



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO EN DESARROLLO SOSTENIBLE DE ZONAS INDÍGENAS

ANÁLISIS GEOMORFOMÉTRICO Y DE LA EROSIÓN DE LA MICROCUENCA LA CIÉNEGA, MUNICIPIO DE MALINALTEPEC, GUERRERO

JAVIER BAILÓN MIRANDA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO TECNÓLOGO

PUEBLA, PUEBLA

2018



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

SUBDIRECCIÓN DE EDUCACIÓN
CAMPUS PUEBLA

CAMPUE- 43-2-03

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe **Javier Bailón Miranda**, alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Angel Bustamante González**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Análisis geomorfológico y de la erosión de la microcuenca La Ciénega, municipio de Malinaltepec, Guerrero**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Puebla, Puebla, 12 de enero del 2018.

Javier Bailón Miranda


Vo. Bo. Profesor Consejero o Director de Tesis
Dr. Angel Bustamante González


La presente tesis titulada: **Análisis geomorfológico y de la erosión de la microcuenca La Ciénega, municipio de Malinaltepec, Guerrero**, realizada por el alumno: **Javier Bailón Miranda**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


MAESTRO TECNÓLOGO
DESARROLLO SOSTENIBLE DE ZONAS INDÍGENAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. ANGEL BUSTAMANTE GONZÁLEZ

ASESOR: 
DR. SAMUEL VARGAS LÓPEZ

ASESOR: 
DR. JUAN MORALES JIMÉNEZ

ASESOR: 
DR. MIGUEL ÁNGEL CASIANO VENTURA

Puebla, Puebla, México, 2018

ANÁLISIS GEOMORFOMÉTRICO Y DE LA EROSIÓN DE LA MICROCUEENCA LA CIÉNEGA, MUNICIPIO DE MALINALTEPEC, GUERRERO

Javier Bailón Miranda, M.T.

Colegio de Postgraduados, 2018

Se realizó un análisis geomorfológico y del proceso erosivo de la microcuenca La Ciénega, localizada en la Montaña de Guerrero, México, con el fin de evaluar su comportamiento hidrológico, así como su susceptibilidad a la erosión y condición de pérdida actual de suelo. En el análisis geomorfológico se estimaron parámetros convencionales de análisis de cuencas, mientras que la erosión potencial y la actual se determinaron utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS). Con la EUPS se evaluó la capacidad de reducción de la erosión de las prácticas de conservación de surcado al contorno, terrazas de formación sucesiva y barrera viva con vetiver (*Vetiveria zizanioides*). Los resultados indicaron que la microcuenca presenta características geomorfológicas (pendiente media mayor de 23.9%, red de drenaje de 147 corrientes y tiempo de concentración de 98.9 minutos), que la hacen susceptible a la erosión y la generación de grandes volúmenes de escurrimiento. El 99.8% de la superficie de la microcuenca tiene una erosión potencial fuerte o muy fuerte. A pesar de que la microcuenca tiene un alto potencial erosivo, solamente en el 42.78% de la superficie de la microcuenca la erosión actual es fuerte o muy fuerte, debido a la presencia de extensas áreas de bosque y pastizales. De todas las prácticas de conservación evaluadas, solamente las barreras vivas con pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) reducen de manera significativa la erosión en la microcuenca.

Palabras clave: erosión actual, erosión potencial, vetiver.

GEOMORPHOMETRIC AND EROSIONAL ANALYSIS OF THE MICROWATERSHED LA CIENEGA, MUNICIPALITY OF MALINALTEPEC, GUERRERO

Javier Bailón Miranda, M.T.

Colegio de Postgraduados, 2018

A geomorphological and erosion process analysis of the La Cienega watershed, located in the Mountain of Guerrero, Mexico, was conducted in order to assess the hydrological behavior of the watershed and its erosion hazard and the current soil loss. Conventional parameters of watershed analysis were estimated in the geomorphological analysis, while the potential and current erosion were determined using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The ability of the conservation practices of contour plowing, successive formation terraces, and live barriers of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) to reduce erosion was evaluated with the USLE. The results indicated that the watershed geomorphology (average slope greater than 23.9%, a drainage network of 147 streams and concentration time of 98.87 minutes) makes the watershed susceptible to erosion processes and the generation of large volumes of surface runoff. 99.75% of the area of the watershed has a strong or very strong risk of erosion. Despite the high risk of erosion, current erosion soil loss is strong or very strong in only 42.78% of the watershed, which is explained by the presence of large areas of forest and grassland. Of all conservation practices evaluated, vetiver grass hedgerows is the only practice that can significantly reduce erosion in the watershed.

Key words: current erosion, potential erosion, vetiver grass

AGRADECIMIENTOS

A dios por prestarme la vida así como por permitirme emprender este maravilloso quehacer dentro del sector académico.

A mis padres Gumaro Bailón Ochoa y Carmí Miranda Lagunas por darme la vida y por haberme inculcado valores; dentro de los que destaco la dignidad, la humildad y el respeto hacia las personas. Sin su comprensión, difícilmente hubiera culminado los diferentes niveles de escolaridad.

A mis hermanas Briselda, Yolanda, Ana Lilia y Magali así como a mi único hermano varón Gilberto (†) por su constante e incansable apoyo moral.

A mi esposa Fabiola Sierra Cantú por su genuina forma de brindarme apoyo y motivación a la hora de emprender proyectos personales.

Al Colegio de Postgraduados por haberme permitido emprender mis estudios de maestría.

Al Dr. Angel Bustamante González por el valioso tiempo que me brindo a lo largo de esta actividad de investigación. Valoro y admiro su ética profesional, así como sus conocimientos dentro del sector ambiental.

Al Dr. Samuel Vargas López por su ética profesional, por abrirme las puertas de la maestría y por formar parte del consejo particular.

Al Dr. Juan Morales Jiménez por sus valiosas aportaciones.

Y finalmente a cada uno de profesores del Colegio de Postgraduados que intervinieron en mi formación académica de la maestría.

DEDICATORIA

A Juan Miranda Román:

Dedico este trabajo de investigación a mi abuelo *Juan Miranda Román* por ser un pilar emblemático para todas las familias que nacieron de él, por representar un ejemplo viviente para mí, para la familia y para todas las personas allegadas a él, por sus sabios y atinados consejos para encarar la vida, por ser una persona congruente y que predica con la práctica diaria, por navegar por la vida con actitud positiva y determinación, indicar que a pesar de no haber concretado sus estudios de primaria nació con ese don e interés por aprender cosas nuevas a través de la lectura de diversas fuentes y por ende de desarrollar ese liderazgo que siempre lo ha caracterizado.

A Gilberto Bailón Miranda

También dedico esta investigación a mi hermano Gilberto (†), que se armó de valor para desafiar la vida y venirse a Chilpancingo de los Bravo a emprender sus estudios de licenciatura, desafortunadamente dios lo mando traer 69 días antes de su graduación. Sé que físicamente no podrá leer estas líneas de dedicatoria, pero de lo que si estoy seguro es de que estará muy feliz en el cielo celebrando con los ángeles y familiares que ya se nos adelantaron un triunfo más de su hermano mayor y que desde haya nos colmará de bendiciones a toda la familia, amigos y conocidos. Descansa en paz hermano.

CONTENIDO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. LA CUENCA COMO UNIDAD DE PLANIFICACIÓN	4
2.1. El Concepto de cuenca.....	4
2.2. Niveles jerárquicos de las cuencas en México.....	5
2.2.1. Región hidrológica	6
2.1.2. Cuencas.....	6
2.2.3. Subcuencas	6
2.2.4. Microcuencas.....	7
2.3. Planeación y gestión de cuencas	7
2.3.1. Concepto de planificación y gestión o manejo con enfoque de cuencas	8
2.3.2. Enfoques de manejo de cuencas.....	9
2.4. Preocupación internacional por el deterioro de las cuencas.....	13
CAPÍTULO III. EL ANÁLISIS DE CUENCAS COMO SOPORTE PARA ENTENDER EL SISTEMA DE LA CUENCA Y PARA EL MANEJO DE CUENCAS.....	16
3.1. Análisis morfométrico de la cuenca	16
3.1.1. Área de drenaje	17
3.1.2 Perímetro	17
3.1.3. Tamaño.....	18
3.1.4. Curva hipsométrica	18
3.1.5. Elevación media.....	18
3.1.6. Frecuencia de altitudes.....	19
3.1.7. Pendiente.....	19
3.1.8. Factor de forma (F)	19
3.1.9. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K)	20
3.1.10. Relación de elongación (R).....	20
3.1.11. Coeficiente de masividad (K_m)	20
3.1.12. Pendiente media	20
3.1.13. Cuantificación de la red hídrica.....	21
3.1.14. Orden mayor de la red hídrica	21

3.1.15. Relación de bifurcación.....	22
3.1.16. Densidad de drenaje.....	23
3.1.17. Densidad de corriente.....	23
3.1.18 Longitud del cauce principal	23
3.1.19. Pendiente del cauce principal	24
3.1.20. Tiempo de concentración.....	24
3.2.1 Estimación del escurrimiento medio	24
3.2.2. Escurrimiento máximo instantáneo	25
3.3. Estimación de riesgos de erosión y/o erosión actual con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).....	28
3.4 Caracterización biológica.....	35
3.5 Caracterización socioeconómica	35
CAPÍTULO IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.....	37
4.1 Planteamiento del problema	37
4.2. Objetivos.....	39
4.3. Hipótesis.....	40
CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS	41
5.1. Delimitación de la microcuenca.....	41
5.2. Caracterización biofísica de la microcuenca.....	41
5.3. Análisis geomorfométrico	41
5.3.1 Tamaño.....	41
5.3.2. La curva hipsométrica.....	42
5.3.3. Elevación media.....	42
5.3.4. Frecuencia de altitudes.....	42
5.3.5. Pendiente media	42
5.3.6. Coeficiente o factor de forma	43
5.3.7. Coeficiente de compacidad.....	43
5.3.8. Proporción de elongación	44
5.3.9. Relación de circularidad (R).....	44
5.3.10. Coeficiente de masividad (<i>Km</i>)	45
5.3.11. Pendiente media de la cuenca.....	45

