocosas, por lo tanto se ha considerado un valor de pertenencia de 0.6, de forma que buscan equilibrar los valores considerados para las otras unidades.

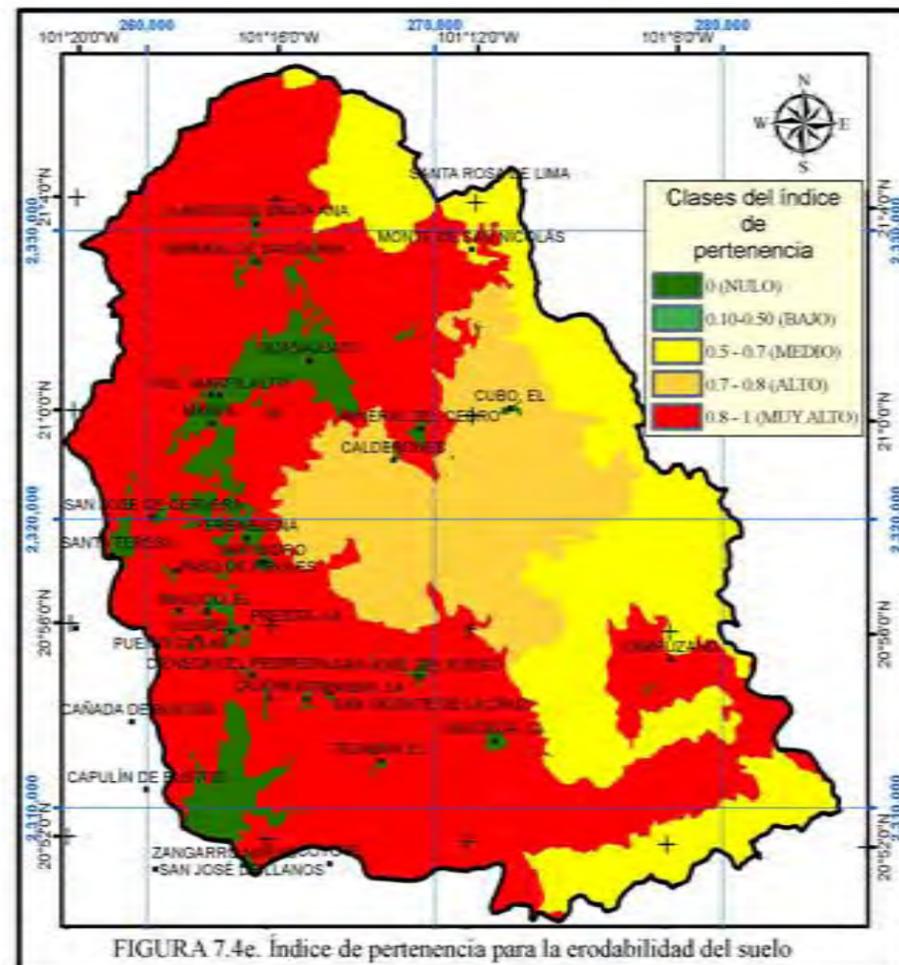
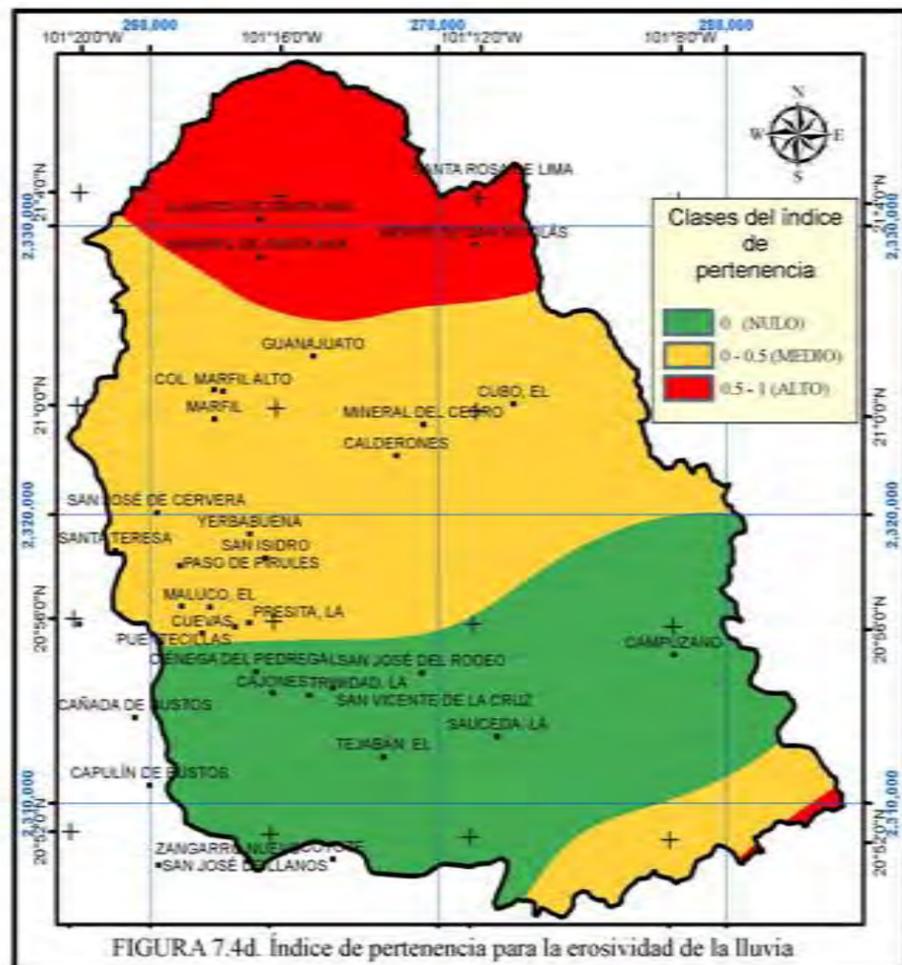
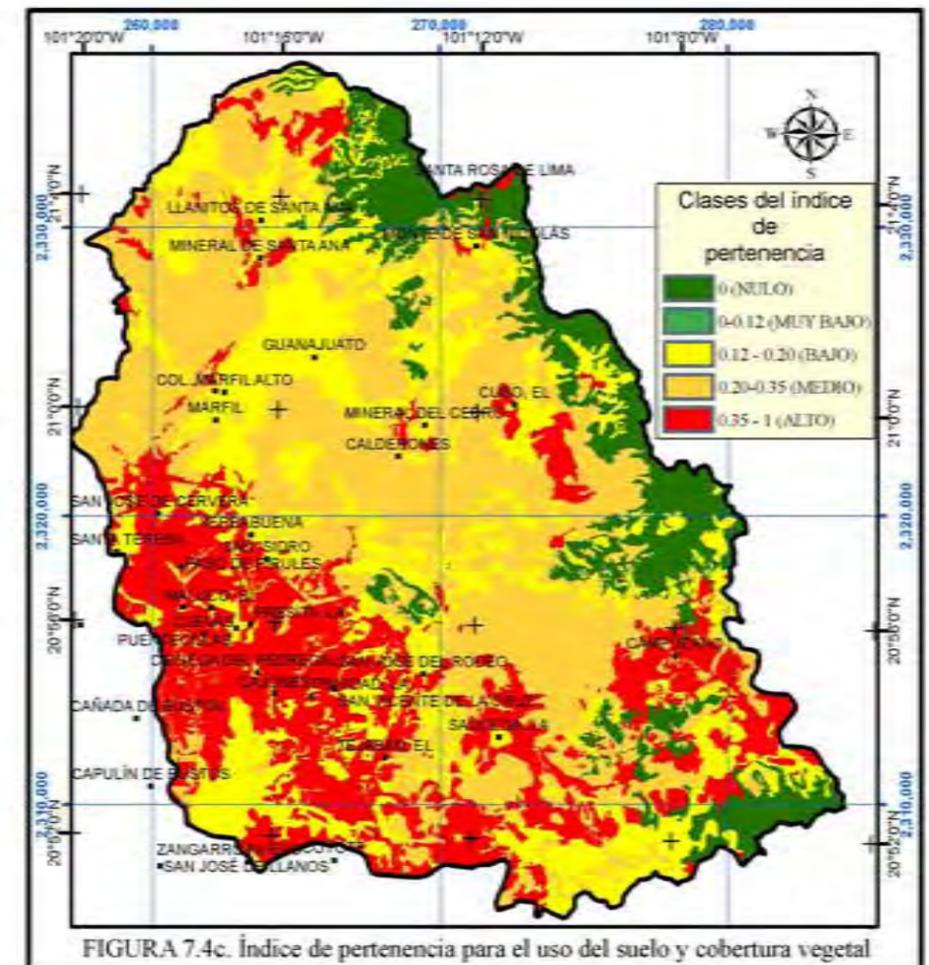
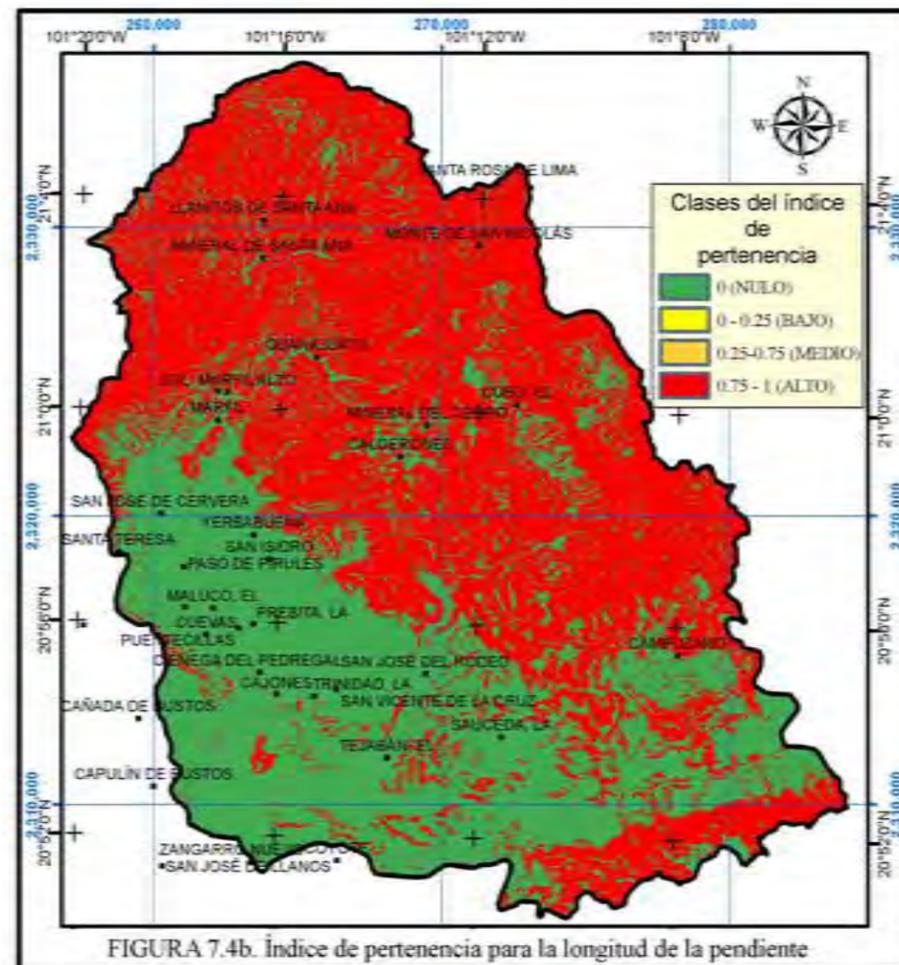
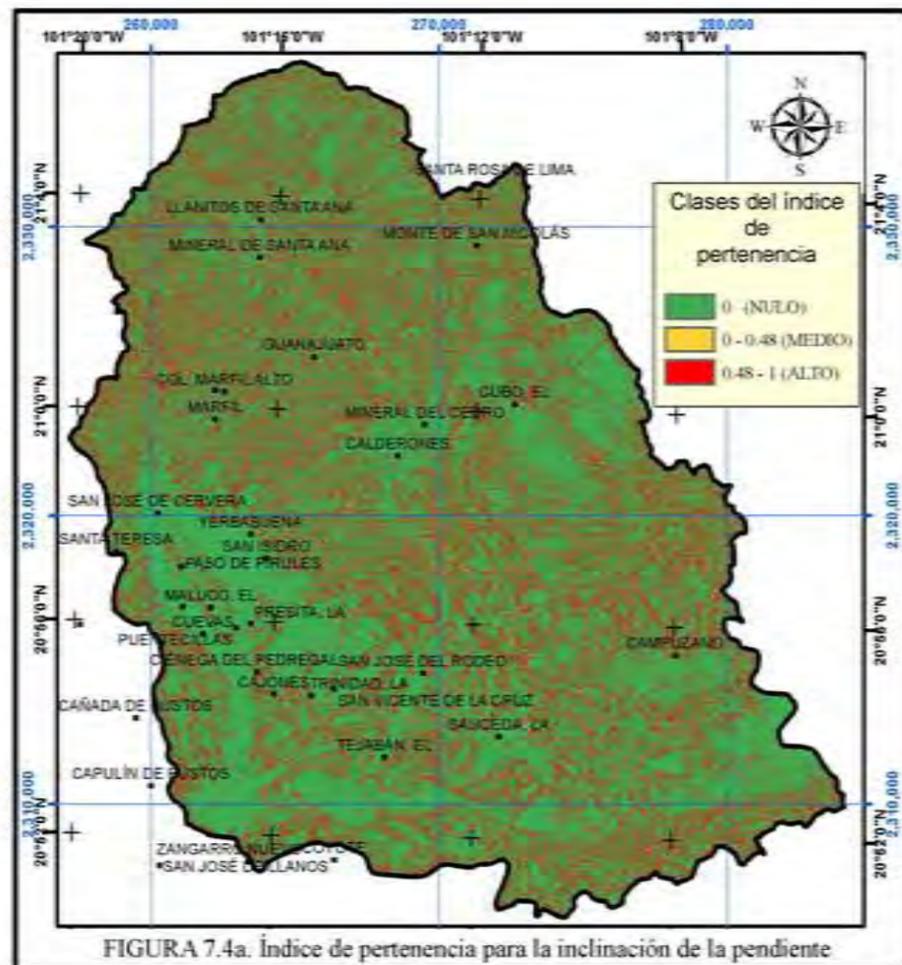
Los valores de erodabilidad bajos, indican que el suelo es poco erosionable por lo que se necesita mayor cantidad de energía cinética para provocar erosión acelerada. Los valores de

erodabilidad altos, indican que el terreno responde rápidamente a los efectos de la fuerza cinética de la lluvia y del flujo superficial, esta respuesta se refleja como erosión acelerada desencadenada de modo inmediato.

Los valores de la erodabilidad del suelo, indican que al oeste de la cuenca (en forma de franja que va de norte a sur), se presentan las porciones más susceptibles de ser susceptibles de intensificar o generar los procesos de erosión hídrica acelerada. Los valores intermedios corresponden a la superficie que abarca los litosoles y los bajos a las áreas que son cubiertas por las ciudades y las áreas forestales. Sobre esta porción oeste de la cuenca, se encuentra muy extendida la cubierta vegetal del suelo de tipo pastizal, matorral; mientras que el uso del suelo se ve intensificado por la presencia de actividades agrícolas y de forma bien localizada de tipo urbano.

Tabla 7.4. Valores obtenidos de erodabilidad *K*, a partir del nomograma desarrollado por Wischmeier y Smith (1978) *cit.* en Morgan (1995).

		Cambisol Eútrico en Fase Física Lítica	Feozem Háplico en Fase Física lítica	Phaeozem calcárico	Litosol	Feozem Lúvico	Fluvisol Eútrico	Luvisol en Fase Física lítica
		Horizonte						
Contenido,	%	A1	A1	A1	A1	A1	A11	A1
	arcilla	14	20	14	24	42	26	14
	limo	18	22	26	22	20	32	20
	arena	68	58	60	54	38	42	66
	materia orgánica	1.2	2.6	1.4	2.9	1.1	2.6	0.8
	Clave	G1A1	G2A1	G3A1	G4A1	G5A1	G6A11	G7A11
Clase textural		Franco-arenosa	Franco arcillosa- arenosa	Franco arenosa	Franco arcillosa- arenosa	Muy arcillosa	Franca	Franco- arenosa
		IX	VI	IX	VI	I	VII	IX
Permeabilidad		2	4	2	4	5	3	2
Estructura		3	2	3	3	2	2	3
Erodabilidad, K (nomograma de Wischmeier, Johnson y Cross, 1971 <i>cit.</i> en Morgan, 1995)		0.33	0.41	0.40	0.36	0.50	0.58	0.34
Valor de pertenencia en la erosión hídrica acelerada		0.5	0.8	0.8	0.6	0.9	1	0.5



SIMBOLOGÍA

- PARTEAGUAS; CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO
- LOCALIDAD

0 5 10 20 Km

1:250,000

PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD83, ZONA 14N

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

VALORES DE PERTENENCIA POR LÓGICA DIFUSA

2008

7.2. RESULTADOS DE LAS OPERACIONES APLICADAS EN EL ANÁLISIS POR LÓGICA DIFUSA

7.2.1. PRODUCTO DIFUSO

Cada valor de ponderación difuso, en el que se clasificó cada clase de cada una de las variables, representa el nivel de relación entre variables en el proceso de erosión hídrica acelerada, toda vez que se aplicó el cálculo de producto por lógica difusa.