5.3.12. Cuantificación de la red hídrica.....	45
5.3.13. Orden mayor de la red hídrica	46
5.3.14. Relación de bifurcación.....	46
5.3.15. Densidad de drenaje.....	47
5.3.16. Densidad de corriente.....	47
5.3.17. Longitud del cauce principal	48
5.3.18. Pendiente del cauce principal	48
5.4. Tiempo de concentración.....	48
5.5. Estimación del escurrimiento medio y máximo instantáneo	49
5.5.1 Cálculo del escurrimiento medio escurrido	49
5.5.2 Cálculo del escurrimiento máximo instantáneo.....	51
5.6. Estimación de la erosión con la EUPS.....	52
5.6.1 Erosión actual.....	52
5.6.2 Estimación de la erosión potencial.....	53
5.6.3. Estimación de los parámetros de la EUPS	54
5.7. Estimación de la erosión bajo diferentes escenarios de prácticas de conservación.....	62
CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
6.1 Ubicación de la microcuenca.....	64
6.2 Características físicas y bióticas.....	66
6.2.1 Climatología.....	66
6.2.2. Edafología.....	67
6.2.3 Fisiografía	69
6.2.4 Hidrología	70
6.2.5 Geología	70
6.2.6 Uso de suelo y vegetación.....	71
6.2.7 Fauna.....	73
6.3 Análisis hidrogeomorfológico de la microcuenca la Ciénega	73
6.3.1 Parámetros del relieve	73
6.3.2 Parámetros de la red hídrica.....	81
6.4 Escurrimientos	87

6.4.1 Escurrimiento medio	87
6.4.2 Escurrimiento máximo instantáneo	87
6.5. Erosión de la microcuenca	88
6.6 Propuestas de prácticas de conservación de suelos de la microcuenca ..	95
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
7.1. Conclusiones.....	102
7.2. Recomendaciones	104
CAPÍTULO VIII. LITERATURA CITADA	105

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valor de erosionabilidad estimado en función de la unidad de suelo y su textura	31
Cuadro 2. Valores de c que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo	34
Cuadro 3. Forma de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad.....	44
Cuadro 4. Estaciones climatológicas.....	50
Cuadro 5. Valores del coeficiente de escurrimiento	50
Cuadro 6. Ponderación del coeficiente de escurrimiento c de la microcuenca la ciénega.....	51
Cuadro 7. Tasa de erosión hídrica	53
Cuadro 8. Precipitación media anual de las estaciones utilizadas para la regresión precipitación - altitud	55
Cuadro 9. Comunidades que se encuentran dentro de la microcuenca	65
Cuadro 10. Datos para generar la curva hipsométrica	75
Cuadro 11. Pendiente media de la microcuenca la ciénega	78
Cuadro 12. Orden de corriente que conforma la microcuenca	83
Cuadro 13. Relación de bifurcación	83
Cuadro 14. Parámetros básicos	86
Cuadro 15. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca	86
Cuadro 16. Parámetros del relieve de la microcuenca	87
Cuadro 17. Parámetros de la red hídrica	87
Cuadro 18. Erosión potencial	94
Cuadro 19. Erosión actual en la microcuenca la ciénega.....	95
Cuadro 20. Erosión estimada al utilizar surcado al contorno	96
Cuadro 21. Erosión estimada al implementar terrazas en contorno.....	97
Cuadro 22. Erosión estimada con terrazas vivas con vetiver	100
Cuadro 23. Comparación de la superficie de cambio entre la erosión actual, los surcos en contorno, las terrazas en contorno y las barreras vivas con vetiver	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Órdenes de corriente según strahler (1964).....	22
Figura 2. Localización de las estaciones utilizadas para la regresión precipitación – altitud.....	55
Figura 3. Asentamientos humanos.....	59
Figura 4. Pastizales presentes en la microcuenca	60
Figura 5. Bosque primario	60
Figura 6. Derrumbes y cárcavas	61
Figura 7. Vegetación secundaria.....	61
Figura 8. Área agrícola	62
Figura 9. Distribución espacial de las comunidades.....	64
Figura 10. Climas presentes.....	67
Figura 11. Tipos de suelo	68
Figura 12. Subprovincias fisiográficas de guerrero	69
Figura 13. Regiones hidrográficas, cuencas y subcuencas de guerrero	70
Figura 14. Mapa de geología.....	71
Figura 15. Uso de suelo y vegetación	72
Figura 16. Curva hipsométrica de la microcuenca	75
Figura 17. Frecuencias altimétricas de la microcuenca la ciénega	76
Figura 18. Gradientes altitudinales de la microcuenca	77
Figura 19. Mapa de pendientes.....	79
Figura 20. Órdenes de corriente y tipo de drenaje	82
Figura 21, perfil longitudinal del cauce principal.....	85
Figura 22. Índice de erosividad de la lluvia (factor r)	88
Figura 23. Índice de erosionabilidad (factor k).....	89
Figura 24. Valores del factor ls.....	90
Figura 25. Valores del factor c.....	91
Figura 26. Factor p utilizando surcado al contorno.....	92
Figura 27, factor p utilizando terrazas de formación sucesiva	92
Figura 28. Factor p utilizando vetiver como barreras vivas	93
Figura 29. Erosión potencial de la microcuenca la ciénega	94
Figura 30. Erosión actual en la microcuenca.....	95
Figura 31. Erosión estimada al utilizar surcado al contorno	96
Figura 32. Erosión estimada con terrazas en contorno	97
Figura 33. Erosión utilizando barreras vivas con vetiver	98
Figura 34. Planta de vetiver en maceta para reproducción	99
Figura 35. Barrera viva con vetiver en el área de la microcuenca.....	99
Figura 36. Comparación de la superficie de cambio entre la erosión actual, los surcos en contorno, las terrazas en contorno y las barreras vivas con vetiver	101

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La microcuenca “La Ciénega” es parte de un sistema de cuencas montañosas de la región Montaña de Guerrero que vierten sus aguas en el Océano Pacífico. La región presenta características y problemas biológicos, ambientales, sociales y económicos particulares. En el aspecto socioeconómico, la región se caracteriza por una fuerte presencia de población indígena, baja producción agropecuaria, pobreza y marginación. En el aspecto biológico, se tiene una alta diversidad biológica, la cual está siendo amenazada por la alteración y pérdida del hábitat. Los problemas ambientales, asociados a procesos de deforestación y desarrollo de infraestructura son notables, ocasionando, entre otros problemas, erosión de los suelos y movimientos de masas que afectan a la producción de cultivos y la seguridad de la población local.

La microcuenca “La Ciénega” ocupa una extensión territorial de 91.7 km². En ella se encuentran inmersas 28 comunidades, de las cuales siete se ubican en la zona de cabecera, 13 en la zona de captación o transporte y ocho en la zona de emisión o parte baja de la microcuenca. Los problemas ambientales dentro de la microcuenca hoy en día son muy evidentes, ya que se pueden visualizar grandes extensiones deforestadas, que aunado a las fuertes pendientes y a las actividades agrícolas que se practican provocan problemas severos de erosión laminar e hídrica en las diferentes zonas que la integran (zona de cabecera, de garganta y depósito).

En este trabajo se hace un análisis geomorfométrico de la microcuenca y una estimación de la erosión potencial y actual, con el fin de comprender el comportamiento hidrológico de dicho espacio y evaluar la susceptibilidad a los procesos erosivos, y así identificar posibles acciones de intervención para el control de la erosión. Se determinaron los parámetros geomorfológicos y la cantidad de suelo que es erosionado a las partes bajas de la microcuenca. Los parámetros geomorfométricos obtenidos fueron los convencionales para un análisis de cuencas.

La erosión se estimó con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS), tomando en cuenta la cantidad de la lluvia que precipita en la zona (factor erosividad, R), el tipo de suelo (factor erodabilidad, K), las pendientes predominantes (factor topográfico, LS), la cubierta vegetal (factor C) y el manejo de los suelos agrícolas de la microcuenca (factor P). Tanto el análisis geomorfológico como la estimación de la erosión potencial y actual del suelo se hicieron como base en un sistema de información geográfica, utilizando el programa ArcGis versión 10.3.

Para el control de la erosión del suelo en las tierras agrícolas se seleccionaron las prácticas de surcado al contorno, terrazas de formación sucesiva y terrazas vivas con vetiver, para ser evaluadas con la EUPS. Para esto se consideraron valores del factor C reportadas en la literatura, para estimar la pérdida de suelo.