El resultado indica que los valores de pertenencia (Figura 7.5a), más altos se les encuentra en la porción norte y noroeste de la cuenca y los valores intermedios aparecen en el centro.

Los valores se representan en forma de celdas y no muestran una diferencia en el tipo de evento erosivo, ni de la intensidad con que el proceso de erosión se presenta sobre el terreno, lo que significa que las celdas solo representan a los valores de pertenencia conforme se fueron integrando las variables en el análisis del producto algebraico. En el mapa de la Figura 7.5a, solo se ha destacado con colores a los valores medios (amarillo) y altos (rojo). Un valor bajo indica que las variables presentan poca interacción por lo que se representan en color blanco.

El relieve es de tipo laderas de montaña medias y altas con clave Lmm2, Lmm4, Lmb6, Lmm10, Lma1, Lma3, Lma11, Lma12, Lma16 y Lma17, que en lo general se describen como de material de origen endógeno-de rocas volcánicas y tectonizadas.

Las rocas son primordialmente riolitas, dacitas, andesitas, basaltos, ignimbritas y tobas riolíticas y dacíticas. Esto representa al terreno como una serie de materiales duros y masivos, sobre la porción norte y este de la cuenca; estos materiales influyen en la intensidad de los procesos erosivos por acción del agua, ya que al eliminarse el material suelto del suelo, se deja al descubierto la roca madre. La transformación del relieve provocada de esta manera, genera una aceleración en la degradación ecológica del terreno, dejándolo sin capacidad de recuperación.

Las laderas localizadas en la parte norte de la cuenca, muestran que las longitudes e inclinaciones de las laderas acentúan la fuerza con que inciden los flujos superficiales, más aún cuando la actividad humana ha provocado la eliminación de la vegetación natural para dar paso a la agricultura de temporal, e incluso esta eliminación de la vegetación se debe a la explotación forestal del área.

La edafología de la porción norte y este, indica que la erodabilidad del suelo presenta valores de pertenencia de moderados a altos, debido a las características físicas de los suelos

(Tabla 7.4), ya que las texturas indican que van desde muy arcillosos hasta franco-arenosos. Lo que les confiere valores de erodabilidad que van desde los 0.33 hasta los 0.58 (factor K). De acuerdo con Morgan (1995) y Siebe *et al.* (1996), consideran a los valores de erodabilidad que están entre 0.3 a 0.5 como medios y de 0.5 a 0.7 como altos, lo que significa que entre más grande es el valor del factor K el suelo responde rápido al estímulo de un agente erosivo, de forma que el terreno se degrada con mayor facilidad.

7.2.2. SUMA DIFUSA

La operación de suma algebraica difusa obtiene un valor mayor al valor asociado, por lo que se considera como incrementado. Si hay dos o más variables que apoyen a la hipótesis, se refuerza el resultado y el mapa final es una combinación de los demás. Si los valores de las variables son iguales o cercanos al cero, el resultado final será un valor negativo. Si el valor de cada variable es igual o cercano a la unidad, el resultado final será cercano o igual a la unidad. Representando la asociación de los valores de cada clase para las variables, con mayor detalle.

El resultado de la suma difusa (Figura 7.5b), se representa en un mapa con valores que ilustra el relieve de la cuenca. Estos valores destacan que, al igual del resultado del producto difuso las laderas de montaña, altas y medias, y algunos lomeríos medios son los que indican una mayor relación de coincidencia entre variables.

Su ubicación es en la parte norte y al este de la cuenca, en la Sierra de Guanajuato. En algunas vertientes localizadas sobre la fosa tectónica La Sauceda y en porciones de terreno dedicadas a la agricultura (cercanos a las localidades de El Cubo, Peregrina, Campuzano, Santa Teresa), lo que sugiere que en estos terrenos ocurre una relación más estrecha entre variables.

Los materiales que conforman el terreno de la porción centro y este de la cuenca, son de origen volcánico de tipo tobas riolíticas, dacíticas y basaltos, aunque en algunas porciones aparecen areniscas y conglomerados. Las rocas indican por lo tanto que la dureza de los materiales, provoca que el suelo sea poco desarrollado e incluso de espesor limitado. De manera que la presencia de procesos de erosión hídrica acelerada provoca impactos negativos al paisaje, que acentúan la degradación del terreno. Esto se acentúa, debido a que la inclinación y longitud de la ladera es de tipo inclinada a escarpada, y de larga a muy larga, lo que significa que las variables evaluadas inciden estrechamente con la presencia de eventos erosivos acelerados.

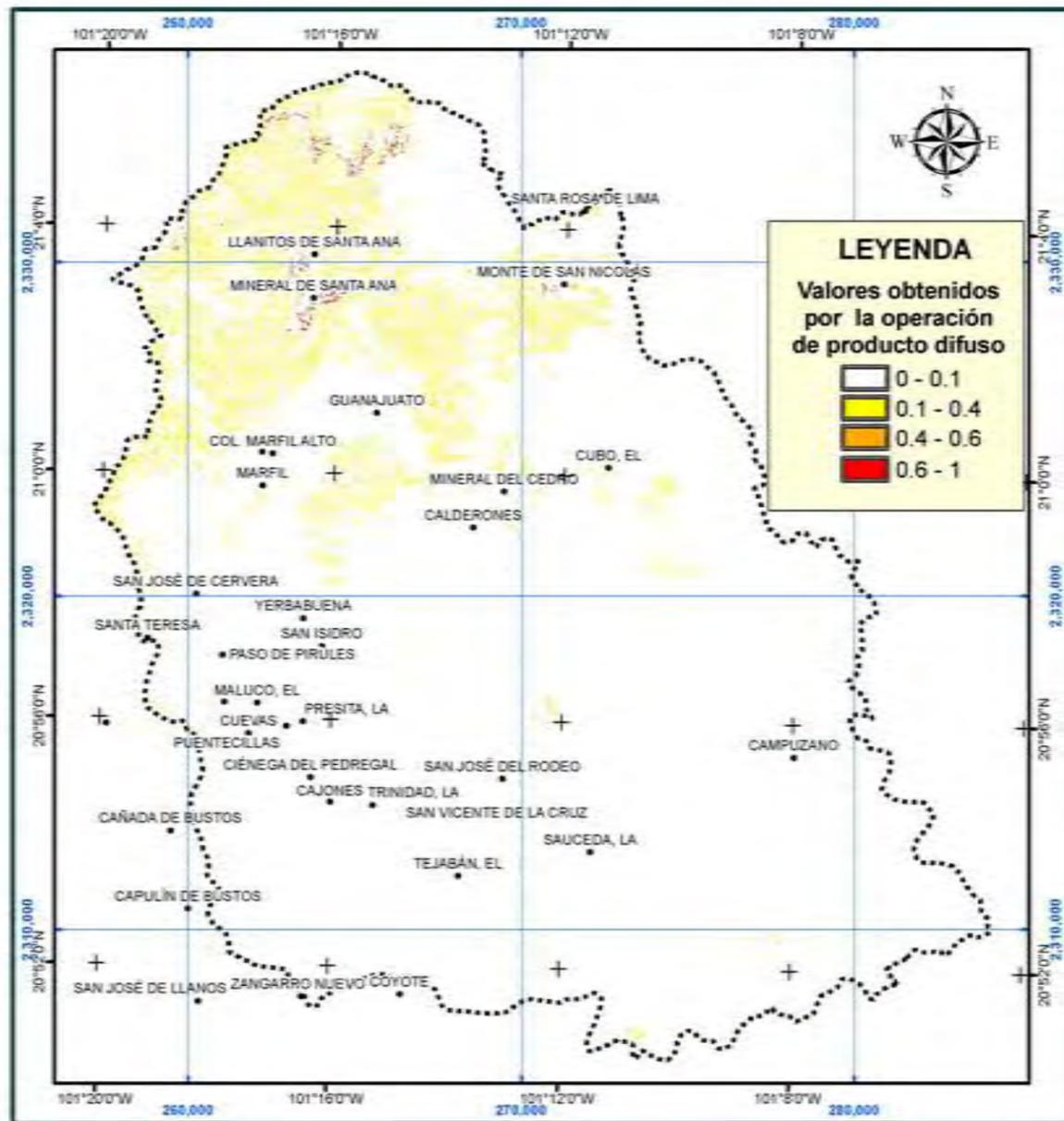


Figura 7.5a. Resultado de la operación producto difuso.

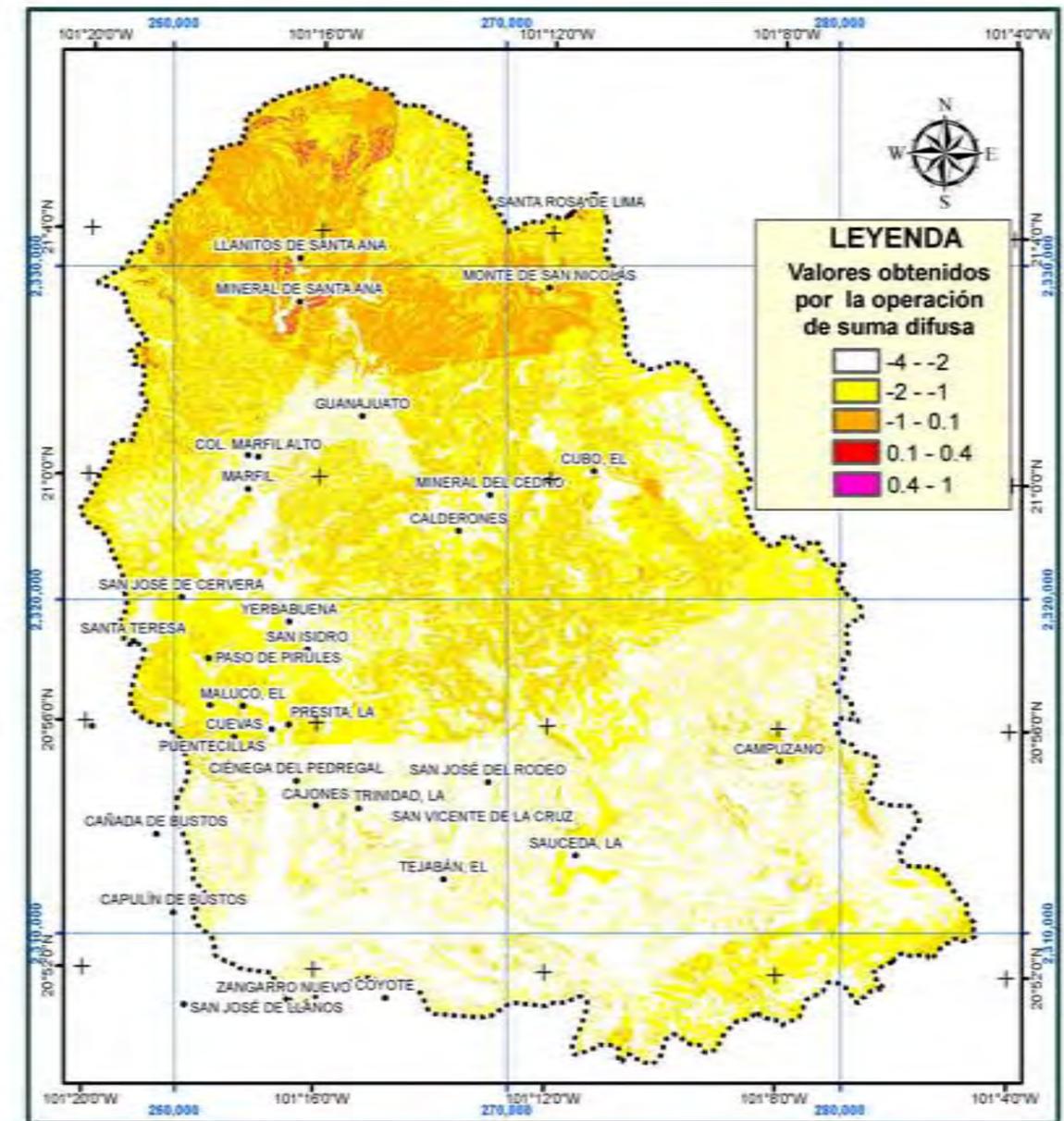
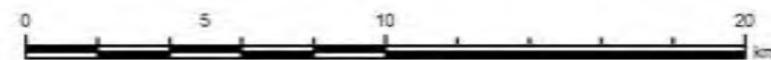


Figura 7.5b. Resultado de la operación suma difusa.

SIMBOLOGÍA

..... PARTEAGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO



1:200,000

PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD27, ZONA 14N



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

2008

7.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS POR LÓGICA DIFUSA CON LA INFORMACIÓN DEL MAPA MORFODINÁMICO

Las clases en las que se identificó la erosión hídrica acelerada, quedaron representadas en el mapa geomorfológico morfodinámico, e indica que el tipo de erosión laminar ocupa 307.76 km² del área de estudio, esto significa que ocupa la mayor superficie (no se clasifica en intensidades). El área de los microcauces es de 50.23 km². El tipo de erosión por cárcavas representa 61.45 km², del área de la cuenca.

7.3.1. RESULTADO DEL PRODUCTO DE VALORES DIFUSOS CON LA INFORMACIÓN MORFODINÁMICA

Del análisis de la coincidencia entre resultados de la operación por producto difuso y la información morfodinámica, se obtuvo la Tabla 7.5, que indica la relación que se obtuvo por superficie en la cuenca.

La superficie indicada en la Tabla 7.5, para la clase de erosión por cárcavas es de 3.24 km², y de acuerdo a la superficie reportada en el mapa geomorfológico morfodinámico representa el 5.3%. El área que abarca la coincidencia para los microcauces es de 2.74 km², y que de acuerdo a la cobertura de la información morfodinámica representa el 5.4%. Mientras que la erosión laminar coincide en 12.85 km², esta representa el 4.2% de la información del mapa morfodinámico.

Estos datos ayudan a explicar que, el resultado obtenido a través del producto difuso presenta un nivel de coincidencia muy bajo con respecto a los datos registrados en el mapa geomorfológico morfodinámico.

La distribución en el relieve, donde se ubica esta coincidencia, se muestra en la Figura 7.6a y ocurre en la porción Norte y Este de la cuenca. En la porción norte se considera, geológicamente, como la más antigua y de materiales como dioritas, tonalitas y esquistos. El mapa morfodinámico indica, que en esta parte norte, los eventos erosivos de tipo microcauces y cárcavas presentan mayor cobertura; mientras que la erosión laminar es la que ocupa la mayor parte de la superficie Norte y Este. Las localidades que sufren directamente esta problemática son La Concepción, Mesa Cuata, Agua Colorada y Llanitos de Santana.

En la porción Este, los materiales cambian de composición ya que aparecen riolitas, conglomerado rojo, dacitas, andesitas y tobas. Los eventos erosivos de mayor cobertura son de tipo laminar; y muy limitadas en extensión, aparecen algunos microcauces y cárcavas, sobre

todo en la frontera entre el bosque y los pastizales, ya que los flujos superficiales acumulados en las áreas forestales impactan con fuerza erosiva al terreno desprotegido de vegetación. Esto ocurre en la localidad de Peregrina, El Cubo, Santa Rosa de Lima y Monte de San Nicolás. En la porción forestal no se identificaron eventos erosivos, por tal motivo no se generan coincidencias entre el resultado del producto difuso y la información morfodinámica.

Tabla 7.5. Relación de coincidencia entre el resultado de producto difuso y la información morfodinámica

CLASE DE COINCIDENCIA	ÁREA, Km ²	RELACIÓN CON EL ÁREA DE LA CUENCA, %
NULA	471.81	96.1
LAMINAR	12.85	2.6
MICROCAUCES	2.74	0.6
CÁRCAVAS	3.24	0.7
	490.64	99.3

7.3.2. RESULTADO DE LA SUMA DE VALORES DIFUSOS CON LA INFORMACIÓN MORFODINÁMICA

Los valores de coincidencia entre la suma difusa y la información morfodinámica, ayudaron a obtener los datos de superficie listados en la Tabla 7.6. Se encontró que en lo global, el 55.8% de la información coincide entre ambos mapas.

En el análisis de la suma difusa, cada valor de clase se relaciona por incremento y expresan datos relacionados con base a las clases, de forma que son más representativos en el nivel de respuesta de cada variable.

La superficie indicada en la Tabla 7.6, para la clase de erosión por cárcavas es de 38.81 km², y de acuerdo a la superficie reportada en el mapa geomorfológico morfodinámico representa el 63%. El área que abarca la coincidencia para los microcauces es de 31.34 km², y que de acuerdo con la información morfodinámica representa el 62%. Mientras que la erosión laminar coincide en 203.52 km², esta representa el 66% de la información del mapa morfodinámico.

Estos datos indican que la suma difusa alcanza un nivel aceptable de coincidencia con respecto a la información morfodinámica, esto ayuda a explicar el nivel de pertenencia de cada variable en el peligro de erosión.

En la Figura 7.6b, se ilustra cómo se distribuyen los valores alcanzados de la suma difusa. Los valores más altos se presentan en la porción Centro, Norte y Este de la cuenca,

coincidiendo con los datos de erosión por cárcavas y microcauces. De forma más dispersa, el terreno ubicado al Centro y Sur del área de estudio aparece como el que presenta mayor relación con la erosión laminar.

Tabla 7.6. Relación de coincidencia entre el resultado de suma difusa y la información morfodinámica.