Los resultados obtenidos mostraron que la microcuenca tiene características geomorfométricas que la hacen susceptible a la generación de grandes cantidades de escurrimiento superficial y a los procesos erosivos. Aunque la erosión potencial es alta en la mayor parte de la superficie de la microcuenca, la erosión actual es fuerte y muy fuerte solamente en una porción de la microcuenca, debido a la presencia de una extensa zona de bosque y pastizal. Por esto, es importante que los pobladores locales estén conscientes de la importancia de frenar la tala de los bosques primarios. En las tierras agrícolas, donde se presenta principalmente la erosión fuerte y muy fuerte, la erosión actual sólo puede reducirse con prácticas vegetativas, como es el caso de la barrera viva con vetiver. Las prácticas y obras mecánicas, como el surcado al contorno y las terrazas de formación sucesiva tienen un impacto muy reducido.

Finalmente, la información obtenida en la presente investigación podrá ser de interés para los tomadores de decisiones de las instituciones públicas y privadas para la integración de planes de manejo, ordenamientos territoriales o en la inclusión de un plan de desarrollo municipal, por mencionar algunos casos. Además, podrá ser un documento de consulta y/o material de apoyo para profesores y alumnos universitarios, directivos, técnicos y/o facilitadores de organizaciones no

gubernamentales, así como para líderes comunitarios, ya que son estos últimos los principales facilitadores en el proceso de planificación y gestión institucional para el desarrollo rural.

CAPÍTULO II. LA CUENCA COMO UNIDAD DE PLANIFICACIÓN

2.1. El Concepto de cuenca

La cuenca se ha considerado como una unidad de estudio y de gestión o manejo del agua, de otros recursos naturales o de un territorio. Desde el punto de vista geográfico, la cuenca hidrográfica es una depresión del relieve terrestre definida por la línea divisoria de las aguas también llamada “parte-aguas” que se identifica fácilmente en las elevaciones de dicho espacio, donde las aguas escurren por efecto de gravedad de las partes altas a las partes bajas (Aguilar, 2004). En este mismo sentido, Breña y Jacobo (2006) consideraron a la cuenca hidrográfica desde el punto de vista hidrológico, como una unidad territorial natural o superficie terrestre definida por sistemas topográficos que capta el agua de la precipitación y la transfiere a las partes bajas, mediante una red de drenaje, formando un cauce principal que desemboca sus aguas hacia un punto común de salida, que puede ser a otras cuencas aledañas, a un lago o finalmente al océano. Una definición similar fue presentada en las conclusiones del segundo Coloquio Internacional sobre “Cuencas Sustentables” llevado a cabo en México del 29 de septiembre al 1 de octubre de 2010, en donde se define a la cuenca como el “área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal y por ésta hacia un punto común de salida” (SEMARNAT y CONAGUA, 2010).

En la Ley de Aguas Nacionales (2014) se define también a la cuenca hidrográfica como la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades por su delimitación de un parte aguas o divisoria de las aguas. Esta divisoria es la línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad. A partir de esta línea, el agua escurre en distintas formas. El agua que no se almacena en las depresiones de la cuenca fluye hasta un punto de salida, que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior. En la cuenca se forma una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal. Es posible identificar cuencas en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En la cuenca coexisten

los recursos agua, suelo, flora, fauna y otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. Las cuencas hidrológicas, conjuntamente con los acuíferos, constituyen las unidades de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas. La subcuenca es un “Territorio que drena hacia el cauce principal de una cuenca, el cual está conformado por un grupo de microcuencas” (Proyecto Tacaná, 2009). Bustamante (2006) señala que la diferenciación en cuencas, subcuencas y microcuencas hace únicamente referencia a las diferentes magnitudes de la extensión, ya que todas se conceptualizan como una cuenca.

Las definiciones anteriores pueden ser concebidas con ciertas diferencias. Sin embargo, todas consideran a la red hídrica y al parteaguas como parte esencial para su definición y delimitación. En este sentido, a la cuenca también se le conoce con otros nombres tales como: unidad hidrológica, unidad físico-biológica, unidad socio-económico-política, cuenca de captación, sistema fluvial, área de drenaje, área de desagüe, cuenca de recepción, zona de captación, vertiente y cuenca hidrogeológica (FAO, 1992).

Según la FAO (1992), existen tres niveles de estudio para realizar la planificación territorial a nivel de cuenca, teniendo como eje principal los problemas ambientales existentes. De acuerdo al nivel de intervención, los espacios hídricos han sido clasificados bajo el siguiente orden jerárquico: cuenca hidrográfica, subcuenca y microcuenca. Cada espacio representa condiciones particulares en extensión territorial. La intervención federal o estatal en la planificación de cuencas para el manejo de los recursos naturales se da principalmente a nivel de cuenca y subcuenca. Mientras que la intervención local (comunidad o ejido) se da a nivel de microcuenca.

2.2. Niveles jerárquicos de las cuencas en México

2.2.1. Región hidrológica

La región hidrológica es el primer nivel de jerarquización de cuencas utilizado en México. Se tienen delimitadas 37 regiones hidrológicas, delimitadas por los parteaguas de las cuencas de los ríos principales de México. Con fines administrativos, estas regiones hidrológicas se agrupan en 13 regiones hidrológicas-administrativas (CONAGUA, 2015)

2.1.2. Cuencas

En México, las cuencas hidrológicas son espacios hídricos de menor extensión en relación a una región hidrológica (RH). En una RH se pueden encontrar una o varias cuencas hidrológicas. A nivel nacional se definieron 1 474 cuencas hidrológicas. La cuenca del Río Bravo es la que ocupa mayor extensión con 222 192.45 km², seguida de la cuenca del Río Balsas con 112 036.64 km² (INEGI, INE y CONAGUA, 2007). La misma fuente cita que en el Estado de Guerrero se encuentran 54 cuencas hidrológicas, de las cuales la cuenca del Río Balsas es la que mayor extensión territorial ocupa con 33 798.23 km², seguida de la cuenca del Río Papagayo con 7 553.80 km² y en tercer lugar la cuenca del Río Quetzala con 4 588.57 km².

2.2.3. Subcuencas

Según datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1998), en México se han definido 3 115 sub cuencas. La subcuenca Menda es la de mayor superficie en México, con 56 751.86 km², y se ubica al sureste del país entre los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. La segunda en extensión es la subcuenca del Papaloapan, con 46 283.79 km², localizada en los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz. En tercer lugar se encuentra la subcuenca de Monclova, con 22 277.52 km², ubicada en el Estado de Coahuila de Zaragoza.

En el estado de Guerrero se encuentran 153 subcuencas (CONABIO, 1998). La de mayor superficie es la subcuenca Mezcala – Grande, con una superficie de 4 615.90 km². En segundo lugar, por extensión, se tiene a la subcuenca Omitlán – Azul, con 3 394.53 km². Una tercera subcuenca importante por su extensión es la subcuenca de Zapotitlán, con una superficie de 2 277. 75 km².

2.2.4. Microcuencas

No se tiene una delimitación estandarizada y reconocida de microcuencas de México. Esto se debe tanto a una limitación de escala como al nivel jerárquico seleccionado por las instituciones públicas rectoras del manejo de cuencas. En el primer caso, a pesar de los avances tecnológicos de procesamiento y manejo de la cartografía digital, es complicado tener un mapa nacional de microcuencas. Con referencia al segundo aspecto, la Comisión Nacional del Agua, que es la principal institución gubernamental de la política nacional de cuencas, principalmente para el recurso hídrico, pone énfasis en la gestión de regiones hidrológicas y cuencas, reconociendo como la menor unidad la subcuenca. Es en el sector agropecuario, a través del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) y de otras instituciones como la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA), donde se ha considerado a la microcuenca como unidad de planeación y manejo. Aunque el FIRCO ha delimitado las microcuencas para los estados del país, la difusión y uso de su cartografía es muy limitada. Por otro lado, la microcuenca ha sido utilizada ampliamente en proyectos locales por Organizaciones de la Sociedad Civil.

2.3. Planeación y gestión de cuencas

2.3.1. Concepto de planificación y gestión o manejo con enfoque de cuencas

La planificación es un proceso de reflexión que se desarrolla antes de actuar. Este proceso busca conocer el pasado y la realidad actual, para hacer proyecciones al futuro. Cuando se han organizado los conocimientos se tiene capacidad de tomar decisiones para el presente. La planificación es el medio que permite darse la mano al presente, al pasado y al futuro (Andrade, 1996).

La cuenca hidrográfica es considerada como una unidad territorial básica para la planeación y el manejo de los recursos naturales (Brooks *et al.*, 1997). Se considera a la cuenca como la unidad de planeación, por tener sus límites claramente definidos y porque todas las actividades que realice el hombre dentro de este espacio van a repercutir en el recursos hídrico.

Para la planificación de cuencas se tienen que considerar de manera sinérgica dos visiones: la visión convencional o técnica y la visión participativa o social. La primera de ellas es ejecutada por instituciones públicas, principalmente. En ella se considera la generación de información temática y descriptiva. Sin embargo, dicha información requiere fortalecerse con procesos participativos y de gestión para ser aterrizada en la práctica. La segunda visión es aquella donde se incluyen los saberes y prácticas que provienen de las comunidades campesinas y/o poblaciones locales (Zury, 2011).

El manejo o gestión de cuencas se ha conceptualizado y aplicado con diferentes perspectivas. A nivel mundial, se ha puesto mayor énfasis en el manejo coordinado del agua en el territorio que ocupa una cuenca (Brooks *et al.*, 1997). Dourojeanni *et al.* (2002), señalan la falta de una claridad conceptual en América Latina sobre lo que es o debe ser el manejo o gestión de cuencas. Dentro de las modalidades de intervención en las cuencas, identifican el enfoque de cuencas experimentales, el desarrollo regional de cuencas, el manejo sectorial del agua (agricultura, doméstico, industrial, etc.) y multisectorial del agua, y el manejo integral de recursos naturales.

2.3.2. Enfoques de manejo de cuencas

2.3.2.1. Enfoque de la cuenca como unidad de análisis hidrológico y laboratorios ambientales

Las cuencas se han utilizado para entender los flujos y almacenamientos de agua, como un soporte para la toma de decisiones del uso del suelo y manejo de los recursos naturales. Las cuencas experimentales son diferentes a un laboratorio por su complejidad y control. La cuenca experimental es mucho más compleja que un laboratorio. Un estudio experimental de cuenca “permite generar información para la planeación y toma de decisiones en el desarrollo regional” (Bustamante *et al.*, 2002).

El Servicio Forestal de los Estados Unidos estableció en 1910 una cuenca experimental en Wagon Wheel Gap, Colorado. Posteriormente, en 1935, el Servicio de Conservación de Suelos estableció otras cuencas experimentales. En Texas, se establecieron tres cuencas experimentales, de las cuales permanecen la cuenca experimental de Blackland y la del norte de los Apalaches. Las primeras cuencas experimentales se orientaron a determinar los efectos de las prácticas de manejo agrícola y forestal, los escurrimientos máximos y la erosión de los suelos (Committee on U.S. Geological Survey (USGS) Water Resources Research, 1997).

En el periodo de 1955 a 1965 se tuvo un auge en el establecimiento de cuencas experimentales en los Estados Unidos. Se tuvo como objetivo estudios en cuencas de mayor extensión y de una mayor diversidad fisiográfica y climática. En este periodo se iniciaron estudios en cuencas que aún hoy son emblemáticas en los estudios de procesos hidrológicos de cuencas. La cuenca experimental de Hubbard Brook se estableció en 1955 como un centro de investigación hidrológica en el noroeste de los Estados Unidos. Ocho años después, su enfoque evolucionó hacia un enfoque más ecosistémico, para estudiar las respuestas de sus ecosistemas a diferentes perturbaciones antropogénicas (Cambell *et al.*, 2007). Otras cuencas emblemáticas

son las cuencas de Coweeta, Walnut Gulch, San Joaquin Experimental Range, Watkinsville, Mahantango, North Temperate Lakes, con más de 30 años de información hidrológica.

En México, la adopción de los estudios experimentales de cuencas siguió el modelo de planificación de la Autoridad del Valle del Tennessee. Sin embargo, los estudios realizados, comparados con la cantidad de estudios en los países desarrollados de Estados Unidos y Europa, son escasos. Los estudios experimentales de cuencas en el país se han orientado a la restauración y al manejo de recursos naturales, con énfasis en la conservación del suelo y de agua (Bustamante *et al.*, 2002). Los estudios de la UNAM en la estación de Biología Chamela, iniciados en 1982, son parte de la experiencia con el enfoque de cuencas experimentales (García-Oliva *et al.*, 2006).

2.3.2.2. Modelo de desarrollo regional por cuencas

El uso de la cuenca como unidad de análisis de las políticas de planeación y gestión de los recursos hídricos en los Estados Unidos data de mediados del siglo diecinueve, motivado por temas como el de las inundaciones del Río Mississippi. El concepto de manejo de cuencas fue fortalecido por el movimiento conservacionista de principios del siglo veinte. En los años veinte y treinta del siglo pasado, los programas del Servicio de Conservación y de la Autoridad del Valle del Tennessee convirtieron a la cuenca en un concepto central de la planeación y del desarrollo regional (Committee on U.S. Geological Survey (USGS) Water Resources Research, 1997).

El desarrollo regional de cuencas tuvo la influencia fundamental del modelo de gestión de cuencas de la Autoridad del Valle del Tennessee (Tennessee Valley Authority, TVA). Este proyecto inició en 1933 como una de las acciones derivadas para afrontar la “Gran Depresión” de los Estados Unidos. Una característica importante de esta modalidad de gestión de cuencas fue que consideró tanto proyectos de infraestructura (presas, hidroeléctricas, navegación y control de inundaciones), como actividades para mejorar el nivel de vida de la población de la cuenca (Miller y Reidinger, 1998).

En México, los proyectos de las Comisiones intersecretariales de cuencas de los años 40 siguieron el modelo del TVA. La Comisión del Papaloapan, por ejemplo, surgió en 1943 como una comisión intersecretarial para abordar los problemas de inundaciones en la cuenca. En 1947 se formalizó por decreto presidencial como la Comisión del Papaloapan. Además de acciones para solucionar el problema de las inundaciones, las actividades de la Comisión del Papaloapan incluyeron temas de saneamiento, salud, desarrollo ganadero, educación y desarrollo de la industria azucarera. Después de 39 años de funcionamiento, la Comisión fue abrogada en 1986 (Ríos, 2006). Las inundaciones, uno de los problemas principales abordados por la Comisión del Papaloapan, continúan actualmente y la percepción local es que los proyectos de la Comisión fueron poco exitosos (Semanao La Región, septiembre de 2013).

Además de la Comisión del Papaloapan, se crearon siete comisiones en el país. En 1947 se creó la Comisión del Tepalcatepec, ampliada posteriormente en 1960 como Comisión del Balsas. En 1951 se constituyó la Comisión del Fuerte, la Comisión del Valle de México, la Comisión del Grijalva y la Comisión del Lerma-Chapala-Santiago. En 1958 se crearon las Comisiones de Estudio del Río Pánuco (Shapira, 1973). La creación de estas comisiones tuvo motivaciones e implicaciones económicas y políticas. Desde el punto de vista de inversión, las Comisiones del Tepalcatepec y del Fuerte fueron exitosas, mientras que el éxito fue menor para la comisión del Papaloapan (Barkin y King, 1986).

2.3.2.3. Enfoque de cuencas para la gestión sectorial y multisectorial del agua

La cuenca se ha utilizado como unidad de planeación y gestión de los recursos hídricos. Esta gestión puede orientarse a un solo usuario, como es la agricultura o para el uso doméstico. Esto es el enfoque sectorial para la gestión del recurso hídrico. Es

un enfoque fragmentado que puede llevar a los gobiernos a aplicar políticas de uso del agua que favorezcan a un sector en detrimento de otro (Jønch-Clausen y Fugl, 2001). En México, sobre todo a nivel estatal y municipal, predomina un enfoque sectorial de la gestión del agua. Generalmente se pone el mayor énfasis en el agua de uso doméstico, por lo que es común que en cada estado o municipio exista un organismo de saneamiento y agua potable.

Bustamante (2006) menciona que un enfoque tradicional de cuencas para la gestión del recurso hídrico consiste en “estimar la necesidad y disponibilidad de aguas, y construir la infraestructura necesaria para garantizar su abastecimiento a los diferentes usos”. Esto corresponde a una gestión multisectorial del recurso hídrico. En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) orienta la gestión del agua hacia este enfoque. En los Consejos de Cuencas se negocia de alguna manera, aunque la Comisión es predominante en la decisión, la distribución del agua entre los diferentes usuarios de la cuenca.

2.3.2.4. Enfoque de cuencas para manejo integral de recursos naturales

La Global Water Partnership (2009) define al manejo integrada del recurso hídrico (MIRH) como “un proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinada del agua, tierra y los recursos asociados dentro de los límites de una cuenca para optimizar y compartir equitativamente el resultante bienestar socio-económico sin comprometer la salud de ecosistemas vitales a largo plazo”. Jønch-Clausen y Fugl (2001) enfatizan en la ambigüedad y complicación de la aplicación del concepto MIRH y mencionan que es un concepto que todo mundo usa pero que cada uno entiende de manera diferente. La definición de la Global Water Partnership (GWP) es similar a la utilizada en los enfoques actuales de manejo de cuencas. Brooks *et al.* (1997), por ejemplo, señalan que su perspectiva difiere del manejo tradicional que se concentra en la hidrología de la cuenca y se reconoce la productividad de la tierra como un componente integral del manejo de cuencas. Conceptualizan al manejo integrado de cuencas (MIC) como un proceso de manejo y protección de los recursos hídricos, así como el mantenimiento

de la capacidad e idoneidad de la tierra y recursos vegetales para la producción de bienes y servicios de manera sustentable. Una definición similar para el manejo integral de cuencas menciona Durojeannii (1994).

El concepto de manejo integral de cuencas se ha aplicado en los proyectos a escala de microcuenca. Debido a que el recurso hídrico es el elemento transversal para todos los sectores presentes en una microcuenca, este espacio es considerado como un sistema que agrupa no únicamente el recurso hídrico sino también los elementos socioculturales, económicos, demográficos y por supuesto los naturales. En este espacio existen entradas y salidas. Para realizar una gestión adecuada dentro de un espacio de esta naturaleza y bajo una visión sistémica, es necesario trabajar en modificar las entradas controlables o parcialmente controlables o también llamadas variables de decisión que se encuentran en la zona de cabecera y media de la cuenca, de tal manera que se lleve al máximo las salidas deseables y al mínimo las indeseables dentro de dichas zonas (Zury, 2011).

Por otra parte, la gestión a nivel de microcuenca tiene que partir de un interés local, respaldado por un proceso de participación colectiva y de concertación entre el gobierno local y la sociedad civil. Estos procesos deben promover la formulación, implementación y gestión de alternativas y metodologías de manejo de microcuencas.