CLASE DE COINCIDENCIA	ÁREA, Km ²	RELACIÓN CON EL ÁREA DE LA CUENCA, %
NULA	216.97	44.2
LAMINAR	203.52	41.5
MICROCAUCES	31.34	6.4
CÁRCAVAS	38.81	7.9
	490.64	92.1

Las localidades más cercanas a estos terrenos degradados son, en la parte Norte, Llanitos de Santana, Santa Rosa de Lima, Mineral de Santana, Mesa Cuata y Monte San Nicolás; en el Centro, Marfil, Marfil Alto, El Cubo, Mineral del Cedro, Calderones y Peregrina; en el Sur, San José de Rodeo, La Saucedá y Puenteceillas; al Este, Campuzano.

La coincidencia alcanzada por el resultado de la suma difusa, solo representa las relaciones entre variables, que explican cuáles son las que intervienen en la aceleración del proceso de erosión hídrica acelerada.

En la porción Norte de la cuenca, se encontró que las relaciones entre las variables de longitud e inclinación de la ladera, erosividad de la lluvia y de erodabilidad del suelo y del uso del suelo y cubierta vegetal, son las que intervienen en el proceso de erosión

En la parte del centro de la cuenca, destacan en influencia las variables longitud e inclinación de la ladera, y de erodabilidad del suelo. Al Sur de la cuenca, destacan por su influencia en la intensificación del proceso de erosión hídrica las variables de erodabilidad y uso del suelo y cubierta vegetal. Hacia el Este del área de estudio, las relaciones de las variables inclinación y longitud de ladera son las que intervienen con intensidad en el proceso de erosión hídrica. En el oeste de la cuenca influyen las variables de erodabilidad y uso del suelo.

Es de destacar sólo en la parte Norte de la cuenca llega a influir la fuerza de lluvia para acelerar el proceso de erosión.

Esto permite explicar la forma en que se está generando el proceso de erosión hídrica acelerada, y conocer cada relación de variables ayuda a detallar acciones que permitan incidir con prontitud en la remediación o mitigación del fenómeno.

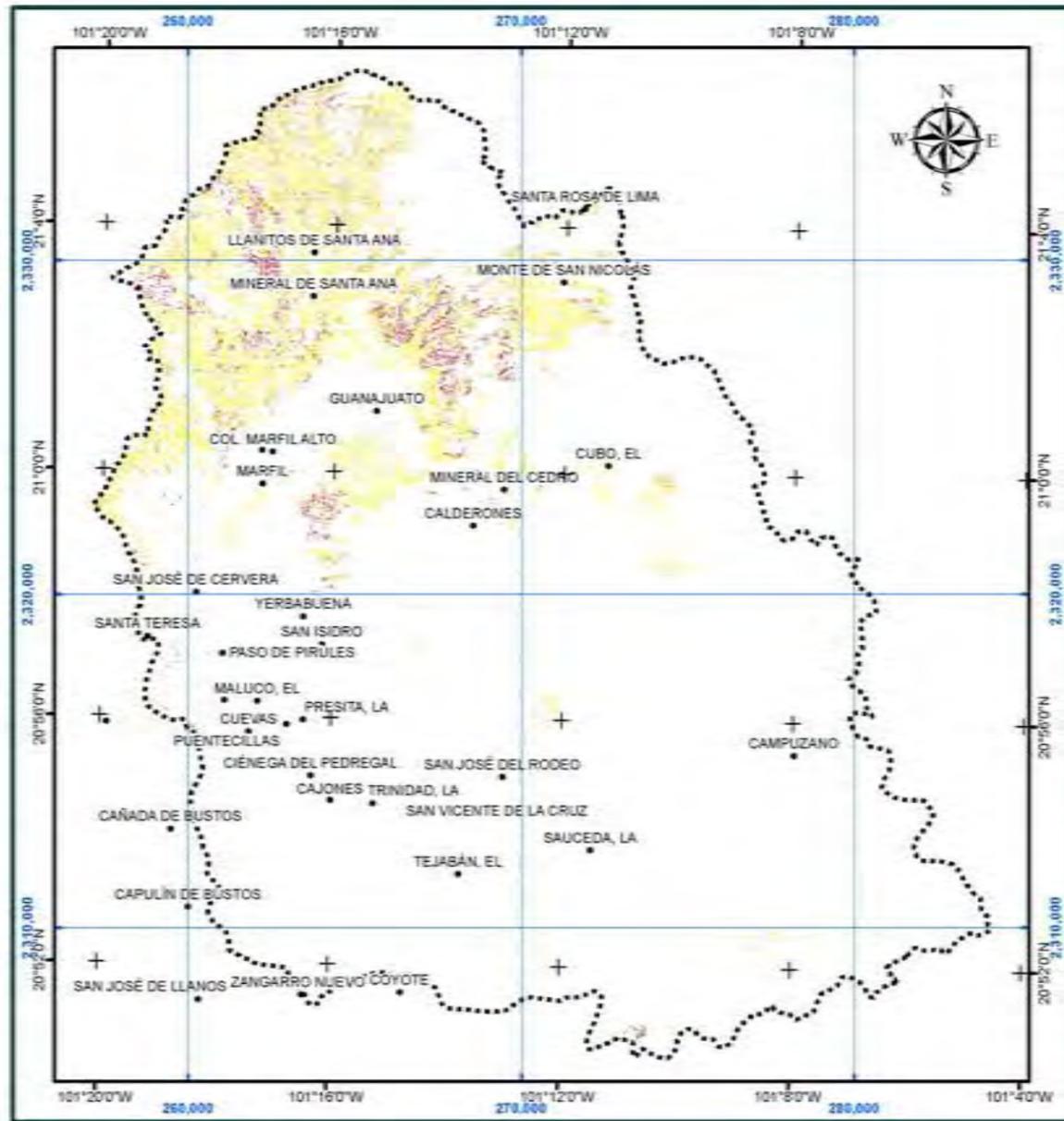


Figura 7.6a. Coincidencia entre valores de producto difuso con el de rasgos morfodinámicos

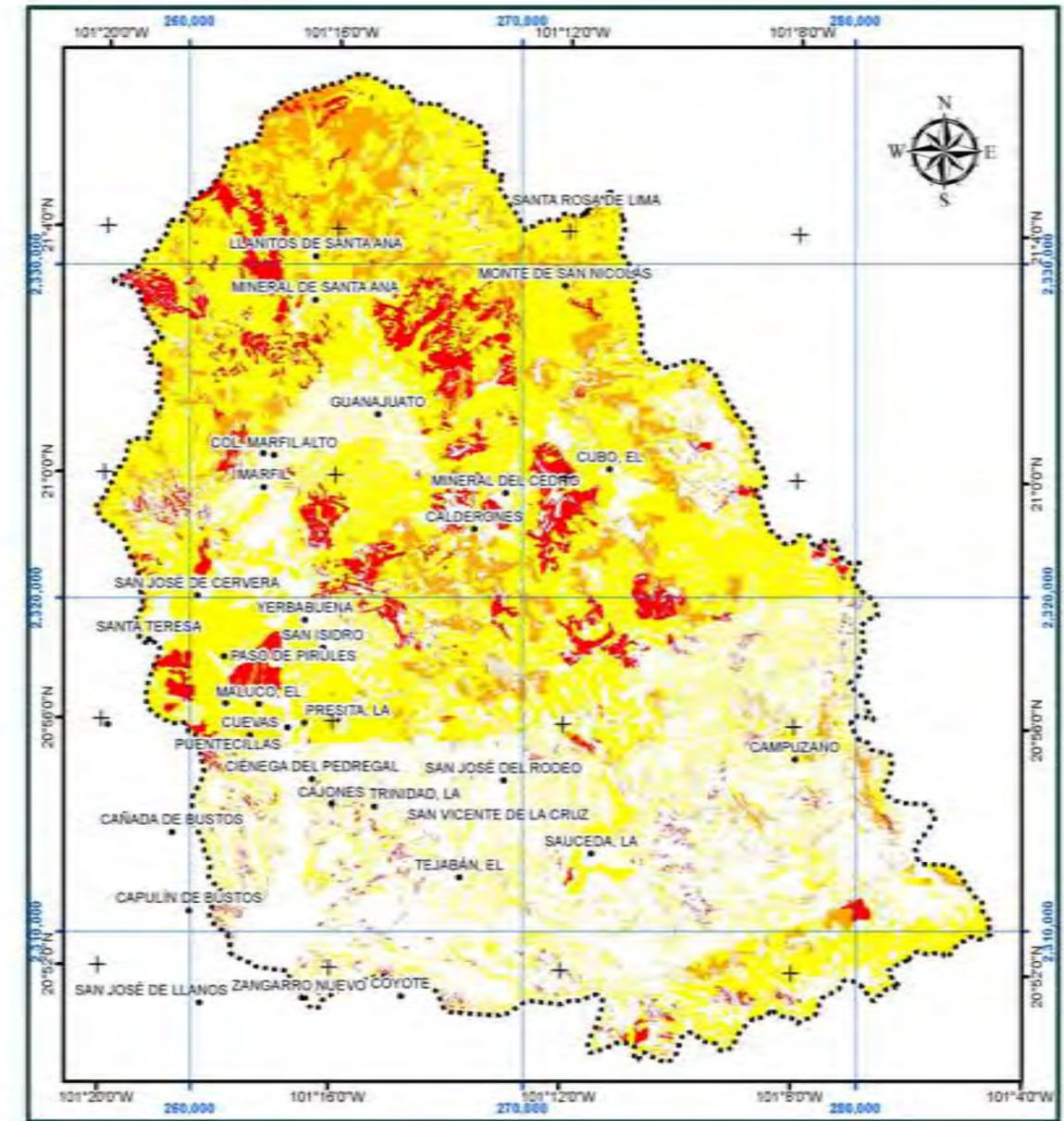


Figura 7.6b. Coincidencia entre valores de suma difusa con el de rasgos morfodinámicos

SIMBOLOGÍA

..... PARTEAGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO GUANAJUATO

LEYENDA

Coincidencia por clase de proceso erosivo

- NULA
- LAMINAR
- CÁRCAVAS
- MICROCAUCES



1:200,000

PROYECCIÓN UTM, DATUM NAD27, ZONA 14N



8. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha explicado la forma en que las variables biofísicas de la cuenca del río Guanajuato interaccionan, de forma que intensifican los eventos de erosión hídrica acelerada del suelo. Para explicar esta dinámica entre variables se aplicó el inventario morfodinámico y el análisis de las variables biofísicas, utilizando como método de ponderación las operaciones de lógica difusa.

Las variables evaluadas son la inclinación y la longitud de la ladera, el uso del suelo y la cobertura vegetal, la erosividad de la lluvia y la erodabilidad del suelo ya que son los factores que representan a la mayoría de las propiedades que interaccionan en el proceso de erosión acelerada del suelo.

Con el levantamiento geomorfológico morfogenético de la cuenca se encontró que el 55% de las unidades son de origen endógeno, mientras que el 45% son de origen exógeno.

Los lomeríos ocupan el 19.3% de la superficie total del área de estudio; mientras que las laderas de montaña ocupan el 78.1%. Estos últimos ocupan la parte centro-norte y este del territorio, así como el extremo sur.

Las unidades morfogenéticas con mayor amplitud del relieve se localizan al norte de la cuenca, constituidas de riolita, basalto, tobas riolíticas, andesitas y material volcanosedimentario. Por ello la interacción entre algunos factores como, la cantidad de lluvia-geometría de ladera-cobertura vegetal es muy importante, ante la presencia de eventos erosivos hídricos acelerados. Mientras que, en los lomeríos la relación de las variables de la geometría de ladera-cobertura vegetal, han permitido explicar la dinámica de los procesos de erosión hídrica acelerada.

El análisis de datos de cantidad de lluvia, permitió representar su distribución espacial, en forma de intensidad de tormenta así como de su erosividad. Para ello, se encontró que en las laderas de montaña alta, ubicadas al norte y extremo sureste de la cuenca, son las áreas que contienen la mayor cantidad de lluvia, por intensidad, altura y energía cinética (erosividad).

La relación entre lluvia total y lluvia efectiva ha permitido localizar las áreas de la cuenca con mayor cantidad de agua disponible en superficie, en forma de caudal. El agua que circula sobre superficie interviene en la aceleración de los procesos de erosión. De tal manera que la porción centro-norte y extrema sureste del área de estudio contienen los valores más altos de lluvia en exceso, misma que circula sobre el terreno en forma de flujo concentrado y laminar.

La fotointerpretación de ortofotos a escala 1:20,000, ayudó a actualizar la información de uso del suelo y cobertura vegetal, lo que permitió definir la manera en que ha evolucionado la superficie de la cuenca con base en la influencia de la actividad humana. De esta manera, el identificar las áreas modificadas por esa actividad ha permitido evaluar la erosión hídrica acelerada diferenciando al agente que está influyendo de modo determinante (natural o antrópico).

El mapeo inventario de procesos geomorfológicos se obtuvo a partir de la fotointerpretación de ortofotos a escala 1:10,000. La clasificación realizada se obtuvo de delimitar los rasgos de erosión en el terreno. La mayor cantidad de rasgos de erosión hídrica acelerada, de tipo microcauce y cárcavas, con intensidades de leve, moderada a fuerte, se localizan en la parte norte y noreste de la cuenca, y con menor extensión están en el centro y sureste del área.

Para evitar, la subjetividad en la evaluación de las variables, se aplicó el método de lógica difusa. Esto permitió con mayor certidumbre definir las variables que intervienen en la aceleración de los procesos erosivos hídricos. Asimismo, permite integrar en el análisis a las variables que presentan información incompleta o con niveles de incertidumbre bajos. Cada variable evaluada se dividió en clases, cada clase toma un valor nivel definido como valor de pertenencia, es decir, explica si la clase interviene mucho o poco para que se generen ó se aceleren los procesos de erosión hídrica.

En la evaluación de las variables por lógica difusa, se aplicó la suma y el producto de los valores difusos, como métodos de cálculo. El resultado obtenido por el producto de valores difusos arroja una coincidencia del 4% con respecto a la información morfodinámica. Mientras que el resultado obtenido por la suma de valores difusos, muestra que hay una coincidencia del

56%. Estos datos de coincidencia explican que la suma de valores difusos es la que explica mejor la relación entre variables.

Los resultados de coincidencia, obtenidos para los mapas morfodinámico y suma difusa, hacen referencia exclusiva por tipo de proceso de erosión acelerada (microcauce, cárcava y barranco). Esto debido a que es difícil diferenciar cada proceso con base a la intensidad de cada uno de los procesos.

A partir de los resultados obtenidos, por la comparación entre el mapa morfodinámico y el de suma por lógica difusa, se encuentra que los procesos de erosión hídrica acelerada, que se localizan en la parte norte de la cuenca se explican por la relación entre las variables de longitud e inclinación de la ladera y el valor de erosividad de la lluvia. En áreas donde la cobertura vegetal es de bosque o matorral, esta relación disminuye drásticamente y se incrementa si hay cobertura vegetal por pastizales o por actividad agrícola o minera. Las laderas que presentan inclinaciones mayores a los 8° , o de longitudes mayores a 60 m, son las que se relacionan con los eventos erosivos acelerados.

En la porción central de la cuenca, las relaciones entre variables que provocan la presencia de eventos erosivos acelerados se deben al uso del suelo, inclinación y longitud de la ladera, y la erodabilidad del suelo.

Se detectaron dos formas principales de procesos erosivos hídricos dentro de la cuenca, una debido a la presencia de flujos concentrados localizados en las laderas de montaña de las áreas norte y sureste de la cuenca. Las características de estos flujos hídricos, están determinadas por la presencia de laderas con inclinaciones medias a pronunciadas, de longitudes media a largas y con cobertura vegetal escasa o nula. La otra forma de erosión, se debe a flujos superficiales de tipo laminar y por salpicadura ocasionada por la erosividad de las tormentas. La longitud e inclinación de la ladera influyen de manera moderada. El terreno de la cuenca que presenta este tipo de eventos se localiza al centro y este, sobre los lomeríos que presentan un uso del suelo de tipo agrícola, urbano, y con cobertura vegetal de pastizal.

Las actividades humanas se conjugan con las variables naturales para incidir en la presencia de eventos erosivos hídricos acelerados, ya que los caminos y la actividad minera son los agentes que influyen en la aceleración de la erosión, esta influencia se encuentra muy localizada en el este de la cuenca, en el entorno de las minas El Cubo, Las Torres y Peregrina. En el norte, en los alrededores de las localidades de La Concepción, Agua Colorada, Mesa Cuata, Santa Rosa de Lima y Monte San Nicolás. Al sureste sobre las localidades de Rincón del Estaño, Campuzano, La Laguna y la Sauceda. Todos estos sitios han requerido de caminos de terracería para lograr la comunicación terrestre, por lo que al crearlos y darles mantenimiento se ha provocado la aceleración de los eventos de erosión.

Los trabajos futuros se pueden enfocar a cuantificar el material removido por acción de la erosión hídrica, para hacer una retrospectiva de los procesos que inciden sobre la cuenca. Hay embalses que se localizan en puntos diversos, usados con fines de almacenamiento de agua para consumo humano o como control de avenidas. Estas represas fueron creadas en diversas épocas, por lo que ofrecen datos de eventos de erosión extremos y normales.