2.4. Preocupación internacional por el deterioro de las cuencas

El deterioro de las cuencas hidrográficas es un problema serio que enfrentan hoy en día los países del mundo, específicamente. Los procesos de degradación de los suelos están orillando al abandono de tierras que antes representaban un potencial importante en la producción de alimentos agrícolas. El Banco Mundial (1992) dice que las pérdidas del potencial productivo son atribuibles al agotamiento de los suelos, ya que puede alcanzar anualmente un 0.5% a 5% del PIB en algunos países. Tomando

en consideración este dato, resulta desalentador sobre todo en países donde la base económica depende de la actividad agrícola.

Por otro lado, la ONU en el Programa 21 aprobado el 14 de junio de 1992 en la conferencia internacional celebrada en Río de Janeiro Brasil, mejor conocido como la Cumbre de la Tierra, se establecen las respuestas que la comunidad internacional ha establecido como medidas de acción en relación al medio ambiente y el desarrollo. En el capítulo 13, sección II, de dicho documento se establecen los criterios para la protección de los ecosistemas de montaña, en donde se estipula que:

“Las montañas constituyen una fuente importante de agua, energía, minerales, productos forestales, productos agrícolas y recreación, y son almacén de una gran diversidad biológica y de especies en peligro de extinción”.(https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1718a21_summary_spanish.pdf, consultado el 4 de septiembre de 2015).

También se menciona que *“los ecosistemas de montaña son sumamente vulnerables y son cada vez más susceptibles a la erosión del suelo, los deslizamientos y la rápida pérdida de hábitat y diversidad genética, la pobreza generalizada y la expansión de las poblaciones de habitantes de la montaña producen la deforestación, el cultivo de tierras marginales, el pastoreo excesivo del ganado, la pérdida de la cubierta de la biomasa y otras formas de degradación ambiental”* (https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1718a21_summary_spanish.pdf, consultado el 4 de septiembre de 2015).

Aunado a lo anterior descrito, se menciona que el 10% de la población mundial dependen de los servicios de los ecosistemas de montaña, pero que a pesar de ello aproximadamente la mitad sufren efectos de degradación en zonas de cuencas hidrográficas. Las propuestas del Programa 21 son muy claras y se centran en el desarrollo sostenible de las ecosistemas de montaña, a través del aprovechamiento de cuencas hídricas en actividades diversas que no pongan en riesgo las reservas

naturales en sitios ricos en especies y que por el contrario los gobiernos locales destinen incentivos hacia las comunidades indígenas para conservar dicho capital natural, a fin de diversificar a economía mediante actividades de turismo sostenibles, aprovechamientos de los recursos no maderables y otras actividades sostenibles a nivel de aldea, atender las zonas vulnerables a la erosión a las inundaciones u otros fenómenos naturales. Finalmente, se menciona que se tienen que establecer medidas preventivas para casos de desastres e inundaciones provenientes de zonas de montaña.

CAPÍTULO III. EL ANÁLISIS DE CUENCAS COMO SOPORTE PARA ENTENDER EL SISTEMA DE LA CUENCA Y PARA EL MANEJO DE CUENCAS

El análisis de cuencas es un procedimiento para caracterizar los rasgos, condiciones, procesos e interacciones humanas, acuáticas, ribereñas y terrestres dentro de una cuenca (U.S. Forest Service, 1995). Es una forma de comprender y organizar la información del ecosistema de una cuenca. Facilita también la planeación y ejecución de actividades de manejo, así como la estimación de posibles impactos de dichas actividades. Brooks *et al.* (1997) enfatizan en que es necesario entender la hidrología de cuenca para la planeación del manejo sostenible de recursos naturales. En este estudio el análisis de la cuenca se considera esencial para entender sus características y comportamiento hidrológico, por lo que constituye un soporte para la planeación de prácticas de producción y de conservación.

3.1. Análisis morfométrico de la cuenca

Las propiedades geomorfométricas de la cuenca describen cuantitativamente los rasgos físicos de las cuencas hidrográficas como unidades espaciales y de su red de drenaje. También permiten evaluar las particulares de cada cuenca y con ello implementar planes de desarrollo en dicha unidad, con la finalidad de proteger y conservar los recursos, bajo la premisa de lograr una producción sustentable. De tales datos se derivan los proyectos ecológicos y de ordenamiento territorial (Herrera, 2006). Los mismos autores sostienen que los estudios de ordenamiento territorial que consideran seriamente a los estudios morfométricos de cuencas son exitosos.

3.1.1. Área de drenaje

Es la representación plana en proyección horizontal de la superficie de la microcuenca, encerrada por el parte aguas. El valor del área real está condicionado a la complejidad del relieve, ya que al existir diferentes gradientes altitudinales existe mayor margen de error en la medida real de la superficie (Breña y Jacobo, 2006). Este parámetro nos da una idea del tamaño de la cuenca, además de que sirve de base para estimar otros parámetros geomorfométricos de la cuenca. Por otra parte, desde el punto de vista hidrológico, la superficie es fundamental para que los datos proporcionados por una estación de aforo tengan utilidad práctica. Si no se cuenta con el dato de la superficie drenada hasta dicha estación no se podría conocer la aportación de agua en un periodo determinado de tiempo (Jardi, 1985).

3.1.2 Perímetro

Al igual que la superficie y las medidas lineales que se pueden medir sobre la representación en un mapa topográfico, en el cálculo la longitud de la línea del perímetro lo que realmente medimos es la proyección en el plano horizontal. Esta medida difiere de la real, dependiendo del relieve o inclinación de dicha línea. El error que se comete es de una magnitud muy inferior a la de la medida en sí y, por tanto, totalmente despreciable. Normalmente a este parámetro se le representa con la unidad de medida en kilómetros (km). Este parámetro por sí solo no da ninguna información concerniente al tamaño o a la forma de la cuenca. Solo si se compara con cuencas de similar superficie el valor del perímetro nos podría dar una idea de la forma. Este parámetro, al igual que la forma de la cuenca, está relacionado con la litología y edad de la cuenca de drenaje. Materiales blandos darán formas redondeadas, mientras que materiales más duros darán formas más lobuladas (Jardi, 1985).

3.1.3. Tamaño

Este parámetro se relaciona con la captación y esorrentía de agua dentro de la cuenca. Campos (1998) propone la siguiente clasificación de tamaños de cuencas: muy pequeña (< 25 km²), pequeña (25 a 250 km²), intermedia-pequeña (250 a 500 km²), intermedia-grande (500 a 2500 km²), grande (2500 a 5000 km²) y muy grande (> 5000 km²).

3.1.4. Curva hipsométrica

Es la representación gráfica del relieve medio de la cuenca. Se construye colocando en el eje de las abscisas longitudes proporcionales a las superficies proyectadas en la cuenca (en km² o en porcentajes), comprendidas entre curvas de nivel consecutivas, hasta alcanzar la superficie total. En el eje de las ordenadas se colocan las cotas de las curvas de nivel consideradas. Guerra y González (2002) reportan la gráfica de Strahler donde se diferencian tres fases de evolución de la cuenca (juventud, madurez y vejez).

3.1.5. Elevación media

La elevación media de una cuenca tiene una influencia determinante en el régimen hidrológico. Esto se debe a que hay una relación de ella con las precipitaciones. Para estimar la elevación media es necesario disponer de un mapa con curvas a nivel. Para determinar la elevación media se utiliza la siguiente fórmula (Monsalve, 1998):

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * e_i}{A_t}$$

Donde:

E_m = Elevación media de la cuenca, en m

A_i = Área de cada franja en (km² o m²) de acuerdo al tamaño de la cuenca

e_i = Promedio de las curvas de nivel que delimita cada franja (cota media del intervalo), en m

A_t = Área total de la cuenca en (km^2 o m^2)

n = número de intervalos de clase

3.1.6. Frecuencia de altitudes

El análisis de frecuencias de altitudes o altimétricas indica frecuencias de ciertos niveles altimétricos de sitios específicos. En particular, se consideran rasgos de la cuenca como son cumbres, áreas de llanos o depresiones o en general diversas geoformas presentes en la cuenca (Racca, 2007).

3.1.7. Pendiente

Controla la velocidad con que se dará la escorrentía superficial y se ve reflejado en el tiempo de drenaje del agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales o cuerpos de agua que constituyen a la red hidrológica de las cuencas. Una mayor pendiente aumenta la posibilidad de generar grandes escurrimientos e inundaciones.

3.1.8. Factor de forma (F)

Es la longitud de la línea recta trazada desde la desembocadura del cauce principal hasta el límite extremo del parteaguas de la microcuenca de manera paralela al río principal. Este parámetro, además de representar la distancia comprendida desde el punto más lejano definido por el parteaguas hasta el punto de la desembocadura del cauce principal da una idea de la forma de la microcuenca, que tiene que ver en el comportamiento de los procesos hidrológicos. De acuerdo a Breña y Jacobo (2006), los escurrimientos superficiales responden de manera diferente de una cuenca alargada que la que se aproxima a una forma circular.

3.1.9. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K)

Es la relación entre el perímetro de la microcuenca y la circunferencia de un círculo que tenga la misma superficie (Breña y Jacobo, 2006). De tal manera que cuando más se acerca el valor de este índice a la unidad, se considera que la microcuenca tiene tendencia a la circularidad y por lo tanto es más compacta.

3.1.10. Relación de elongación (R)

Definido por Schumm (1956) como la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tenga la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima (L_m) de la cuenca medida desde la desembocadura hasta la divisoria de sus límites extremos sobre una línea recta paralela al eje del río principal (Geoconda et al. 2012). Este factor guarda mejor correlación con la hidrología de la cuenca.

3.1.11. Coeficiente de masividad (K_m)

Este coeficiente representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. Se consideran como cuencas montañosas aquellas que arrojan valores bajos, mientras que aquellas que presentan valores altos suelen ser cuencas llanas.

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}}$$

3.1.12. Pendiente media

Este parámetro hace referencia a la inclinación o declive promedio de la topografía de la microcuenca, mide la pendiente media en dos ejes principales (X, Y) y a partir de estos valores se determina la media (Breña y Jacobo, 2006).

Según Anaya (2012), la pendiente de la cuenca, es un parámetro muy importante en el estudio de toda la cuenca, tiene una relación importante y compleja con la infiltración del suelo, y la contribución del agua subterránea a la esorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a las crecidas.

3.1.13. Cuantificación de la red hídrica

Este parámetro constituye una medida de energía en la cuenca, ya que significa la capacidad que tiene la cuenca para captar agua proveniente de la precipitación así como nos da la posibilidad de cuantificar la magnitud de los escurrimientos superficiales. Una mayor cantidad de escurrimientos es sinónimo de un mejor drenaje en la cuenca y por lo tanto favorece los escurrimientos. El INE (2004) reporta tres clases de escurrimientos: bajo (0 – 170 mm), medio (171 – 340 mm) y alto (341 – 510 mm).

3.1.14. Orden mayor de la red hídrica

Summerfield (1991), citado por Breña y Jacobo (2006), considera que este parámetro expresa la relación de jerarquía entre los diferentes tramos de las corrientes (Figura 1). Una clase de orden baja corresponde a un rango de corriente de 1 a 2; la media corresponde a 2 a 4, mientras que la alta corresponde a 4 a 6 (INE, 2004).

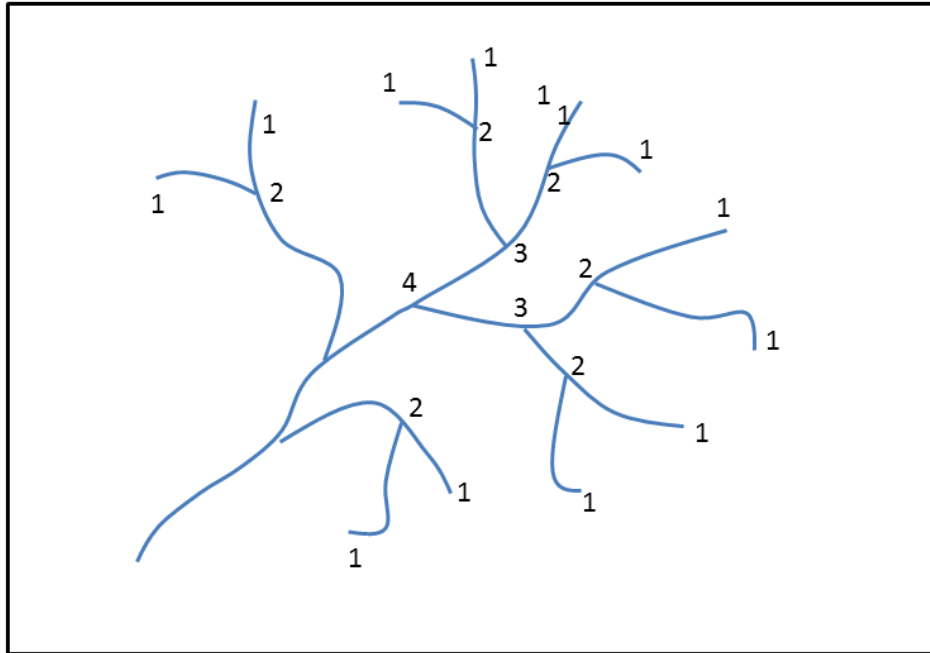


Figura 1. Órdenes de corriente según Strahler (1964)
 Fuente: Elaboración propia adaptada de Wanielista *et al.* (1997)

3.1.15. Relación de bifurcación

La relación de bifurcación es la relación existente entre el número de cauces de cualquier orden y el número de corrientes del siguiente orden superior, por ejemplo, el número de corrientes de primer orden entre el número de corrientes de segundo orden. La relación de bifurcación tiende a ser constante para cada orden de corriente (Ward y Elliot, 1995). La razón de bifurcación, nos da una idea acerca de la forma del relieve, por lo tanto; valores de bifurcación aproximados a 2 nos indican cuencas con escaso relieve, valores entre 3 y 5 definen a un relieve montañoso; pero en las cuales las estructuras geológicas no influyen demasiado en la forma del drenaje y están generalmente formados sobre rocas homogéneas. Sin embargo, los valores superiores a 10 indican que los caracteres estructurales condicionan fuertemente la instalación de cuencas estrechas o alargadas (Romero y López, 1987).

3.1.16. Densidad de drenaje

Una densidad de drenaje alta se asocia a materiales litológicamente impermeables al nivel subsuperficial, vegetación escasa y relieve montañosos, por lo tanto se dice que la cuenca presenta suficiente drenaje para cuando se presentan tormentas. En este sentido, habrá poca infiltración y percolación al nivel subterráneo, por lo tanto sitios con estas características recargan poco volumen de agua (Ruiz, 2001). Por el contrario, una densidad de drenaje baja indica que la cuenca presenta un pobre drenaje y por lo tanto una respuesta hidrológica baja (Linsley, 1977). Para su interpretación, Delgadillo y Páez (2008) consideran que una densidad de drenaje menor de 1 km/km² es baja, de 1 a 2 es moderada, de 2 a 3 es alta y mayor de 3 es muy alta.

3.1.17. Densidad de corriente

Este parámetro aporta información valiosa sobre las condiciones climáticas y litológicas de la microcuenca. Valores mayores a 500 km/km² se pueden deber a la combinación de un régimen pluvial elevado con una litología fácilmente erosionable. Mientras que valores menores a los 5 km/km² pueden indicar de un régimen pluvial de poca elevación y un material litológico de mayor resistencia a la erosión (Breña y Jacobo, 2006).

3.1.18 Longitud del cauce principal

Es la medida del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde la parte más alta hasta la desembocadura. Este parámetro influye directamente en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos. Para definir la clase de longitud que tiene el cauce principal el INE (2004) considera que es corta para longitudes de 6.9 a 10.9 km, mediana para longitudes de 11 a 15 km y larga para longitudes de 15.1 a 19.1 km.

3.1.19. Pendiente del cauce principal

Es la relación que existe entre los extremos inicial y final del cauce principal, y la distancia horizontal del mismo (Breña y Jacobo, 2006). Hace referencia al porcentaje de pendiente del cauce principal desde donde se forma hasta donde termina, considerando las curvas de nivel y en línea recta desde el inicio hasta la desembocadura. Tiene influencia en el comportamiento del cauce principal ante un evento de fuerte precipitación. Para su análisis el INE (2004) considera pendiente suave para pendientes del 0.01 al 0.05 %; moderadas para pendientes del 0.06 al 0.11% y fuerte para pendientes del 0.12 al 0.17%.

3.1.20. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (T_c) es un concepto de interés para calcular el escurrimiento máximo instantáneo. Se define como una aproximación al tiempo que tardaría el agua en recorrer la distancia existente entre el punto más alejado, y la salida de la cuenca (SARH, 1977). Para su interpretación, el INE (2004) considera un T_c rápido para 0 a 41.7 minutos; moderado para tiempos de 41.6 a 83.2 minutos, y lento para tiempos de 83.3 a 125.1 minutos.

3.2. Análisis hidrológico

3.2.1 Estimación del escurrimiento medio

El escurrimiento superficial es la parte de la precipitación que se mueve de manera laminar sobre los terrenos y que, al escurrirse a las zonas más bajas del terreno, forman pequeños arroyos que alimentan a las corrientes intermitentes para que estas a su vez alimenten a los ríos perenes. Sin embargo, al presentarse este fenómeno hídrico en suelos desprovistos de vegetación se provoca en la mayoría de los casos la erosión; primero en forma de canalillo y posteriormente estos pasan a formar cárcavas (CONAFOR, 2007).

El escurrimiento medio es importante estimarlo para el diseño de obras de captación de agua en la cuenca. Para estimar el escurrimiento medio se necesita obtener la precipitación media y la superficie de la microcuenca. El escurrimiento es una fracción de la precipitación y su magnitud dependerá principalmente de las características físicas de la microcuenca, como son la topografía, el suelo y la vegetación. A partir de las características de la cuenca se puede determinar un coeficiente de escurrimiento (C), el cual se multiplica por el volumen llovido para obtener el volumen escurrido (Becerra, 1999). El mismo autor menciona que, considerando la uniformidad de la microcuenca y por ende la complejidad del terreno, se han determinado coeficientes de escurrimiento determinados empíricamente.

La fórmula para estimar el escurrimiento medio es la siguiente:

$$V_m = C P_m A$$

Donde:

V_m = Volumen medio que puede escurrir (m^3)

A = Área de la cuenca (ha)

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

P_m = Precipitación media (mm)

3.2.2. Escurrimiento máximo instantáneo

El escurrimiento máximo instantáneo es importante en los trabajos de conservación de suelo, ya que con frecuencia se requiere saber la descarga máxima en un punto dado del cauce después de haberse presentado una precipitación. Se han desarrollado diversos procedimientos, tales como la aplicación de la fórmula racional, la fórmula racional modificada, el método de las curvas numéricas, el método de huellas máximas y el hidrograma (Becerra, 1999).