BIBLIOGRAFÍA

- Alves, Angela; de Souza, Flavio Joaquín; Marques, Marcia. 2005. *Evaluación de erosión potencial de suelos: un análisis comparativo entre Lógica Fuzzy y el método USLE*. Simposio Anual Brasileño de Sensores Remotos, Goiania, Brasil. INPE. P. 2011-2018.
- An, Ping; Moon, Wooil M.; Rencz, Andy. December 1991. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*. Vol 27, No. 1, P. 1-11.
- Aparicio Mijares, Francisco Javier. 2003. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México.
- Aranda-Gómez, José Jorge; Aranda-Gómez, José Manuel; Nieto-Samaniego, Ángel Francisco. 1989. *Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central*. UNAM, Instituto de Geología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 8, núm. 1, p. 33-46.
- Bonham-Carter, Graeme F. 1996. *Geographic Information Systems for Geoscientists. Modelling with GIS*. Elsevier.
- Bravard, J.-P.; Landon, N.; Peiry, J.-L.; Piegay, H. 1999. *Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers*. *Geomorphology* 31. Pgs. 291-311. Elsevier.
- Caire Lomelí, Jorge. 2002. *Cartografía básica*. Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM. México, D. F.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. Secretaría de Gobernación. 2004. *Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. México. D. F.
- Chmelová, Renata, Šarapatka, B. 2002. *Soil erosion by water: contemporary research methods and their use*. *Geographica*. Vol. 37. Pgs. 23-29.
- Campos Aranda, Daniel Francisco. 1984. *Procesos del ciclo hidrológico*. Tomo 1/2. Volumen 1. Editorial Universitaria Potosina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos Aranda, Daniel Francisco; Gómez de Luna, Rubén. 1990. *Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos*. Ingeniería hidráulica en México. México.

- Cannon, Susan H.; Kirkham, Robert M.; Parise, Mario. 2001. *Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado*. Geomorphology 39. Pgs. 171-188. Elsevier.
- Chen, Cheng-Lung. 1983. *Rainfall intensity-duration-frequency formulas*. Journal of hydraulic Engineering, Vol. 109, No. 12.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. 1994. *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Santa fe de Bogotá, Colombia.
- Consejo de los Recursos Minerales (COREMI). 1998. *Carta geológico-minera F14-C43, Guanajuato, Gto.* Pachuca, Hgo. México.
- Consejo de los Recursos Minerales (COREMI). 2002. *Carta geológico-minera F14-C53, Aldama, Guanajuato*. Pachuca, Hgo. México.
- Correo, el diario del Estado de Guanajuato. Portada. Septiembre 15, 2003. Año IV, Núm 1779,
- Crosta, G. B.; Dal Negro, P.; and Frattini, P. 2003. *Soil slips and debris flows on terraced slopes*. Natural Hazards and Earth System Sciences 3: 31–42. European Geosciences Union.
- Dombrowsky, Wolf R. 1995. *Again and again: Is a disaster what we call 'Disaster'?* Some conceptual notes on conceptualizing the object of Disaster Sociology. International Journal of Mass Emergencies and Disasters. Vol. 13, núm. 3, pp. 241-254.
- Edwards, John D. 1955. *Studies of Some Early Tertiary Red Conglomerates of Central Mexico, a shorter contribution to general geology*. Geological Survey Professional Paper 264-H. Department of the Interior. United States Government Printing Office, Washington.
- EPA, Environmental Protection Agency of United States. 1998. *Estimation of infiltration rate in the vadose zone: application of selected mathematical models. Vol. II*. National Risk Management, Research Laboratory. EPA/600/R-97/128b.
- Escalante Sandoval, Carlos A.; Reyes Chávez, Lilia. 2002. *Técnicas en hidrología*. México. UNAM. Facultad de Ingeniería, 298 p.
- Escalante Sandoval, Carlos A.; Reyes Chávez, Lilia. 2004. *Influencia del tamaño de muestra en la estimación del factor de lluvia R*. Inf. Tecnol. [online]. Vol. 15, No. 4 [citado 24 enero 2007], p. 105-110. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642004000400015&Ing=es&nrm=iso. ISSN 0718-0764.
- FAO. 1992. *Erosión de suelos en América Latina*. Basado en los trabajos presentados en el Taller sobre la Utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Evaluación de

- la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial. Santiago, Chile. Proyecto GCP/RLA/107/JPN1992.
- FAO. 1997. *Manual on integrated soil management and conservation practices*. Methods for Soil Conservation held at IITA, Ibadan, Nigeria, Afr.
- García, E. 1981. *Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, 3ª. Ed.* Larios, México, 153 págs.
- Garmendia, Luis. 2005. The evolution of the concept of fuzzy measure. Universidad Complutense of Madrid, Spain.
- GEG. 1999. *Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de Guanajuato*. Instituto de Ecología. Gobierno del Estado de Guanajuato.
- GEG. 2001. *Atlas de Riesgos del Estado de Guanajuato*. Coordinación Estatal de Protección Civil. Gobierno del Estado de Guanajuato. FOSEG, Secretaría de Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Gorte, B. G. H.; Koolhoven W. 1990. *Interpolation between isolines based on the Borgfors distance transform*. ITC Journal. ITC, Enschede, Netherlands.
- Guiza, Jr., Reinaldo; Rendon C., Federico; Baltierra, B., J. Jesús. 1949. *Estudio Geológico del distrito minero de Guanajuato, Gto.* Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales. Boletín número 22. México, D. F.
- Guzzetti, F.; Reichenbach P.; Cardinali M.; Ardizzone F., and Galli M. 2003. *The impact of landslides in the Umbria region, central Italy*. Natural Hazards and Earth System Sciences (2003) 3: 469–486. European Geosciences Union.
- Hart, M. G. 1986. *Geomorphology: pure and applied*. Allen & Unwin (Publishers) Ltd.
- Havenith H.-B.; Strom A.; Jongmans D.; Abdrakhmatov K.; Delvaux D.; and Tréfois P. 2003. *Seismic triggering of landslides, Part A: Field evidence from the Northern Tien Shan*. Natural Hazards and Earth System Sciences 3: 135–149. European Geosciences Union.
- Hernández, A. M. E. 1996. *Evaluación de la erosión de los suelos de la Subcuenca del Río Guanajuato*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 101p.
- Hewitt, K. 1983. *The idea of calamity in a technocratic age*. Interpretations of calamity. Boston. Allen & Unwin.

- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1977. *Carta de uso del suelo y vegetación escala 1:50,000, clave F14C42, F14C43, F14C52 y F14C53*. Aguascalientes, Ags, Méx.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1979. *Carta edafológica escala 1:50,000, clave F14C42, F14C43, F14C52 y F14C53*. Aguascalientes, Ags., Méx.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1983. *Carta Geológica F14-10 y F14-7*. Escala 1:250,000. Guanajuato-Querétaro. Ags. Méx.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993. *Ortofotos escala 1:20,000, de clave principal F14C42, F14C43, F14C52 y F14C53*. Aguascalientes, Ags, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1998a. *Carta topográfica escala 1:50,000, clave F14C42, F14C43, F14C52, F14C53*. Aguascalientes, Ags., Méx.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1998b. *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*. Ags. Méx.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2003. *Ortofotos escala 1:20,000, de clave principal F14C42, F14C43, F14C52 y F14C53*. Aguascalientes, Ags, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2004. *Guía de interpretación Cartográfica: Edafología*. Aguascalientes, Ags., Méx.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2005. *Guía de interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación*. Aguascalientes, Ags, Méx.
- INFO. Instituto de Información para el Desarrollo. Gobierno del Estado de Guanajuato. 2001. *Información Geográfica Digital del Compendio SEIG 2.0*. Guanajuato, Gto.
- INFO. 2002. *Compendio del Sistema Estatal de Información Geográfica 2002. V.3.0*. Guanajuato, Gto.
- Inbar, M.; Tamir, M.; Wittenberg, L. 1998. *Runoff and erosion processes alteration on a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area*. Geomorphology 24. Pg. 17-33. Elsevier.
- ITC. 1997. *The Integrated Land and Water Information System ILWIS Version 2.1 for Windows, User's Guide*, Países Bajos, ITC, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.

- Izaguirre Mendoza, Miguel; Domínguez Corona, Eduardo. 1987. *Mesoclimas de cada municipio del estado de Guanajuato*. Universidad de Guanajuato. 124 p.
- Jaime-Méndez, Héctor. 1984. *Estudio comparativo entre el conglomerado rojo de Guanajuato y la llamada formación Loseros en el área de Guanajuato, Gto.* Tesis profesional de licenciatura. Ing. Minero. Universidad de Guanajuato. Facultad de Minas, Geología y Metalurgia.
- James W. P.; Marinner J.; Reedy M. 1992. *Application of the Green-Ampt infiltration equation to watershed modeling*. Ater Resources Bulletin 28(3), pg. 623-635.
- Johnson, D. W.; Susfalk, R. B.; Gohlz H. L.; Hanson, P. J. 2000. *Simulated effects of temperature and precipitation change in several forest ecosystems*. Journal of Hydrology 235. Pgs. 183-204. Elsevier.
- Kirkby, M. J.; Morgan, R. P. C. 1993. *Erosión de suelos*. Ed. Limusa. Grupo Moriega Editores. México, D. F.
- López-Blanco, Jorge. 1993. *Los sistemas de información geográfica*. La Geografía hoy. Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM. Cd. Universitaria. México, D. F.
- López-Blanco, Jorge. 2005. *Sistemas de Información Geográfica, en estudios de geomorfología ambiental y recursos naturales*. Seminarios. Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM. Cd. Universitaria. México, D. F.
- Martínez Barbosa, Pablo Javier. 1996. *Modelación de cuencas*. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México.
- Martínez-Reyes, Raymundo. 1992. *Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato*. 1:100,000. Instituto de Geología. UNAM. México, D. F.
- Martínez Ruiz, V. J.; Aguirre Hernández, M. A. 1987. *Geohidrología del área San Bartola de Berrios, municipio de San Felipe, Estado de Guanajuato*. Folleto técnico núm. 108. UASLP.
- Monkhouse, F. J. y Wilkinson, H. R. 1968. *Mapas y diagramas*. Ed. Oikos-tau, S. A. Barcelona, España.
- Moore, I. and G. Burch. 1986a. *Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation*. Soil Science Society of America Journal 50.
- Moore, I. and G. Burch. 1986b. *Modeling erosion and deposition: topographic effects*. TRANS of ASAE 29(6).

- Morgan, R. P. C. 1995. *Soil Erosion and conservation*. 2nd es. Longman Group UK Limited.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Williams, J. R.; King, K. W. 2002. *Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000. SWAT*. Grassland, Soil And Water Research Laboratory. Temple, Texas. GSWRL Report 02-01. BRC Report 02-05. Agricultural Research Service. USA.
- Nieto-Samaniego, Ángel Francisco. 1990(1992). *Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato*. UNAM, Instituto de Geología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 9, núm. 2, p. 146-155.
- Nieto-Samaniego, Ángel Francisco; García-Dobarganes Bueno, Juan Esteban; Aguirre-Maese, Ana Laura. 1992. *Interpretación estructural de los rasgos geomorfológicos principales de la Sierra de Guanajuato*. UNAM, Instituto de Geología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 10, núm. 1, p. 1-5.
- Nyssen, Jan; Poesen, Jean; Moeyersons, Jan; Luyten, Edith; Veyret-Picot, Maude; Deckers, Jozef; Haile, Mitiku; Govers, Gerard. 2002. *Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands*. Earth surface processes and Landforms. Núm. 27. Pgs. 1267-1283. Wiley InterScience.
- Ojeda-Macias, Jesús. 1979. *Proyecto de viabilidad de la Mina Sirena 1ª y 2ª alternativa*. Tesis profesional de licenciatura. Ing. Minero. Universidad de Guanajuato. Facultad de Minas, Geología y Metalurgia.
- Olmos Colunga, Javier. 1988. *Estudio de alternativas hidrotermales superficiales de la parte central de la veta madre de Guanajuato, México*. Universidad de Guanajuato. Facultad de Minas, Geología y Metalurgia.
- Ortiz-Hernández, Luis Enrique; Chiodi, Michel; Lapierre, Henriette; Monod, Oliver; Calvet, Philippe. 1990(1992). *El arco intraoceánico alóctono (Cretácico inferior) de Guanajuato-características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas, implicaciones geodinámicas*. UNAM, Instituto de Geología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 9, núm. 2, p. 126-145.
- Panizza, Mario. 1996. *Environmental geomorphology*. ELSEVIER SCIENCE B.V.

- Pareschi, M. T.; Favalli, M.; Giannini, F.; Sulpizio R.; Zanchetta, G.; Santacroce, R. 2000. *May 5, 1998, debris flows in circum-Vesuvian areas (southern Italy): Insights for hazard assessment*. *Geology*; v. 28; No. 7; Pgs. 639-642.
- Peña Monné, José Luis. 1997. *Cartografía geomorfológica básica y avanzada*. Ed. Geoforma Ediciones. España.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin C. 2003. *Gully erosion and environmental change: importance and research needs*. Elsevier. Catena. Vol. 50. Pg. 91-133.
- Quintero-Legorreta, Odranoel. 1992. *Geología de la región de Comanja, Estados de Guanajuato y Jalisco*. UNAM, Instituto de Geología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 10, núm. 1, p. 6-25.
- Ramírez Chávez, Raúl. 1983. *Geología y prospección en el área de Peregrina. Distrito minero de Guanajuato*. Universidad de Guanajuato. Facultad de Minas, Geología y Metalurgia.
- Randall-R., J-A; Saldaña-A, E.; Clark, K. F. 1994. *Exploration in a Volcano-Plutonic Center at Guanajuato, Mexico. Economic Geology*. Vol. 89. No. 8, pp. 1722-1751.
- Renschler, C. S., Harbor, J. 2002. *Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation*. Elsevier. *Geomorphology*. Vol. 47. Pgs. 189-209.
- Ruiz Urbano, Ma. Del Rosario. 2002. *Programa de automatización de los métodos estadísticos en hidrología*. México. UNAM. Facultad de Ingeniería, 34 p.
- Secretaría de Programación y Presupuesto. SPP. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, geografía e Informática. 1980. *Síntesis Geográfica de Guanajuato*. México.
- Siebe, Christina; Jahn, Reinhold; Stahr, Kart. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de los suelos en campo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.
- Smith, Keith. 1996. *Environmental hazards*. Second Edition. Routledge.
- Solís Valdez, Sara. 1997. *Análisis y evaluación de los procesos de erosión y sedimentación en una región de la Sierra de Guanajuato*. Tesis de Maestría en Ciencias (Edafología). Facultad de Ciencias, UNAM.

- Sorriso-Valvo, Marino; Gulla, Giovanni; Antronico, Loredana; Tansi, Carlo; Amelio, Maria. 1999. *Mass-movement, geologic structure and morphologic evolution of the Pizzotto-Greci slope (Calabria, Italy)*. *Geomorphology* 30. Pgs. 147-163. Elsevier.
- Sukhanovski, Yuri P.; Ollesch, Gregor; Khan, Konstantin Y.; MeiBner, Ralph. 2002. *A new index for rainfall erosivity on a physical basis*. *Journal Plant Nutritional Soil Science*. Núm. 165. Pgs. 51-57. Wiley InterScience.
- Szabó, J. 2003. *The relationship between landslide activity and weather: examples from Hungary*. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2003) 3: 43–52. European Geosciences Union
- Tapia-Varela, Guadalupe y López-Blanco, Jorge. 2002. *Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000*. *Revista Mexicana de Ciencias geológicas*, v. 19, núm. 1, p. 50-65.
- Terrones Rincón, T. del Rosario L.; González Sánchez, Cristina; Ríos Ruiz, Santa Ana. 2004. *Arbustivas nativas de uso múltiple en Guanajuato*. Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro. Campo Experimental Bajío. Libro Técnico No. 2. Celaya, Gto., México. 612 p. ISBN 968-5580-63.4
- Thorn, Colin E. 1988. *An introduction to theoretical geomorphology*. Ed. Unwin Hyman. Boston, E. U. A.
- Valdivia, Luis; Castillo, Ma. Del Rocío; Juárez, Armando; Cházaro, Miguel; Quezada, Guadalupe; Vargas, Martín. 2002. *Caracterización de los deslizamientos ocurridos el día 8 de septiembre de 1997 en la Sierra Las Vigas-El Tecuán (porción occidental de la Ribera Norte del Lago de Chapala)*. México en su unidad y diversidad territorial, tomo I. INEGI.
- Van Rompaey, Antón J.; Govers, Gerard; Puttemans, Cindy. 2002. *Modelling land use changes and their impact on soil erosion and sediment supply to rivers*. *Earth Surface Processes and Landforms* Num 27, pgs. 481-494. Wiley InterScience.
- Van Westen, C. J. 1994. *GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia*. En: *Mountain Environments and Geographic Information Systems* (M. F. Price y D. I. Heywood, Eds.). Taylor & Francis, UK-USA. Pp. 135-165.

- Vassallo, Luis Fernando. 1988. *Características de la composición mineralógica de las menas de la veta madre de Guanajuato*. UNAM, Instituto de Geología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 7, núm. 2, p. 232-243.
- Vassallo, Luis Fernando; Martínez-Reyes, Juventino; Pierre Paris, Jean. 1996. *Estructuras circulares y lineales en el distrito minero de Guanajuato, México, y su significado en la prospección minera*. UNAM, Instituto de Geología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 13, núm. 2, p. 252-257.
- Velázquez, A; Mas, J. F.; Díaz-Gallegos, J. R.; Mayorga-Saucedo, R.; Alcántara, P. C.; Castro, R.; Fernández, T.; Bocco, G.; Ezcurra, E.; Palacio, J. L. 2002. *Patrones y tasas de cambio de Uso del Suelo en México*. Instituto de Ecología. SEMARNAT. Gaceta ecológica. Número 62. México, D. F.
- Verstappen and Van Zuidam. 1991. *The ITC System of Geomorphologic Survey*. ITC publication number 10. Second edition. Villanueva del Huerva. Netherlands.
- Zadeh, L. A. 1965. *Fuzzy sets*. Information and control. University of California, Berkeley, California. Vol. 8. pg. 338-353.
- Ziegler, A. D.; Sutherland, R. A.; Giambelluca, T. W. 2001. *Acceleration of Horton overland flow and erosion by footpaths in an upland agricultural watershed in northern Thailand*. Geomorphology 41. Pgs. 249–262. Elsevier.