El método racional modificado para estimar escurrimientos máximos para un periodo de retorno utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_p = CLA / 360$$

Donde:

Q_p = Escurrimiento máximo instantáneo (m^3/s)

C = Coeficiente de escurrimiento

L = Lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno dado (mm)

A = Área de drenaje (ha)

360 = Factor de ajuste de unidades

El escurrimiento medio por evento y el escurrimiento máximo instantáneo pueden estimarse con el método de curvas numéricas. El método considera valores obtenidos por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, basados en la observación de hidrogramas procedentes de diversas tormentas en diferentes cuencas. Estas curvas dependen del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso de suelo y manejo y la condición de la humedad antecedente. Para los grupos de suelos se utilizan las condiciones texturales. Se consideran cuatro grupos (CONAFOR, 2007), de acuerdo a sus características hidrológicas para producir escurrimientos.

La condición hidrológica del área de drenaje se relaciona con la cubierta vegetal del terreno y la variación depende de la densidad de la cobertura. Se agrupa en tres categorías: buena (mayor del 75%), regular (50 AL 75%) y mala (menor del 50%) (CONAFOR, 2007).

La condición hidrológica es un factor determinante en la estimación de los escurrimientos superficiales. Esta condición se determina a partir de la condición de la vegetación para cada uso del suelo, utilizando descripciones de las condiciones hidrológicas y uso del suelo como la reportada por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2007).

Las áreas de cultivo, los pastizales y/o bosques tienen una influencia en el escurrimiento superficial. Esto es más evidente cuando se desarrollan algunas prácticas en el suelo, tales como siembras en hilera, tupidos en surcos rectos o al contorno por mencionar algunos. Con base en la práctica de manejo, la condición hidrológica y el grupo de suelos, se determina el valor de la curva numérica para cada cobertura o uso del suelo. El escurrimiento aumenta a medida que se existe mayor humedad del suelo cuando se presenta la tormenta. Por esa razón, en este método se considera la condición de humedad del suelo producto de los cinco días previos a la tormenta. Se consideran tres categorías de humedad antecedente, lo que le da un carácter dinámico a la estimación del escurrimiento (CONAFOR, 2007).

El escurrimiento medio se estima como:

$$Q = (P - 0.2S)^2 / [P + (0.8S)]$$

$$Q > 0 \text{ si } 0.2S < P$$

$$\text{Si no } Q = 0$$

Dónde: Q = Escurrimiento medio (mm), P = Precipitación por evento (mm) y S = Retención máxima potencial (mm).

El potencial máximo de retención de agua del suelo (S) se obtiene con la fórmula:

$$S = [25400 / CN] - 254$$

Dónde:

CN = Curvas numéricas (adimensional).

El escurrimiento máximo se puede estimar

$$Q_p = [0.0021QA] / [1/2D + 0.6 T_c]$$

Dónde:

Q_p = Escurrimiento máximo (m^3 /s), Q = Escurrimiento medio (mm), A = Área de drenaje (ha), D = Tiempo de duración del exceso de lluvia (h) y T_c = Tiempo de concentración (h)

$$T_c = 0.02 L^{1.15} / H^{0.38}$$

Dónde:

T_c = Tiempo de concentración (minutos), L = Longitud de la corriente principal (m) y H = Diferencia en elevación entre el sitio más alejado de la cuenca y la salida (m).

3.3. Estimación de riesgos de erosión y/o erosión actual con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) es un modelo diseñado para estimar la pérdida de suelo promedio de la erosión bajo condiciones específicas y para un tiempo prolongado. La EUPS agrupa numerosas interrelaciones de parámetros físicos y de manejo que influyen en la tasa de erosión en seis factores principales cuyos valores pueden ser expresados numéricamente para un sitio específico y que multiplicados entre si dan como resultado una estimación de la cantidad de suelo perdido por unidad de superficie (hectáreas) y tiempo (año) (Becerra, 1999).

Constituye una alternativa para estimar el rendimiento de sedimento de las cuencas para un evento pluvioso único.

Este modelo está diseñado con los siguientes parámetros:

$$A = R K L S C P$$

Dónde:

A = Pérdida de suelo en Ton/ha año

R = Factor de la erosibilidad de la lluvia

K = Factor de la erosionabilidad del suelo

LS = Factor de longitud y grado de pendiente

C = Factor de cultivo o cobertura vegetal

P = Factor de prácticas mecánicas

Erosividad de la lluvia (factor R)

Definida como la capacidad potencial de la lluvia para causar erosión, es medida por medio de los índices de erosividad. Los índices más importantes y de aplicación geográfica más amplia son (Morgan, 1996):

a) Índice de Wischmeier (EI_{30})

El índice relaciona la energía cinética (E) y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (I_{30}).

b) Índice de Hudson ($KE > 25$)

Es el total de la energía cinética para una intensidad de lluvia igual o mayor de 25 mm/h.

Se han desarrollado relaciones empíricas entre la erosividad de la lluvia y la precipitación media anual. El Servicio Meteorológico de Malasia (Morgan, 1996) desarrolló la ecuación:

$$Eva = 9.28P - 8838.15 \quad r = 0.81.$$

Dónde:

Eva es la erosividad media anual y P es la precipitación media anual (en mm).

Otro índice ampliamente utilizado es el modificado por Fournier (Díaz-Rivera et al. 2008):

$$FI = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P}$$

Dónde:

P_i es la precipitación total en el mes i; P es la precipitación total media anual.

En México, Cortés (1991) propuso 14 regiones diferentes de erosividad de la lluvia para la República Mexicana, con sus respectivas ecuaciones para estimar el factor R de la USLE en función de la lluvia anual. Las ecuaciones generadas por Cortés son utilizadas en México y en otros países (Rivera-Toral *et al.*, 2012; Bueno-Hurtado *et al.*, 2015)

Erosionabilidad del suelo (factor K)

El término erosionabilidad del suelo K, se usa para indicar la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado. Este factor refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas a igualdad de los demás factores, y se define con la tasa

de pérdida de suelo por cada unidad adicional de E_{l30} cuando los factores L,S,C y P permanecen constantes (Becerra, 1999). En México, debido a la falta de valores precisos de K para los suelos, se estima el valor de K a partir de la clasificación de suelos de la FAO (1980), usando la textura superficial y las subunidades de suelo (Figueroa *et al.*, 1991) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valor de erosionabilidad estimado en función de la unidad de suelo y su textura

ORDEN	TEXTURA			ORDEN	TEXTURA		
	G	M	F		G	M	F
A	0.026	0.04	0.013	Lo	0.026	0.04	0.013
Af	0.013	0.02	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.04	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ah	0.013	0.02	0.007	M (a, g)	0.026	0.04	0.013
Ao	0.026	0.04	0.013	N (d, e, h)	0.013	0.02	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O (d, e, x)	0.013	0.02	0.007
B	0.026	0.04	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.04	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.04	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.04	0.013	Ph	0.026	0.04	0.013
Bf	0.013	0.02	0.007	Pl	0.026	0.04	0.013
Bg	0.026	0.04	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.02	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
BK	0.026	0.04	0.013	Q (a, c, f, l)	0.013	0.02	0.007
By	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.04	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.04	0.013
C (g, h, k, l)	0.013	0.02	0.007	Rc	0.013	0.02	0.007
D (d, e, g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.04	0.013
E	0.013	0.02	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F (a, h, o, p, r, x)	0.013	0.02	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.04	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026
Gc	0.013	0.02	0.007	Sm	0.026	0.04	0.013
A	0.026	0.04	0.013	Lo	0.026	0.04	0.013
Gd	0.026	0.04	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.04	0.013	T	0.026	0.04	0.013
Gh	0.013	0.02	0.007	Th	0.013	0.02	0.007
Gm	0.013	0.02	0.007	Tm	0.013	0.02	0.007

ORDEN	TEXTURA			ORDEN	TEXTURA		
	G	M	F		G	M	F
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.04	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.04	0.013
Gy	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.02	0.007
H (c, g, h, l)	0.013	0.02	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.02	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.04	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.02	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.04	0.013	Wh	0.026	0.04	0.013
Je	0.026	0.04	0.013	Wm	0.026	0.04	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Ws	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
K(h,K,l)	0.026	0.04	0.013	X (h, k, l, y)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.04	0.013	Y (h, k, l, y, t)	0.053	0.079	0.026
La	0.053	0.079	0.026	Z	0.026	0.04	0.013
Lc	0.026	0.04	0.013	Zg	0.026	0.04	0.013
Lf	0.013	0.02	0.007	Zm	0.013	0.02	0.007
Lg	0.026	0.04	0.013	Zo	0.026	0.04	0.013
Lk	0.026	0.04	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026

Fuente: Figueroa *et al.* (1991)

Longitud y grado de pendiente (factor LS)

El efecto de la topografía en la erosión está representado por los factores L y S para la longitud (L) y el grado (S) de la pendiente. A medida que ambas características de la topografía se incrementan, su efecto en la pérdida de suelo es mayor. A menudo estos factores son representados como un factor único (Barrera, 1999).

Actualmente, aplicando los SIG y con la implementación de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) se estiman los factores L y S usando algebra de mapas. Es necesaria la estimación confiable de los parámetros topográficos reflejados en la forma del terreno para modelar aspectos geomorfológicos, hidrológicos e incluso ecológicos,

debido a la influencia del terreno sobre los flujos de la masa en el paisaje (SEMARNAT-UACH, 2002).