ANEXO A.

ACOMODO DE LA INFORMACIÓN DE LOS REGISTROS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS, USANDO MACROS EN EXCEL.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									

Figura A.1. Listado de la información meteorológica de la Estación de registro número 4 (observe que el número de filas está agrupado, con el fin de indicar el total de datos ordenados y el valor de -999 indica que este campo no tiene registro).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	
48																																			
49																																			
50																																			
51																																			
52																																			
53																																			
54																																			
55																																			
56																																			
57																																			
58																																			
59																																			
60																																			
61																																			
62																																			
63																																			
64																																			
65																																			
66																																			
67																																			
68																																			
69																																			
70																																			
71																																			
72																																			
73																																			
74																																			
75																																			
76																																			
77																																			
78																																			
79																																			
80																																			
81																																			
82																																			
83																																			
84																																			
85																																			
86																																			
87																																			

Figura A.2. Listado de detalle del acomodo de la información meteorológica de la Estación de registro número 4 (el año de registro final se inserta acomodado en las filas iniciales).

LISTADO DE LAS OPERACIONES AUTOMATIZADAS CON MACROS, PARA ORDENAR LA INFORMACIÓN Y SELECCIONAR EL VALOR MÁXIMO DE PRECIPITACIÓN

Sub PROCESOCOMPLETO()

```
On Error Resume Next
Range("AA10:CN60000").Select
LimpiaContenido
RellenarTodasPorañO_PASO1
RellenarTodasPormes_PASO2
RellenarDiaDelMesYOrdenar_PASO3
PasarTablasyRegistrar_PASO4
PasaTablaAFormato
EnviarDeFormatoARegistrosAcumulados
TITULOS
SelCopia
Range("AA1:IV60000").Select 'Limpieza de memoria de disco
LimpiaContenido
Range("A10").Select
Aviso = "El proceso ha terminado, si deseas verificar los registros este es el orden: de la hoja COPIA, se envia " & _
        " a FORMATO y finalmente a REGISTROS ACUMULADOS" & _
        " ***puedes guardarlo en carpetas para registro por estacion "
MsgBox Aviso, , " PROCESO TERMINADO "
```

End Sub

Sub SelCopia()

```
Sheets("COPIA").Select
Application.CutCopyMode = False
Range("A10").Select
```

End Sub

Sub PasarTablasyRegistrar_PASO4()

```
DiasDelMesRef
FormulasDelMaxDia
```

End Sub

Sub Valorizar()

```
'MESES
Range("BD3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=CONCATENATE("'"AH10:CC'"',R[1]C[-53])"
Range("BD3").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
'AÑOS
Range("AB6").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=CONCATENATE("'"AA10:AE'"',R[-3]C[-25])"
Range("AB6").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
```

End Sub

Sub RellenarTodasPorañO_PASO1()

```
'Formular todos los meses para filtrar solo los datos que ocupamos
'Obtener el valor String del rango a procesar
Valorizar
Limite2 = Range("AB6")
FormularSeparaPorAño
Range("AA10:AE10").Select
Selection.Copy
Range(Limite2).Select
ActiveSheet.Paste
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("BD3").Select
LimpiaContenido
```

```

Range("AB6").Select
LimpiaContenido
End Sub
Sub RellenarTodasPormes_PASO2()

'Formular todos los meses para filtrar solo los datos que ocupamos
'Obtener el valor String del rango a procesar
Valorizar
Limite1 = Range("BD3")
FormulasDefinePorMes
Range("AH10:CC10").Select
Selection.Copy
Range(Limite1).Select
ActiveSheet.Paste
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("BD3").Select
LimpiaContenido
Range("AB6").Select
LimpiaContenido
End Sub
Sub LimpiaContenido()
Selection.ClearContents
End Sub
Sub ValTODOS()

'Colocar valor TODOS en el año a procesar
Range("E2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "TODOS"
End Sub
Sub RellenarDiaDelMesYOrdenar_PASO3()
FormulasDefinePorMes
CONDICIONDIADELMESVACIO
CompletarMes
OrdenaConColumnaYaInsertada
End Sub
Sub FormulasDefinePorMes()

'Definir los valores que aplican por mes, solo formular primer dato...
Range("AH10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-7] =1,RC[-6],\"\")"
Range("AI10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-8] =1,RC[-6],\"\")"
Range("AJ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-9] =1,RC[-6],\"\")"
Range("AK10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-10] =1,RC[-6],\"\")"
Range("AL10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-11] =2,RC[-10],\"\")"
Range("AM10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-12] =2,RC[-10],\"\")"
Range("AN10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-13] =2,RC[-10],\"\")"
Range("AO10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-14] =2,RC[-10],\"\")"
Range("AP10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-15] =3,RC[-14],\"\")"
Range("AQ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-16] =3,RC[-14],\"\")"
Range("AR10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-17] =3,RC[-14],\"\")"
Range("AS10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-18] =3,RC[-14],\"\")"
Range("AT10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-19] =4,RC[-18],\"\")"
Range("AU10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-20] =4,RC[-18],\"\")"
Range("AV10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-21] =4,RC[-18],\"\")"

```

```

Range("AW10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-22] =4,RC[-18],""""")
Range("AX10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-23] =5,RC[-22],""""")
Range("AY10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-24] =5,RC[-22],""""")
Range("AZ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-25] =5,RC[-22],""""")
Range("BA10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-26] =5,RC[-22],""""")
Range("BB10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-27] =6,RC[-26],""""")
Range("BC10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-28] =6,RC[-26],""""")
Range("BD10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-29] =6,RC[-26],""""")
Range("BE10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-30] =6,RC[-26],""""")
Range("BF10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-31] =7,RC[-30],""""")
Range("BG10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-32] =7,RC[-30],""""")
Range("BH10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-33] =7,RC[-30],""""")
Range("BI10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-34] =7,RC[-30],""""")
Range("BJ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-35] =8,RC[-34],""""")
Range("BK10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-36] =8,RC[-34],""""")
Range("BL10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-37] =8,RC[-34],""""")
Range("BM10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-38] =8,RC[-34],""""")
Range("BN10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-39] =9,RC[-38],""""")
Range("BO10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-40] =9,RC[-38],""""")
Range("BP10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-41] =9,RC[-38],""""")
Range("BQ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-42] =9,RC[-38],""""")
Range("BR10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-43] =10,RC[-42],""""")
Range("BS10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-44] =10,RC[-42],""""")
Range("BT10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-45] =10,RC[-42],""""")
Range("BU10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-46] =10,RC[-42],""""")
Range("BV10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-47] =11,RC[-46],""""")
Range("BW10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-48] =11,RC[-46],""""")
Range("BX10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-49] =11,RC[-46],""""")
Range("BY10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-50] =11,RC[-46],""""")
Range("BZ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-51] =12,RC[-50],""""")
Range("CA10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-52] =12,RC[-50],""""")
Range("CB10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-53] =12,RC[-50],""""")
Range("CC10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[-54] =12,RC[-50],""""")
Range("CC11").Select
End Sub
Sub FormulasSepararAño()

```

```

'Filtrar la primer información, separándola por año...
'mes
Range("AA10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-24],RC[-25])"
'tamb
Range("AB10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-25],RC[-24])"
'tmax
Range("AC10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-26],RC[-24])"
'tmin
Range("AD10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-27],RC[-24])"
'preci
Range("AE10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-28],RC[-24],\"")"
Range("AA10").Select 'Reubicarse
End Sub
Sub FormularSeparaPorAño()

```

```

'Formulas que separan por año
Range("AA10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-24],RC[-25],\"\")"
Range("AB10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-25],RC[-24],\"\")"
Range("AC10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-26],RC[-24],\"\")"
Range("AD10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-27],RC[-24],\"\")"
Range("AE10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(R2C3=RC[-28],RC[-24],\"\")"
Range("AE11").Select
End Sub

```

```

Sub CONDICIONDIADELMESVACIO()
'LLAMAR EL NUMERO DE DIA SIEMPRE Y CUANDO NO SEA VACÍO
INSERTARCOLUMNAS
Range("AG10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-32])"
Range("AL10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-37])"
Range("AQ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-42])"
Range("AV10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-47])"
Range("BA10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-52])"
Range("BF10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-57])"
Range("BK10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-62])"
Range("BP10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-67])"
Range("BU10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-72])"
Range("BZ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-77])"
Range("CE10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-82])"
Range("CJ10").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=IF(RC[1] = \"\", \"\", RC[-87])"
Range("CJ11").Select
End Sub

```

```

Sub OrdenaConColumnaYaInsertada()
'
Range("AG10:AK60000").Select
Selection.Sort Key1:=Range("AG10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _

```

```

        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("AL10:AP60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("AL10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("AQ10:AQ60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("AQ10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("AV10:AZ60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("AV10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("BA10:BE60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("BA10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("BF10:BJ60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("BF10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("BK10:BO60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("BK10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("BP10:BT60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("BP10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("BU10:BY60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("BU10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("BZ10:CD60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("BZ10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("CE10:CI60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("CE10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("CJ10:CN60000").Select
        Selection.Sort Key1:=Range("CJ10"), Order1:=xlAscending, Header:=xlNo, OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
        DataOption1:=xlSortNormal
        Range("AG10").Select
End Sub
Sub CompletarMes()
'
    Range("AG10").Select
    Selection.Copy
    Range("AG10:AG30000").Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

    Range("AL10").Select
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Range("AL10:AL30000").Select
    ActiveSheet.Paste
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

    Range("AQ10").Select
    Application.CutCopyMode = False
    Selection.Copy
    Range("AQ10:AQ30000").Select

```

ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("AV10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("AV10:AV30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("BA10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("BA10:BA30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("BF10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("BF10:BF30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("BK10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("BK10:BK30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("BP10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("BP10:BP30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("BU10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("BU10:BU30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("BZ10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("BZ10:BZ30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("CE10").Select
Application.CutCopyMode = False

```

Selection.Copy
Range("CE10:CE30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False

Range("CJ10").Select
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Range("CJ10:CJ30000").Select
ActiveSheet.Paste
Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
Range("AG10").Select
End Sub
Sub INSERTARCOLUMNAS()
'
' INSERTARCOLUMNAS Macro
'
Columns("AL:AL").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("AQ:AQ").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("AV:AV").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("BA:BA").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("BF:BF").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("BK:BK").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("BP:BP").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("BU:BU").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("BZ:BZ").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("CE:CE").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Columns("CJ:CJ").Select
Selection.Insert Shift:=xlToRight
Range("CJ9").Select
End Sub
Sub ELIMINARCOLUMNAS()
'ELIMINAR LAS COLUMNAS QUE SOBRAN
Columns("AL:AL").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("AP:AP").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("AT:AT").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("AX:AX").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BB:BB").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BF:BF").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BJ:BJ").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BN:BN").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BR:BR").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BV:BV").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft
Columns("BZ:BZ").Select
Selection.Delete Shift:=xlToLeft

```

```
End Sub
Sub DiasDelMesRef()
```

```
    Range("CQ9").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "DIAS REF"
    Range("CQ10").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
    Range("CQ11").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "2"
    Range("CQ12").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "3"
    Range("CQ13").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "4"
    Range("CQ14").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "5"
    Range("CQ15").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "6"
    Range("CQ16").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "7"
    Range("CQ17").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "8"
    Range("CQ18").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "9"
    Range("CQ19").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "10"
    Range("CQ20").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "11"
    Range("CQ21").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "12"
    Range("CQ22").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "13"
    Range("CQ23").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "14"
    Range("CQ24").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "15"
    Range("CQ25").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "16"
    Range("CQ26").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "17"
    Range("CQ27").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "18"
    Range("CQ28").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "19"
    Range("CQ29").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "20"
    Range("CQ30").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "21"
    Range("CQ31").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "22"
    Range("CQ32").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "23"
    Range("CQ33").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "24"
    Range("CQ34").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "25"
    Range("CQ35").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "26"
    Range("CQ36").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "27"
    Range("CQ37").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "28"
    Range("CQ38").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "29"
    Range("CQ39").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "30"
    Range("CQ40").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "31"
    Range("CQ41").Select
End Sub
```

```

Sub FormulasDelMaxDia()
'
Range("AK43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("AK44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[58],59,FALSE)"
Range("AP43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("AP44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[53],54,FALSE)"
Range("AU43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("AU44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[48],49,FALSE)"
Range("AZ43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("AZ44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[43],44,FALSE)"
Range("BE43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("BE44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[38],39,FALSE)"
Range("BJ43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("BJ44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[33],34,FALSE)"
Range("BO43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("BO44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[28],29,FALSE)"
Range("BT43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("BT44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[23],24,FALSE)"
Range("BY43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("BY44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[18],19,FALSE)"
Range("BY45").Select
ActiveWindow.SmallScroll ToRight:=20
Range("CD43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("CD44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[13],14,FALSE)"
Range("CI43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("CI44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[8],9,FALSE)"
Range("CN43").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=MAX(R[-33]C:R[-3]C)"
Range("CN44").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(R[-1]C,R[-34]C:R[-4]C[3],4,FALSE)"
Range("CN45").Select
Range("AG43:CN44").Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("AG43").Select
Application.CutCopyMode = False
End Sub
Sub PasaTablaAFormato()
Range("AG10").Select
Range("AG10:CN44").Select
Selection.Copy
Sheets("FORMATO").Select
Range("B7").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Sheets("COPIA").Select
Range("AG3:AG4").Select

```

```

Application.CutCopyMode = False
Selection.Copy

Sheets("FORMATO").Select
Range("B2:B3").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Sheets("COPIA").Select
End Sub
Sub EnviarDeFormatoARegistrosAcumulados()
Sheets("FORMATO").Select
Rows("1:46").Select
Selection.Copy
Sheets("REGISTROS ACUMULADOS").Select
Rows("1:1").Select
Selection.Insert Shift:=xlDown
Sheets("COPIA").Select
End Sub
Sub TITULOS()
Range("AG3").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
"=CONCATENATE(""ESTACION CLIMATOLOGICA NUMERO: "" ,R[7]C[-24])"
Range("AG4").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=CONCATENATE(""AÑO: "" )" ,R[-1]C[-25])"
Range("AG5").Select
End Sub

```

ANEXO B.

ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD Y ALEATORIEDAD DE LOS DATOS DE LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS, MEDIANTE PRUEBAS PARAMÉTRICAS Y NO PARAMÉTRICAS

PRUEBA ESTADÍSTICA DE HELMERT

Esta prueba analiza las desviaciones de cada evento P_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, con respecto a su valor medio \bar{P}_j , por medio de los signos que arrojan los valores obtenidos. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S , de lo contrario se considera como un cambio C . La serie se considera homogénea si se cumple la condición:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (\text{B.1})$$

PRUEBA ESTADÍSTICA T DE STUDENT

Mide las desviaciones respecto a la media. Se considera una serie P_i^j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = n_j/2$, entonces el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (\text{B.2})$$

Donde:

\bar{x}_1, S_1^2 , son la media y la varianza del primer conjunto del registro de tamaño n_1 ; \bar{x}_2, S_2^2 , son la media y la varianza del segundo conjunto del registro de tamaño n_2 ; El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La prueba determina inconsistencia si $t_d > t$, es decir, la serie P_i^j se considera no homogénea.

PRUEBA ESTADÍSTICA DE CRAMER

Esta prueba mide si el valor de la media de los datos de lluvia, no varía significativamente, de un periodo de tiempo a otro; además, se verifica si existe homogeneidad del registro P_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$. Para aplicar la prueba, la muestra se divide en tres bloques, el primero, del tamaño total de la serie n_j ; el segundo del tamaño n_{60} (60% de los últimos valores de la muestra n_j); y el tercero de tamaño n_{30} (30% de los últimos valores de la muestra n_j). La prueba compara el valor de \bar{P}^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos \bar{P}_{60}^j y \bar{P}_{30}^j . Para que se considere la serie analizada, como estacionaria en la media, se deberá revisar si no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

Para una sola muestra analizada $j = 1$, se calcula:

$$\bar{P}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{P_i^j}{n_j} \quad (\text{B.3})$$

$$S_p^j = \left[\frac{1}{(n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (P_i^j - \bar{P}^j)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.4})$$

$$\bar{P}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{P_k^j}{n_{60}} \quad (\text{B.5})$$

$$\bar{P}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{P_k^j}{n_{30}} \quad (\text{B.6})$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{P}_{60}^j - \bar{P}^j}{S_p^j} \quad (\text{B.7})$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{P}_{30}^j - \bar{P}^j}{S_p^j} \quad (\text{B.8})$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w^j| \quad (\text{B.9})$$

El estadístico t_w tiene distribución *t de Student* de dos colas con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, sí y solo sí, el valor absoluto de t_w : $w = 60$ y $w = 30$, es mayor que la distribución *t de Student* (ec. B.9), si ocurre se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie P_i^j se considera no homogénea.

PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE EVENTOS

El análisis de frecuencias de distribución para los datos de lluvia, requieren que sean representativos si la muestra P_i^j de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, queda definido por variables aleatorias. Para hacer la prueba se aplica la ecuación de independencia de Anderson (Escalante *et al.*, 2002), la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso k . Si se analiza un solo registro, entonces $j = 1$. La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (P_i^j - \bar{P}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (P_i^j - \bar{P}^j)^2}; \text{ para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \quad (\text{B.10})$$

Donde:

$$\bar{P}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{P_i^j}{n_j} \quad (\text{B.11})$$

Además, los límites al 95% de confianza para r_k^j se pueden obtener como:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad (\text{B.12})$$

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

Tabla B.1. Resultado del análisis de los datos de lluvia máximos en 24 horas, obtenido por las pruebas de homogeneidad y aleatoriedad de Helmert, t de Student, Cramer y de Anderson.

ESTACION METEOROLÓGICA	RESULTADO DE TEST APLICADO																
	HELMERT			T DE STUDENT			CRAMER			INDEPENDENCIA DE EVENTOS							
	CONDICION			CONDICION			CONDICION DE HOMOGENEIDAD			CONDICION							
	$-\sqrt{n_j-1} \leq (\bar{x} - \bar{c}) \leq \sqrt{n_j-1}$			$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$			$t_w = \left[\frac{n_w (n_w - 2)}{n_j - n_w} \left(1 + \left(\frac{r_w}{r_w} \right)^2 \right) \right]^{1/2} r_w $			$r(10\%) \geq r_k^j$							
$\sqrt{n_j-1}$	S + C	RESULTADO	t_d	grados de libertad	estadístico t, con 95% de probabilidad de dos colas	RESULTADO	t_{90}	t_{95}	grados de libertad	estadístico t, con 95% de probabilidad de dos colas	RESULTADO	Valores estimados de r_k para los tiempos de retraso K	Límites de confianza r_k^j	RESULTADO			
													+	-			
067	± 6.4807	10	No hay homogeneidad, la variación puede estar en la media ó una tendencia en los datos crea la inconsistencia del registro.	0.631	43	1.681071	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.39930	0.27827	30	1.685954	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.36790167	0.26937681	-13.8626796	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.20700447	0.27214539	-13.7022618	
													3	-0.14368373	0.27500294	-13.5501235	
													4	-0.16460667	0.27795435	-13.3961284	
													5	-0.30667807	0.2810049	-13.2401961	
													6	-0.17346956	0.28416029	-13.0822514	
													7	-0.14260129	0.2874267	-12.9222146	
													8	-0.08866691	0.29081081	-12.76	
													9	0.03962236	0.2943199	-12.5965164	
													10	0.17926689	0.29796188	-12.4286657	
													11	0.13385654	0.30174538	-12.2693428	
													12	-0.00692763	0.30567983	-12.0874343	
													13	-0.12462827	0.30977557	-11.9128182	
													14	-0.08143419	0.31404394	-11.7353521	
017	± 6.4807	-6	Hay homogeneidad.	-0.0195	41	2.019541	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.13955	0.50990	37	2.026192	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	-0.15813346	0.27500294	-13.5501235	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.01397492	0.27795435	-13.3961284	
													3	-0.08318812	0.2810049	-13.2401961	
													4	-0.03276961	0.28416029	-13.0822514	
													5	-0.12911811	0.2874267	-12.9222146	
													6	-0.12984924	0.29081081	-12.76	
													7	-0.07000076	0.2943199	-12.5965164	
													8	-0.09426846	0.29796188	-12.4286657	
													9	0.1205409	0.30174538	-12.2693428	
													10	-0.01235414	0.30567983	-12.0874343	
													11	-0.0209809	0.30977557	-11.9128182	
													12	0.11983726	0.31404394	-11.7353521	
													13	0.05976977	0.31849743	-11.554923	
													14	-0.03068395	0.32314983	-11.3713451	
121	± 3.6056	3	Hay homogeneidad.	2.6582	12	2.178813	Existe diferencia entre las medias, lo que indica evidencia de inconsistencia por lo tanto la serie se considera no homogénea	1.19720	2.40774	10	2.228139	Los datos de la serie t_{90} presentan homogeneidad. En caso de la serie t_{95} , no existe homogeneidad	1	0.15045687	0.44535686	7.78963917	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.08520699	0.45838205	-7.50068459	
													3	0.14285849	0.47255129	-7.19806421	
													4	-0.10961007	0.488	-6.88	
													5	0.18743787	0.50485746	-6.54371716	
061	± 4.899	-2	Hay homogeneidad.	2.4122	23	2.068658	Existe diferencia entre las medias, lo que indica evidencia de inconsistencia por lo tanto la serie se considera no homogénea	1.2327	1.8534	21	2.079614	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	-0.05023323	0.34999291	-10.3990296	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.1042889	0.3623673	-10.1932149	
													3	0.02081659	0.37581129	-9.98184835	
													4	0.10157423	0.38978031	-9.76538647	
													5	-0.0410173	0.3771721	-9.5434193	
													6	0.13128872	0.3860303	-9.31667576	
													7	0.00206062	0.39340483	-9.08128703	
													8	-0.12787025	0.40235394	-8.84	
011	± 5.4772	2	Hay homogeneidad.	0.5259	29	2.045230	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.9738	0.5374	26	2.055529	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.08662819	0.31849743	-11.554923	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.1050137	0.32314983	-11.3713451	
													3	0.22174293	0.32801638	-11.1844587	
													4	-0.18024575	0.33311401	-10.9940782	
													5	-0.08474617	0.33846154	-10.8	
004	± 6.245	1	Hay homogeneidad.	1.4299	38	2.024394	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	2.8241	2.1089	34	2.032245	Los datos de la serie t_{90} y de la serie t_{95} , no existe homogeneidad	1	0.2002968	0.28416029	-13.0822514	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.07384063	0.2874267	-12.9222146	
													3	0.08959361	0.29081081	-12.76	
													4	0.29292389	0.2943199	-12.5965164	
													5	0.09183897	0.29796188	-12.4286657	
													6	-0.02340153	0.30174538	-12.2693428	
													7	0.10120173	0.30567983	-12.0874343	
													8	0.03213666	0.30977557	-11.9128182	
													9	-0.06423788	0.31404394	-11.7353521	
													10	-0.2721533	0.31849743	-11.554923	
													11	-0.02638669	0.32314983	-11.3713451	
													12	-0.75821796	0.32801638	-11.1844587	
													13	-0.16542532	0.33311401	-10.9940782	

005	± 4.4721	-12	No hay homogeneidad	0.2441	19	2.093024	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.5362	0.01973	17	2.109816	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1 -0.30251695 0.3771721 0.4771721 2 -0.07598072 0.3960303 -0.49029346 3 -0.00969132 0.39340483 -0.60461695 4 -0.19820503 0.40235234 -0.52 5 0.42423969 0.41194046 -0.63694346 6 0.2290717 0.42224323 0.55657657 7 -0.04631513 0.43334861 0.57620575 8 0.45948196 0.34407999 -10.6019990 9 -0.16895155 0.3499291 -10.3998298 10 0.32405183 0.35622673 -10.1932149 11 0.61228303 0.36281129 9.98184836 12 0.19970014 0.36978031 -9.76538647 13 0.08002468 0.3771721 -9.54344193 14 -0.01403095 0.3850303 -9.31567575 15 0.05986706 0.39340483 -9.08128703 16 0.04262993 0.40235234 -8.84	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
063	G 5	11	No hay homogeneidad	3.2341	24	2.063899	Existe diferencia entre las medias, lo que indica evidencia de inconsistencia por lo tanto la serie se considera no homogénea	3.908	3.9728	22	2.073873	Los datos de la serie I_{00} y de la serie I_{01} no existe homogeneidad.	1 -0.080184 0.30677557 -11.9128182 2 0.08368342 0.31404394 -11.7363621 3 -0.06027003 0.31849743 -11.564923 4 0.16803627 0.32314983 -11.3713451 5 0.17549844 0.32901638 -11.1844587 6 -0.07434869 0.33311401 -10.9940292 7 -0.13162604 0.33846154 -10.8 8 0.24104816 0.34407999 -10.6019998 9 -0.1061689 0.3499291 -10.3998298 10 0.11102323 0.35622673 -10.1932149 11 -0.08171664 0.36281129 -9.98184836 12 -0.10599623 0.36967993 -12.0874343 13 0.07494979 0.30677557 -11.9128182 14 0.08460609 0.31404394 -11.7363621 15 -0.11440912 0.31849743 -11.564923 16 0.09203734 0.32314983 -11.3713451 17 -0.09769679 0.32901638 -11.1844587 18 -0.2020329 0.33311401 -10.9940292 19 -0.10637115 0.33846154 -10.8 20 -0.04776 0.34407999 -10.6019998 21 -0.17968887 0.3499291 -10.3998298 22 -0.06520429 0.35622673 -10.1932149 23 0.11647311 0.33311401 -10.9940292 24 0.01242297 0.33846154 -10.8 25 0.38831284 0.34407999 -10.6019998 26 0.18871779 0.3499291 -10.3998298 27 0.26283669 0.35622673 -10.1932149 28 0.05468093 0.36281129 9.98184836 29 0.17063878 0.36978031 -9.76538647 30 -0.26406148 0.3771721 -9.54344193 31 -0.05402938 0.3850303 -9.31567575 32 -0.40399095 0.41194046 -8.59104736 33 -0.09336427 0.42224323 -8.33364848 34 -0.09046179 0.43334861 -8.0668805 35 0.25393186 0.44535686 -7.78963917 36 -0.11374189 0.45938205 -7.50059459 37 0.16472263 0.47255129 -7.19808421 38 0.09634143 0.47900294 -13.8401295 39 -0.23986273 0.27794336 -13.9861284 40 -0.07829969 0.2810049 -13.2401961 41 -0.00061173 0.28416029 -13.0522514 42 -0.09169568 0.2874267 -12.9222146 43 0.03411136 0.29081081 -12.76 44 -0.04212539 0.2943199 -12.5955164 45 0.12906724 0.29796108 -12.4286867 46 -0.07380366 0.30174538 -12.2593426 47 0.00838632 0.30567993 -12.0874343 48 0.19421901 0.30977557 -11.9128182 49 0.21246955 0.31404394 -11.7363621 50 -0.18020727 0.31849743 -11.564923 51 -0.21782739 0.32314983 -11.3713451 52 0.2785417 0.32901638 -11.1844587 53 0.15743729 0.33311401 -10.9940292 54 -0.28984114 0.33846154 -10.8 55 -0.25352079 0.34407999 -10.6019998 56 -0.37305079 0.3499291 -10.3998298 57 -0.2291575 0.35622673 -10.1932149 58 -0.10867746 0.36281129 9.98184836 59 -0.13765274 0.36978031 -9.76538647 60 0.14337393 0.3771721 -9.54344193 61 0.21153437 0.40235234 -8.84 62 -0.09967541 0.41194046 -8.59104736 63 0.23764845 0.42224323 -8.33364848 64 -0.07897759 0.43334861 -8.0668805 65 -0.06259545 0.44535686 -7.78963917 66 0.1467436 0.45938205 -7.50059459	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
033	± 5.6569	6	No hay homogeneidad	1.6392	31	2.039513	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	1.41401	0.90739	28	2.048407	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1 -0.080184 0.30677557 -11.9128182 2 0.08368342 0.31404394 -11.7363621 3 -0.06027003 0.31849743 -11.564923 4 0.16803627 0.32314983 -11.3713451 5 0.17549844 0.32901638 -11.1844587 6 -0.07434869 0.33311401 -10.9940292 7 -0.13162604 0.33846154 -10.8 8 0.24104816 0.34407999 -10.6019998 9 -0.1061689 0.3499291 -10.3998298 10 0.11102323 0.35622673 -10.1932149 11 -0.08171664 0.36281129 -9.98184836 12 -0.10599623 0.36967993 -12.0874343 13 0.07494979 0.30677557 -11.9128182 14 0.08460609 0.31404394 -11.7363621 15 -0.11440912 0.31849743 -11.564923 16 0.09203734 0.32314983 -11.3713451 17 -0.09769679 0.32901638 -11.1844587 18 -0.2020329 0.33311401 -10.9940292 19 -0.10637115 0.33846154 -10.8 20 -0.04776 0.34407999 -10.6019998 21 -0.17968887 0.3499291 -10.3998298 22 -0.06520429 0.35622673 -10.1932149 23 0.11647311 0.33311401 -10.9940292 24 0.01242297 0.33846154 -10.8 25 0.38831284 0.34407999 -10.6019998 26 0.18871779 0.3499291 -10.3998298 27 0.26283669 0.35622673 -10.1932149 28 0.05468093 0.36281129 9.98184836 29 0.17063878 0.36978031 -9.76538647 30 -0.26406148 0.3771721 -9.54344193 31 -0.05402938 0.3850303 -9.31567575 32 -0.40399095 0.41194046 -8.59104736 33 -0.09336427 0.42224323 -8.33364848 34 -0.09046179 0.43334861 -8.0668805 35 0.25393186 0.44535686 -7.78963917 36 -0.11374189 0.45938205 -7.50059459 37 0.16472263 0.47255129 -7.19808421 38 0.09634143 0.47900294 -13.8401295 39 -0.23986273 0.27794336 -13.9861284 40 -0.07829969 0.2810049 -13.2401961 41 -0.00061173 0.28416029 -13.0522514 42 -0.09169568 0.2874267 -12.9222146 43 0.03411136 0.29081081 -12.76 44 -0.04212539 0.2943199 -12.5955164 45 0.12906724 0.29796108 -12.4286867 46 -0.07380366 0.30174538 -12.2593426 47 0.00838632 0.30567993 -12.0874343 48 0.19421901 0.30977557 -11.9128182 49 0.21246955 0.31404394 -11.7363621 50 -0.18020727 0.31849743 -11.564923 51 -0.21782739 0.32314983 -11.3713451 52 0.2785417 0.32901638 -11.1844587 53 0.15743729 0.33311401 -10.9940292 54 -0.28984114 0.33846154 -10.8 55 -0.25352079 0.34407999 -10.6019998 56 -0.37305079 0.3499291 -10.3998298 57 -0.2291575 0.35622673 -10.1932149 58 -0.10867746 0.36281129 9.98184836 59 -0.13765274 0.36978031 -9.76538647 60 0.14337393 0.3771721 -9.54344193 61 0.21153437 0.40235234 -8.84 62 -0.09967541 0.41194046 -8.59104736 63 0.23764845 0.42224323 -8.33364848 64 -0.07897759 0.43334861 -8.0668805 65 -0.06259545 0.44535686 -7.78963917 66 0.1467436 0.45938205 -7.50059459	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
051	± 5.7446	-3	Hay homogeneidad.	-0.5622	32	2.036933	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.6298	0.9501	28	2.048407	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1 -0.080184 0.30677557 -11.9128182 2 0.08368342 0.31404394 -11.7363621 3 -0.06027003 0.31849743 -11.564923 4 0.16803627 0.32314983 -11.3713451 5 0.17549844 0.32901638 -11.1844587 6 -0.07434869 0.33311401 -10.9940292 7 -0.13162604 0.33846154 -10.8 8 0.24104816 0.34407999 -10.6019998 9 -0.1061689 0.3499291 -10.3998298 10 0.11102323 0.35622673 -10.1932149 11 -0.08171664 0.36281129 -9.98184836 12 -0.10599623 0.36967993 -12.0874343 13 0.07494979 0.30677557 -11.9128182 14 0.08460609 0.31404394 -11.7363621 15 -0.11440912 0.31849743 -11.564923 16 0.09203734 0.32314983 -11.3713451 17 -0.09769679 0.32901638 -11.1844587 18 -0.2020329 0.33311401 -10.9940292 19 -0.10637115 0.33846154 -10.8 20 -0.04776 0.34407999 -10.6019998 21 -0.17968887 0.3499291 -10.3998298 22 -0.06520429 0.35622673 -10.1932149 23 0.11647311 0.33311401 -10.9940292 24 0.01242297 0.33846154 -10.8 25 0.38831284 0.34407999 -10.6019998 26 0.18871779 0.3499291 -10.3998298 27 0.26283669 0.35622673 -10.1932149 28 0.05468093 0.36281129 9.98184836 29 0.17063878 0.36978031 -9.76538647 30 -0.26406148 0.3771721 -9.54344193 31 -0.05402938 0.3850303 -9.31567575 32 -0.40399095 0.41194046 -8.59104736 33 -0.09336427 0.42224323 -8.33364848 34 -0.09046179 0.43334861 -8.0668805 35 0.25393186 0.44535686 -7.78963917 36 -0.11374189 0.45938205 -7.50059459 37 0.16472263 0.47255129 -7.19808421 38 0.09634143 0.47900294 -13.8401295 39 -0.23986273 0.27794336 -13.9861284 40 -0.07829969 0.2810049 -13.2401961 41 -0.00061173 0.28416029 -13.0522514 42 -0.09169568 0.2874267 -12.9222146 43 0.03411136 0.29081081 -12.76 44 -0.04212539 0.2943199 -12.5955164 45 0.12906724 0.29796108 -12.4286867 46 -0.07380366 0.30174538 -12.2593426 47 0.00838632 0.30567993 -12.0874343 48 0.19421901 0.30977557 -11.9128182 49 0.21246955 0.31404394 -11.7363621 50 -0.18020727 0.31849743 -11.564923 51 -0.21782739 0.32314983 -11.3713451 52 0.2785417 0.32901638 -11.1844587 53 0.15743729 0.33311401 -10.9940292 54 -0.28984114 0.33846154 -10.8 55 -0.25352079 0.34407999 -10.6019998 56 -0.37305079 0.3499291 -10.3998298 57 -0.2291575 0.35622673 -10.1932149 58 -0.10867746 0.36281129 9.98184836 59 -0.13765274 0.36978031 -9.76538647 60 0.14337393 0.3771721 -9.54344193 61 0.21153437 0.40235234 -8.84 62 -0.09967541 0.41194046 -8.59104736 63 0.23764845 0.42224323 -8.33364848 64 -0.07897759 0.43334861 -8.0668805 65 -0.06259545 0.44535686 -7.78963917 66 0.1467436 0.45938205 -7.50059459	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
008	± 5.1962	-1	Hay homogeneidad.	1.7857	26	2.059539	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.9487	1.69039	23	2.068658	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1 -0.080184 0.30677557 -11.9128182 2 0.08368342 0.31404394 -11.7363621 3 -0.06027003 0.31849743 -11.564923 4 0.16803627 0.32314983 -11.3713451 5 0.17549844 0.32901638 -11.1844587 6 -0.07434869 0.33311401 -10.9940292 7 -0.13162604 0.33846154 -10.8 8 0.24104816 0.34407999 -10.6019998 9 -0.1061689 0.3499291 -10.3998298 10 0.11102323 0.35622673 -10.1932149 11 -0.08171664 0.36281129 -9.98184836 12 -0.10599623 0.36967993 -12.0874343 13 0.07494979 0.30677557 -11.9128182 14 0.08460609 0.31404394 -11.7363621 15 -0.11440912 0.31849743 -11.564923 16 0.09203734 0.32314983 -11.3713451 17 -0.09769679 0.32901638 -11.1844587 18 -0.2020329 0.33311401 -10.9940292 19 -0.10637115 0.33846154 -10.8 20 -0.04776 0.34407999 -10.6019998 21 -0.17968887 0.3499291 -10.3998298 22 -0.06520429 0.35622673 -10.1932149 23 0.11647311 0.33311401 -10.9940292 24 0.01242297 0.33846154 -10.8 25 0.38831284 0.34407999 -10.6019998 26 0.18871779 0.3499291 -10.3998298 27 0.26283669 0.35622673 -10.1932149 28 0.05468093 0.36281129 9.98184836 29 0.17063878 0.36978031 -9.76538647 30 -0.26406148 0.3771721 -9.54344193 31 -0.05402938 0.3850303 -9.31567575 32 -0.40399095 0.41194046 -8.59104736 33 -0.09336427 0.42224323 -8.33364848 34 -0.09046179 0.43334861 -8.0668805 35 0.25393186 0.44535686 -7.78963917 36 -0.11374189 0.45938205 -7.50059459 37 0.16472263 0.47255129 -7.19808421 38 0.09634143 0.47900294 -13.8401295 39 -0.23986273 0.27794336 -13.9861284 40 -0.07829969 0.2810049 -13.2401961 41 -0.00061173 0.28416029 -13.0522514 42 -0.09169568 0.2874267 -12.9222146 43 0.03411136 0.29081081 -12.76 44 -0.04212539 0.2943199 -12.5955164 45 0.12906724 0.29796108 -12.4286867 46 -0.07380366 0.30174538 -12.2593426 47 0.00838632 0.30567993 -12.0874343 48 0.19421901 0.30977557 -11.9128182 49 0.21246955 0.31404394 -11.7363621 50 -0.18020727 0.31849743 -11.564923 51 -0.21782739 0.32314983 -11.3713451 52 0.2785417 0.32901638 -11.1844587 53 0.15743729 0.33311401 -10.9940292 54 -0.28984114 0.33846154 -10.8 55 -0.25352079 0.34407999 -10.6019998 56 -0.37305079 0.3499291 -10.3998298 57 -0.2291575 0.35622673 -10.1932149 58 -0.10867746 0.36281129 9.98184836 59 -0.13765274 0.36978031 -9.76538647 60 0.14337393 0.3771721 -9.54344193 61 0.21153437 0.40235234 -8.84 62 -0.09967541 0.41194046 -8.59104736 63 0.23764845 0.42224323 -8.33364848 64 -0.07897759 0.43334861 -8.0668805 65 -0.06259545 0.44535686 -7.78963917 66 0.1467436 0.45938205 -7.50059459	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
124	± 4.0	-4	Hay homogeneidad.	0.1426	15	2.1314	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.29316	0.11243	13	2.160369	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1 -0.080184 0.30677557 -11.9128182 2 0.08368342 0.31404394 -11.7363621 3 -0.06027003 0.31849743 -11.564923 4 0.16803627 0.32314983 -11.3713451 5 0.17549844 0.32901638 -11.1844587 6 -0.07434869 0.33311401 -10.9940292 7 -0.13162604 0.33846154 -10.8 8 0.24104816 0.34407999 -10.6019998 9 -0.1061689 0.3499291 -10.3998298 10 0.11102323 0.35622673 -10.1932149 11 -0.08171664 0.36281129 -9.98184836 12 -0.10599623 0.36967993 -12.0874343 13 0.07494979 0.30677557 -11.9128182 14 0.08460609 0.31404394 -11.7363621 15 -0.11440912 0.31849743 -11.564923 16 0.09203734 0.32314983 -11.3713451 17 -0.09769679 0.32901638 -11.1844587 18 -0.2020329 0.33311401 -10.9940292 19 -0.10637115 0.33846154 -10.8 20 -0.04776 0.34407999 -10.6019998 21 -0.17968887 0.3499291 -10.3998298 22 -0.06520429 0.35622673 -10.1932149 23 0.11647311 0.33311401 -10.9940292 24 0.01242297 0.33846154 -10.8 25 0.38831284 0.34407999 -10.6019998 26 0.18871779 0.3499291 -10.3998298 27 0.26283669 0.35622673 -10.1932149 28	

073	± 4.3589	7	No hay homogeneidad, la variación puede estar en la media ó una tendencia en los datos crea la inconsistencia del registro.	-1.5002	18	2.1009	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	-0.2295	-0.2485	16	2.1199	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.32061317	0.3850303	-9.31557575	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.09560942	0.39340483	-9.08128703	
													3	0.09422099	0.40235294	-8.84	
													4	-0.1126622	0.41194046	-8.59104736	
													5	-0.33787951	0.42224323	-8.33364848	
													6	-0.18614426	0.43334861	-8.06688005	
													7	-0.17653111	0.44535686	-7.78963917	
141	± 4.123	5	No hay homogeneidad, la variación puede estar en la media ó una tendencia en los datos crea la inconsistencia del registro.	-0.3838	16	2.1199	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	1.7813	0.18403	14	2.1447	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.40357924	0.40235294	-8.84	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.20206011	0.41194046	-8.59104736	
													3	-0.31450565	0.42224323	-8.33364848	
													4	-0.32570028	0.43334861	-8.06688005	
													5	0.03571087	0.44535686	-7.78963917	
													6	0.15199316	0.45838205	-7.50058459	
162	± 4	-2	Hay homogeneidad.	-0.3586	15	2.1314	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	-0.4882	0.2652	13	2.1603	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	-0.05563895	0.41194046	-8.59104736	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.29259207	0.42224323	-8.33364848	
													3	0.25098375	0.43334861	-8.06688005	
													4	0.26421226	0.44535686	-7.78963917	
													5	-0.43143697	0.45838205	-7.50058459	
													6	-0.21750025	0.47255129	-7.19806421	
													7	-0.06894937	0.41194046	-8.59104736	
137	± 4	4	Hay homogeneidad.	0.0282	15	2.1314	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.8176	0.4121	13	2.1603	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	-0.06894937	0.41194046	-8.59104736	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.30244612	0.42224323	-8.33364848	
													3	-0.23923938	0.43334861	-8.06688005	
													4	-0.10787408	0.44535686	-7.78963917	
													5	0.23352379	0.45838205	-7.50058459	
													6	0.11555611	0.47255129	-7.19806421	
													7	-0.06894937	0.41194046	-8.59104736	
153	± 4	0	Hay homogeneidad.	-1.2039	15	2.1314	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	2.1911	0.3634	13	2.1603	Los datos de la serie t_{00} presentan homogeneidad. En el caso de la serie t_{01} , no existe homogeneidad.	1	0.24636902	0.41194046	-8.59104736	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.16001283	0.42224323	-8.33364848	
													3	0.24381297	0.43334861	-8.06688005	
													4	0.00045585	0.44535686	-7.78963917	
													5	-0.2347081	0.45838205	-7.50058459	
													6	-0.03666715	0.47255129	-7.19806421	
													7	-0.38169915	0.41194046	-8.59104736	
136	± 4	2	Hay homogeneidad.	0.6621	15	2.1314	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.3769	0.771	13	2.1603	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	-0.38169915	0.41194046	-8.59104736	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.11560355	0.42224323	-8.33364848	
													3	-0.1428922	0.43334861	-8.06688005	
													4	0.00326922	0.44535686	-7.78963917	
													5	-0.21757036	0.45838205	-7.50058459	
													6	0.20667295	0.47255129	-7.19806421	
													7	-0.38169915	0.41194046	-8.59104736	
134	± 4	4	Hay homogeneidad.	-2.0881	15	2.1314	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	1.0282	1.4031	13	2.1603	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.09084452	0.41194046	-8.59104736	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.20094879	0.42224323	-8.33364848	
													3	-0.16493718	0.43334861	-8.06688005	
													4	0.05555937	0.44535686	-7.78963917	
													5	0.46408488	0.45838205	-7.50058459	
													6	0.05593612	0.47255129	-7.19806421	
													7	-0.38169915	0.41194046	-8.59104736	
164	± 3.7416	-4	No hay homogeneidad, la variación puede estar en la media ó una tendencia en los datos crea la inconsistencia del registro.	0.0863	13	2.1603	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.6858	0.2573	12	2.1788	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	-0.10007673	0.43334861	-8.06688005	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.38701679	0.44535686	-7.78963917	
													3	0.00745755	0.45838205	-7.50058459	
													4	0.11713062	0.47255129	-7.19806421	
													5	0.00508268	0.488	-6.88	
140	± 3.6056	1	Hay homogeneidad.	-0.2197	12	2.1788	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.3693	0.6103	10	2.2281	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.00806864	0.44535686	-7.78963917	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	-0.03757023	0.45838205	-7.50058459	
													3	-0.14095577	0.47255129	-7.19806421	
													4	-0.12408211	0.488	-6.88	
													5	-0.16881966	0.50485746	-6.54371716	
													6	-0.30238113	0.33311401	-10.9940782	
058	± 5.1952	-3	Hay homogeneidad.	-1.1579	26	2.0555	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.5699	1.3567	23	2.06865	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	1	0.14278373	0.33846154	-10.8	Si solo el 10% de r, sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P, es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
													2	0.26968232	0.34407999	-10.6019998	
													3	0.02657712	0.34999291	-10.3998298	
													4	-0.01898612	0.35622673	-10.1932149	
													5	0.09635657	0.36281129	-9.98184836	
													6	-0.13853635	0.36978031	-9.76538647	
													7	0.1089443	0.3771721	-9.54344193	
													8	0.1089443	0.3771721	-9.54344193	
													9	-0.06893999	0.3850303	-9.31557575	

041	± 5.3052	-7	No hay homogeneidad.	0.7746	27	2.0518	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.00549	0.04829	24	2.06389	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.27864966</td><td>0.32801638</td><td>-11.1844587</td></tr> <tr><td>2</td><td>-0.14562717</td><td>0.33311401</td><td>-10.9940782</td></tr> <tr><td>3</td><td>-0.02325811</td><td>0.33846154</td><td>-10.8</td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.06538599</td><td>0.34407999</td><td>-10.6019998</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.00769202</td><td>0.34999291</td><td>-10.3990298</td></tr> <tr><td>6</td><td>-0.06330009</td><td>0.35622673</td><td>-10.1932149</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.08552537</td><td>0.36281129</td><td>-9.98184836</td></tr> <tr><td>8</td><td>-0.06826511</td><td>0.36978031</td><td>-9.76538647</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.16311422</td><td>0.3771721</td><td>-9.54344193</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.16699596</td><td>0.3850303</td><td>-9.31657575</td></tr> </tbody> </table>	1	0.27864966	0.32801638	-11.1844587	2	-0.14562717	0.33311401	-10.9940782	3	-0.02325811	0.33846154	-10.8	4	-0.06538599	0.34407999	-10.6019998	5	0.00769202	0.34999291	-10.3990298	6	-0.06330009	0.35622673	-10.1932149	7	0.08552537	0.36281129	-9.98184836	8	-0.06826511	0.36978031	-9.76538647	9	0.16311422	0.3771721	-9.54344193	10	0.16699596	0.3850303	-9.31657575	Si solo el 10% de r , sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P_t es independiente, por lo que es aleatorio el valor.																
1	0.27864966	0.32801638	-11.1844587																																																																			
2	-0.14562717	0.33311401	-10.9940782																																																																			
3	-0.02325811	0.33846154	-10.8																																																																			
4	-0.06538599	0.34407999	-10.6019998																																																																			
5	0.00769202	0.34999291	-10.3990298																																																																			
6	-0.06330009	0.35622673	-10.1932149																																																																			
7	0.08552537	0.36281129	-9.98184836																																																																			
8	-0.06826511	0.36978031	-9.76538647																																																																			
9	0.16311422	0.3771721	-9.54344193																																																																			
10	0.16699596	0.3850303	-9.31657575																																																																			
049	± 5.3852	1	Hay homogeneidad.	-0.3269	28	2.0404	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	1.1292	1.1779	25	2.0595	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.01497367</td><td>0.32314983</td><td>-11.3713451</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.00285673</td><td>0.32001638</td><td>-11.1844587</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.0751189</td><td>0.33311401</td><td>-10.9940782</td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.34891244</td><td>0.33846154</td><td>-10.8</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.09338635</td><td>0.34407999</td><td>-10.6019998</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.03202532</td><td>0.34999291</td><td>-10.3990298</td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.13112078</td><td>0.35622673</td><td>-10.1932149</td></tr> <tr><td>8</td><td>-0.14610035</td><td>0.36281129</td><td>-9.98184836</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.03692721</td><td>0.36978031</td><td>-9.76538647</td></tr> <tr><td>10</td><td>-0.13392392</td><td>0.3771721</td><td>-9.54344193</td></tr> </tbody> </table>	1	0.01497367	0.32314983	-11.3713451	2	0.00285673	0.32001638	-11.1844587	3	0.0751189	0.33311401	-10.9940782	4	-0.34891244	0.33846154	-10.8	5	0.09338635	0.34407999	-10.6019998	6	0.03202532	0.34999291	-10.3990298	7	-0.13112078	0.35622673	-10.1932149	8	-0.14610035	0.36281129	-9.98184836	9	0.03692721	0.36978031	-9.76538647	10	-0.13392392	0.3771721	-9.54344193	Si solo el 10% de r , sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P_t es independiente, por lo que es aleatorio el valor.																
1	0.01497367	0.32314983	-11.3713451																																																																			
2	0.00285673	0.32001638	-11.1844587																																																																			
3	0.0751189	0.33311401	-10.9940782																																																																			
4	-0.34891244	0.33846154	-10.8																																																																			
5	0.09338635	0.34407999	-10.6019998																																																																			
6	0.03202532	0.34999291	-10.3990298																																																																			
7	-0.13112078	0.35622673	-10.1932149																																																																			
8	-0.14610035	0.36281129	-9.98184836																																																																			
9	0.03692721	0.36978031	-9.76538647																																																																			
10	-0.13392392	0.3771721	-9.54344193																																																																			
044	± 5.4772	2	Hay homogeneidad.	0.2005	29	2.0452	Muestra consistencia entre las medias de las muestras, hay homogeneidad	0.1376	0.12407	26	2.055	Los datos presentan homogeneidad, pues en los tres bloques no hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>-0.28294207</td><td>0.31849743</td><td>-11.554923</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.0390324</td><td>0.32314983</td><td>-11.3713451</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.25082889</td><td>0.32801638</td><td>-11.1844587</td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.14867838</td><td>0.33311401</td><td>-10.9940782</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.01420659</td><td>0.33846154</td><td>-10.8</td></tr> <tr><td>6</td><td>-0.23396642</td><td>0.34407999</td><td>-10.6019998</td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.11475885</td><td>0.34999291</td><td>-10.3990298</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.04779418</td><td>0.35622673</td><td>-10.1932149</td></tr> <tr><td>9</td><td>-0.22773706</td><td>0.36281129</td><td>-9.98184836</td></tr> <tr><td>10</td><td>-0.07595248</td><td>0.36978031</td><td>-9.76538647</td></tr> </tbody> </table>	1	-0.28294207	0.31849743	-11.554923	2	0.0390324	0.32314983	-11.3713451	3	0.25082889	0.32801638	-11.1844587	4	-0.14867838	0.33311401	-10.9940782	5	0.01420659	0.33846154	-10.8	6	-0.23396642	0.34407999	-10.6019998	7	-0.11475885	0.34999291	-10.3990298	8	0.04779418	0.35622673	-10.1932149	9	-0.22773706	0.36281129	-9.98184836	10	-0.07595248	0.36978031	-9.76538647	Si solo el 10% de r , sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P_t es independiente, por lo que es aleatorio el valor.																
1	-0.28294207	0.31849743	-11.554923																																																																			
2	0.0390324	0.32314983	-11.3713451																																																																			
3	0.25082889	0.32801638	-11.1844587																																																																			
4	-0.14867838	0.33311401	-10.9940782																																																																			
5	0.01420659	0.33846154	-10.8																																																																			
6	-0.23396642	0.34407999	-10.6019998																																																																			
7	-0.11475885	0.34999291	-10.3990298																																																																			
8	0.04779418	0.35622673	-10.1932149																																																																			
9	-0.22773706	0.36281129	-9.98184836																																																																			
10	-0.07595248	0.36978031	-9.76538647																																																																			
089	± 6.4807	6	Hay homogeneidad.	2.1092	41	2.0195	Existe diferencia entre las medias, lo que indica evidencia de inconsistencia por lo tanto la serie se considera no homogénea	2.76908	1.67302	37	1.60709	Los datos de la serie t_{30} presentan homogeneidad. En el caso de la serie t_{30} , no existe homogeneidad	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.27015177</td><td>0.27600294</td><td>-13.5801235</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.13817819</td><td>0.27795435</td><td>-13.3961284</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.08445714</td><td>0.2810049</td><td>-13.2401961</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.00525836</td><td>0.28416029</td><td>-13.0022514</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.19523696</td><td>0.2874267</td><td>-12.9222146</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.12070143</td><td>0.29081081</td><td>-12.75</td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.02498811</td><td>0.2943199</td><td>-12.5955164</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.00670021</td><td>0.29796188</td><td>-12.4286657</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.0749815</td><td>0.30174538</td><td>-12.2693428</td></tr> <tr><td>10</td><td>-0.06202902</td><td>0.30567903</td><td>-12.0074343</td></tr> <tr><td>11</td><td>-0.140406</td><td>0.30977557</td><td>-11.9128182</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.07979518</td><td>0.31404394</td><td>-11.7353621</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.09591348</td><td>0.31849743</td><td>-11.554923</td></tr> <tr><td>14</td><td>0.10447162</td><td>0.32314983</td><td>-11.3713451</td></tr> </tbody> </table>	1	0.27015177	0.27600294	-13.5801235	2	0.13817819	0.27795435	-13.3961284	3	0.08445714	0.2810049	-13.2401961	4	0.00525836	0.28416029	-13.0022514	5	0.19523696	0.2874267	-12.9222146	6	0.12070143	0.29081081	-12.75	7	-0.02498811	0.2943199	-12.5955164	8	0.00670021	0.29796188	-12.4286657	9	0.0749815	0.30174538	-12.2693428	10	-0.06202902	0.30567903	-12.0074343	11	-0.140406	0.30977557	-11.9128182	12	0.07979518	0.31404394	-11.7353621	13	0.09591348	0.31849743	-11.554923	14	0.10447162	0.32314983	-11.3713451	Si solo el 10% de r , sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P_t es independiente, por lo que es aleatorio el valor.
1	0.27015177	0.27600294	-13.5801235																																																																			
2	0.13817819	0.27795435	-13.3961284																																																																			
3	0.08445714	0.2810049	-13.2401961																																																																			
4	0.00525836	0.28416029	-13.0022514																																																																			
5	0.19523696	0.2874267	-12.9222146																																																																			
6	0.12070143	0.29081081	-12.75																																																																			
7	-0.02498811	0.2943199	-12.5955164																																																																			
8	0.00670021	0.29796188	-12.4286657																																																																			
9	0.0749815	0.30174538	-12.2693428																																																																			
10	-0.06202902	0.30567903	-12.0074343																																																																			
11	-0.140406	0.30977557	-11.9128182																																																																			
12	0.07979518	0.31404394	-11.7353621																																																																			
13	0.09591348	0.31849743	-11.554923																																																																			
14	0.10447162	0.32314983	-11.3713451																																																																			
121	± 3.6056	3	Hay homogeneidad.	2.6582	12	2.1788	Existe diferencia entre las medias, lo que indica evidencia de inconsistencia por lo tanto la serie se considera no homogénea	1.1972	2.4077	10	2.2281	Los datos de la serie t_{30} presentan homogeneidad. En el caso de la serie t_{30} , no existe homogeneidad	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.16045867</td><td>0.44535686</td><td>-7.78963917</td></tr> <tr><td>2</td><td>-0.08520689</td><td>0.44838205</td><td>-7.60058459</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.14285049</td><td>0.47255129</td><td>-7.19006421</td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.10951007</td><td>0.488</td><td>-6.88</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.18743707</td><td>0.50485746</td><td>-6.54371716</td></tr> </tbody> </table>	1	0.16045867	0.44535686	-7.78963917	2	-0.08520689	0.44838205	-7.60058459	3	0.14285049	0.47255129	-7.19006421	4	-0.10951007	0.488	-6.88	5	0.18743707	0.50485746	-6.54371716	Si solo el 10% de r , sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P_t es independiente, por lo que es aleatorio el valor.																																				
1	0.16045867	0.44535686	-7.78963917																																																																			
2	-0.08520689	0.44838205	-7.60058459																																																																			
3	0.14285049	0.47255129	-7.19006421																																																																			
4	-0.10951007	0.488	-6.88																																																																			
5	0.18743707	0.50485746	-6.54371716																																																																			
063	± 5	11	No hay homogeneidad.	3.2341	24	2.0638	Existe diferencia entre las medias, lo que indica evidencia de inconsistencia por lo tanto la serie se considera no homogénea	3.908	3.9728	22	2.0738	Los datos presentan no homogeneidad, pues en los tres bloques hay una diferencia significativa en los valores de las medias.	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.45940156</td><td>0.34407999</td><td>-10.6019998</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.18095155</td><td>0.34999291</td><td>-10.3990298</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.32406183</td><td>0.35622673</td><td>-10.1932149</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.51278303</td><td>0.36281129</td><td>-9.98184836</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.18870014</td><td>0.36978031</td><td>-9.76538647</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.08002468</td><td>0.3771721</td><td>-9.54344193</td></tr> <tr><td>7</td><td>-0.01403095</td><td>0.3850303</td><td>-9.31657575</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.05996706</td><td>0.39340483</td><td>-9.08120703</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.04262383</td><td>0.40235294</td><td>-8.84</td></tr> </tbody> </table>	1	0.45940156	0.34407999	-10.6019998	2	0.18095155	0.34999291	-10.3990298	3	0.32406183	0.35622673	-10.1932149	4	0.51278303	0.36281129	-9.98184836	5	0.18870014	0.36978031	-9.76538647	6	0.08002468	0.3771721	-9.54344193	7	-0.01403095	0.3850303	-9.31657575	8	0.05996706	0.39340483	-9.08120703	9	0.04262383	0.40235294	-8.84	Si solo el 10% de r , sobrepasa los límites de confianza, se dice que la serie P_t es independiente, por lo que es aleatorio el valor.																				
1	0.45940156	0.34407999	-10.6019998																																																																			
2	0.18095155	0.34999291	-10.3990298																																																																			
3	0.32406183	0.35622673	-10.1932149																																																																			
4	0.51278303	0.36281129	-9.98184836																																																																			
5	0.18870014	0.36978031	-9.76538647																																																																			
6	0.08002468	0.3771721	-9.54344193																																																																			
7	-0.01403095	0.3850303	-9.31657575																																																																			
8	0.05996706	0.39340483	-9.08120703																																																																			
9	0.04262383	0.40235294	-8.84																																																																			

ANEXO C.

PREDICCIÓN DE AVENIDAS EN CUENCAS NO AFORADAS INFILTRACIÓN POTENCIAL

Es el proceso que describe la circulación del agua hacia el interior del suelo, representada como la tasa de infiltración f_p , la cual es indicativa del valor máximo de retención de lluvia en el suelo (Chow *et al.*, 1994). Esta variable se expresa en unidades de cm/h y/o mm/h. Para calcular la tasa de infiltración se define el tiempo de encharcamiento, t_p , que es el tiempo que transcurre al inicio de la lluvia y el momento en que el suelo se satura. Para el cálculo de la lluvia en exceso se aplicó el método de Green-Ampt, que ayuda a explicar el proceso de infiltración (Chow *et al.*, 1994), mediante la ecuación C.1.

$$F = L(\eta - \theta_i) = L M_d \quad (C.1)$$

Donde: L , es la distancia desde la superficie hasta el frente de mojado, en mm; η , es la cantidad de porosidad del suelo, en cm^3/cm^3 ; θ_i , es el contenido de humedad inicial, en cm^3/cm^3 ; M_d , es la deficiencia de humedad en el suelo.

La infiltración acumulada F , está representado por la profundidad acumulada de agua infiltrada dentro de un periodo dado, y es igual a la integral de la tasa de infiltración en ese periodo, por lo que, una vez que $F(t)$ se ha calculado, la tasa de infiltración $f(t)$ se obtiene con la ecuación C.2.

$$f(t) = K \left[\frac{\psi M_d + F(t)}{F(t)} \right] \quad (C.2)$$

el cambio en el contenido de humedad se explica como:

$$M_d = \eta - \theta_i = (1 - S_e)\theta_e \quad (C.3)$$

Morel-Seytoux y Verdin (1983) *cit.* en Martínez (1996), aplican los valores de las curvas N (Tablas C.1 y C.2), para calcular la conductividad y la capacidad de succión-almacenamiento del suelo como:

$$K = \frac{100 - N}{124.18504} \quad \text{para } N > 75 \quad (C.4)$$

$$K = 3.13944 - 0.03912 N \quad \text{para } 36 < N \leq 75 \quad (C.5)$$

$$K = 4.70662 - 0.0823 N \quad \text{para } N \leq 36 \quad (C.6)$$

$$S_f = \frac{\left[\frac{(100 - N)}{16.63465} \right]^2}{2K} \quad \text{para } N > 65 \quad (C.7)$$

$$S_f = \frac{(3.02514 - 0.01461 N)^2}{2K} \quad \text{para } N \leq 65 \quad (C.8)$$

donde K está en cm/h; N es el número de la curva de escurrimiento del Soil Conservation Service (Aparicio, 2003) y S_f es el factor de succión-almacenamiento, calculado como:

$$S_f = \psi M_d \quad (C.9)$$

Tabla C.1. Valores típicos para N (Aparicio, 2003).

Uso del suelo y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno, %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	---	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
pastizales	-----	>1	68	79	86	89
	-----	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	35	70	79
Pradera permanente		>1	30	58	71	78
Bosques naturales		----				
	Muy ralo	----	56	75	86	91
	Ralo	----	46	68	78	84
	Normal	----	36	60	70	77
	Espeso	----	26	52	62	69
	Muy espeso	----	15	44	54	61
Caminos		----				
	De terracería	----	72	82	87	89
	Con superficie dura	----	74	84	90	92

Tabla C.2. Selección del tipo de suelo para aplicar en la C.1 (Aparicio, 2003).

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas, limos; suelos con altos contenidos de arcilla.
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con sub-horizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

Las áreas de influencia son los polígonos de Thiessen generados por las estaciones meteorológicas, siendo el límite de cada tormenta de diseño, por lo que los valores de infiltración serán calculados de para estos polígonos. Debido a que hay una infinidad de valores de N , al interior de los polígonos de Thiessen, se tuvo que tomar un valor de N promedio, calculado con base a la proporción que por superficie ocupan los diferentes usos (ecuación C.10).

$$N_{prom} = \sum_{i=1}^j N_i \left(\frac{A_i}{A_t} \right) \quad (C.10)$$

Donde; A_t , es el área total de uso del suelo dentro del polígono, en m^2 ; A_i , es el área i de uso del suelo i en m^2 ; N_i valor N dado para el área i (Tablas C.1 y C.2).

A partir de las características físicas del suelo James *et al.* (1992), estimaron los parámetros de Green-Ampt utilizando ecuaciones de regresión, donde se toma como base el porcentaje de arena, arcilla y la porosidad total del suelo.

$$\theta_r = -0.01825 + 0.000873 PS + 0.005135 PC + 0.029393 \eta - 0.000154 PC^2$$

$$-0.001083 PS \eta - 0.000182 PC^2 \eta^2 + 0.000307 PC^2 \eta - 0.002358 \eta^2 PC \quad (C.11)$$

$$\theta_e = \eta - \theta_r \quad (C.12)$$

$$\begin{aligned} \psi = & 0.3994 \exp(6.5309 - 7.3256 \eta + 0.001583 PC^2 + 3.809479 \eta^2 + 0.000344 PS PC \\ & - 0.049837 PS \eta + 0.001608 PS^2 \eta^2 + 0.001602 PC^2 \eta^2 - 0.000014 PS^2 PC \\ & - 0.00348 PC^2 \eta - 0.0008 PC^2 \eta) \end{aligned} \quad (C.13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = & 0.3934 \exp(19.52348 \eta - 8.96847 - 0.028212 PC + 0.000181 PS^2 - 0.0094125 PC^2 \\ & - 8.395215 \eta^2 + 0.077718 PS \eta - 0.00298 PS^2 \eta^2 - 0.01949 PC^2 \eta^2 + \\ & 0.0000173 PS^2 PC + 0.02733 PC^2 \eta + \\ & 0.001434 PS^2 \eta - 0.0000035 PC^2 PS) \end{aligned} \quad (C.14)$$

donde: θ_r , saturación residual del suelo; θ_e , porosidad efectiva; PS , porcentaje de arena; PC , porcentaje de arcilla; η , porosidad total del suelo; ψ , succión capilar del frente húmedo, plg; K , conductividad hidráulica saturada, plg/hr.

ANEXO D. GRÁFICO PARA CALCULAR EL VALORE DE LOS COEFICIENTES a , b Y c , EN LA ECUACIÓN 3.12 Y 3.14

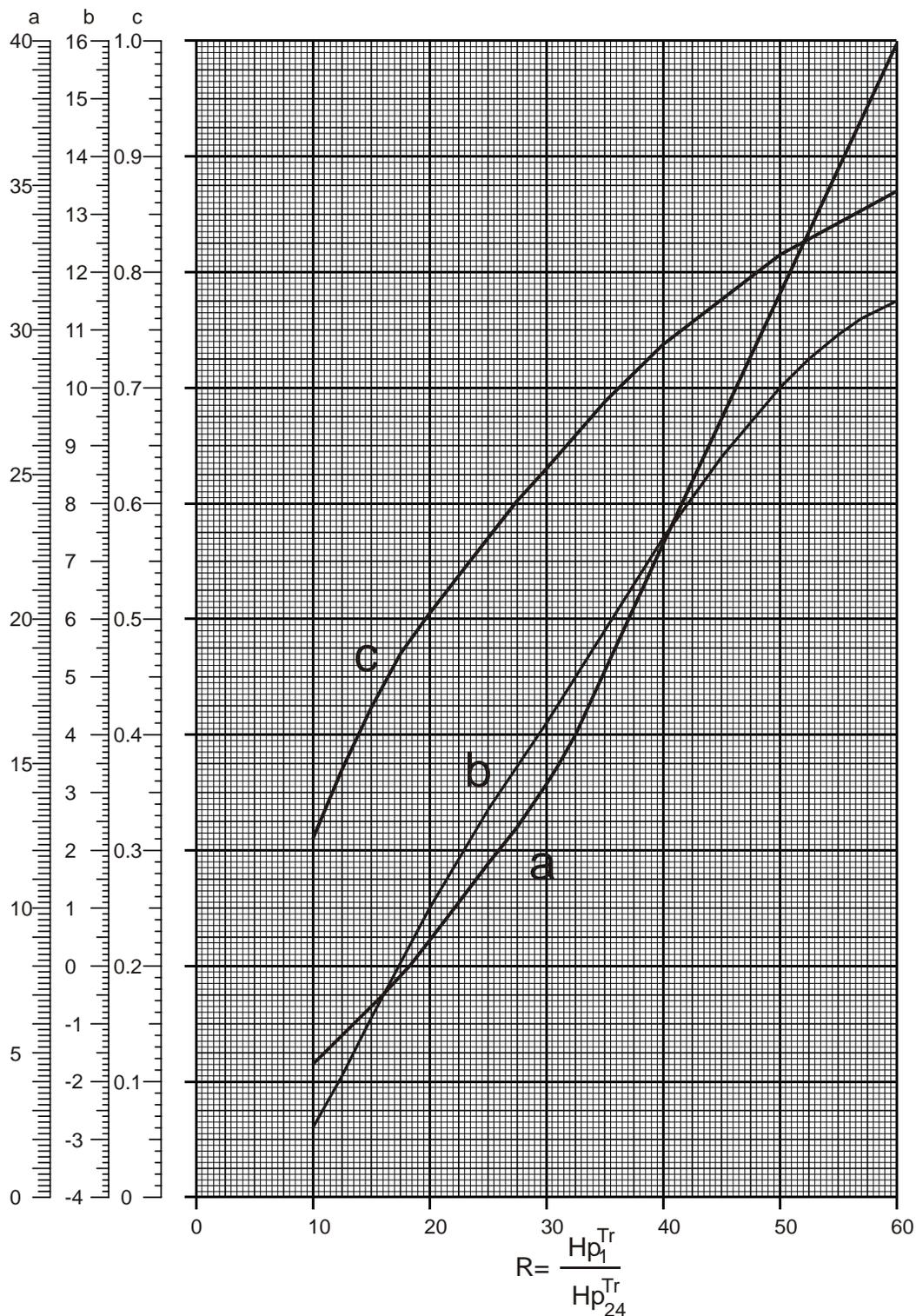


Figura D.1. Relación del factor R (ec. 3.14) con los coeficientes a , b y c , para la ecuación (3.12).