Manejo y cobertura vegetal (factor C)

Este factor representa la cantidad de suelo perdido de un terreno bajo condiciones específicas de uso y vegetación, en comparación con la pérdida de suelo que pudiera presentar el mismo terreno estando desprovisto de vegetación y bajo labranza continua. Refleja el efecto de la vegetación natural en los cultivos y de las prácticas de manejo de los mismos sobre la erosión. Es el cociente que se obtiene al dividir la pérdida de suelo obtenida en un terreno con cierto manejo del cultivo entre la pérdida para el mismo terreno bajo cultivo continuo (Figueroa *et al.*, 1991). En la condición estándar (sin cobertura vegetal y con barbecho continuo), condición externa en cuanto a favorecer la erosión, el valor C es la unidad y será cada vez menor a medida que haya una mejor cobertura vegetal sobre el terreno. De esta manera los valores de C fluctúan entre 0.0 y 1.0. Estos valores correspondientes a un terreno totalmente protegido (1.0) y uno desprotegido (0.0) (Becerra, 1999).

González (2003) propone el uso de tablas para determinar el valor de C para bosques, pastizales, matorrales, arbustos y algunos cultivos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de C que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo

Cultivo	Nivel producción		
	Alto	Moderado	Bajo
Maíz	0.540	0.620	0.800
Maíz lc	0.050	0.100	0.150
Maíz rastrojo	0.100	0.150	0.200
Algodón	0.300	0.420	0.490
Pastizal	0.004	0.010	0.100
Alfalfa	0.020	0.050	0.100
Trébol	0.025	0.050	0.100
Sorgo grano	0.430	0.550	0.700
Sorgo grano rastrojo	0.110	0.180	0.250
Soya	0.480	---	---
Soya después de maíz c/rastrojo	0.180	---	---
Trigo	0.150	0.390	0.530
Trigo rastrojo	0.100	0.180	0.250
Bosque natural	0.001	0.010	0.100
Sabana en buenas condiciones	0.010	0.540	---
Sabana sobre pastoreada	0.100	0.220	---
Maíz-sorgo mijo	0.4	0.65	0.9
Arroz	0.1	0.15	0.1
Algodón, tabaco	0.5	0.6	0.7
Cacahuete	0.4	0.6	0.8
Palma, cacao, café	0.1	0.2	0.3
Piña	0.1	0.2	0.3

Fuente: González (2003)

Prácticas de conservación (factor P)

El factor P es la proporción de la pérdida de suelo que se presenta cuando se hace uso de alguna práctica específica, en comparación con la pérdida de suelo ocurrida cuando se cultiva en laderas sin prácticas de conservación alguna. Los métodos de control de la erosión incluidos en este factor son generalmente el surcado al contorno, terraceo y cultivo en fajas (Becerra, 1999). Se han publicado diferentes valores para las prácticas de conservación que van del 0.12 a 0.18 para el caso del terraceo, de

0.30 a 0.45 para franjas al contorno y de 0.60 a 0.90 para surcado al contorno, estos valores son asignados únicamente a terrenos que se encuentren entre un rango del 1 al 25 % de pendiente (Figuroa *et al.*, 1991; Morgan, 1996; Becerra, 1999).

3.4 Caracterización biológica

En la caracterización biológica de la cuenca se detalla información sobre la flora y fauna presente en la cuenca. Puede incluir información sobre tipos de vegetación y su distribución espacial. También, la fauna presente en el medio terrestre y acuático.

3.5 Caracterización socioeconómica

Se describen y analizan variables e indicadores sociales y económicos relevantes para el uso de los recursos naturales de la cuenca. El INE (2007) estableció una serie de criterios e indicadores que permitan establecer sinergias entre los actores locales y los planificadores, no sólo en el ámbito geográfico sino en las razones que han llevado a la situación actual a los recursos naturales. Dichos indicadores se agruparon en cuatro bloques, en función a la influencia o alteración del ciclo hídrico en las cuencas: (i) sociodemográfica, (ii) distribución de la población, (iii) socioeconómica y (iv) económica, en cada uno de los bloques se incluyen indicadores, mismo que se enlistan a continuación:

Dimensión sociodemográfica

- Población
- Densidad de población
- Atracción migratoria reciente y acumulada

Distribución de la población

- Nivel de urbanización
- Porcentaje de urbanización
- Dispersión rural

Dimensión socioeconómica

- Índice de desarrollo humano (IDH)
- Índice de sobrevivencia infantil (ISI)
- Índice de nivel de escolaridad (INE)
- PIB *per cápita*
- Porcentaje de migración

Dimensión económica

- Especialización económica municipal
- Orientación sectorial de la población
- Localización industrial por giros

CAPÍTULO IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

4.1 Planteamiento del problema

Las actividades antrópicas practicadas y desarrolladas a nivel comunitario en la microcuenca de la Ciénega, han repercutido de manera negativa hacia el capital natural, ya que se tiene una tendencia de pérdida gradual de los ecosistemas naturales. En la zona de la cabecera de la microcuenca se presentan problemas serios de deforestación, erosión laminar e hídrica (presencia de cárcavas mayores a 0.5 metros de profundidad) y suelos degradados. La presencia de cárcavas también se da en la parte media y baja de la microcuenca. Estos procesos de deterioro afectan la recarga de los mantos acuíferos subterráneos y el riesgo de asolvamiento e inundación en la zona baja de la microcuenca y de espacios que se encuentren aguas debajo de la misma. Además de que se disminuye la capacidad productiva de las tierras agropecuarias, debido a la pérdida de suelo por erosión.

La microcuenca presenta también el riesgo de movimientos en masas, o desprendimientos de rocas y suelos saturados por eventos de precipitación pluvial extraordinarios. Este es un problema regional, como lo muestra el desastre natural que se presentó el 15 de septiembre del 2013 en la comunidad de Totomixtlahuaca, Municipio de Tlacoapa asociado con el fenómeno meteorológico Ingrid y Manuel. Este fenómeno se convirtió en una tragedia para los habitantes, ya que varias viviendas fueron arrastradas por la corriente del cauce principal (Flores, 2013). Dicha comunidad se encuentra asentada paralela a un caudal perene de la cuenca del papagayo, donde precisamente confluyen varias microcuencas provenientes de las comunidades de Tlacoapa, Paraje Montero, Colombia de Guadalupe y La Ciénega. En dichos espacios la presencia de áreas deforestadas es muy notoria, aunado a las fuertes pendientes que originaron que los escurrimientos superficiales aumentaran en velocidad y volumen, generando a su paso la modificación de los meandros.

Ante la situación expuesta, es necesario evaluar el riesgo a eventos extremos y procesos de erosión de la microcuenca La Ciénega. Esto con el fin de generar propuestas de intervención y prevención de los mismos. Un estudio geomorfológico, junto con un diagnóstico y caracterización biológica y socioeconómica de la microcuenca, serán un elemento de soporte a la planeación de acciones conservacionistas para la parte alta y media de la microcuenca, como una medida preventiva para disminuir las inundaciones y reactivar el ciclo hidrológico. También sería un soporte para la planeación, aprovechamiento y un manejo más armónico de los recursos naturales, a partir de escenarios de manejo de uso de suelo a nivel de parcela. Con el propósito final de frenar los problemas erosivos y al mismo tiempo de aumentar los rendimientos de los cultivos.

Para el desarrollo del presente estudio se establecieron las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuál es el comportamiento hidrológico de la microcuenca La Ciénega de acuerdo a sus características geomorfológicas?

¿Cuál es el riesgo de erosión y la tasa de erosión actual asociada a los usos del suelo y qué implicaciones tienen en el manejo ambiental de la microcuenca La Ciénega?

¿Qué propuestas serán las más viables para ser implementadas y con ello mitigar los efectos erosivos de la microcuenca La Ciénega?

4.2. Objetivos

Objetivo general

- Realizar un análisis geomorfológico y del proceso de erosión en la microcuenca La Ciénega con el fin de determinar el riesgo de erosión, condición actual y alternativas de conservación de suelos para un mejor manejo de la microcuenca

Objetivos específicos

- Estimar los parámetros y características morfológicas e hidrológicas de la microcuenca La Ciénega.
- Estimar el escurrimiento medio de la microcuenca la Ciénega.
- Elaborar un mapa de erosión hídrica potencial para identificar las zonas con mayor riesgo de erosión de la microcuenca.
- Estimar la erosión actual de la microcuenca para saber dónde se están llevando a cabo el proceso erosivo con mayor intensidad.
- Identificar prácticas de conservación de suelos eficientes para el control de la erosión en la microcuenca “La Ciénega”

4.3. Hipótesis

La microcuenca La Ciénega tiene condiciones topográficas y fisiográficas que la hacen susceptible a procesos erosivos y grandes volúmenes de escurrimiento superficial.

La microcuenca La Ciénega tiene un alto riesgo de erosión hídrica en la mayor parte de su superficie.

La microcuenca La Ciénega tiene actualmente una alta pérdida de suelo por erosión hídrica.

Es posible disminuir la pérdida de suelo por erosión hídrica en la microcuenca La Ciénega a través de prácticas de conservación adaptadas a las condiciones particulares de la región de la Montaña de Guerrero.

CAPÍTULO V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Delimitación de la microcuenca

La delimitación de la microcuenca La Ciénega se realizó de manera automatizada mediante la implementación del software ArcGis 10.3. Se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) con clave (ASTGDEM2_N17W099) obtenido de la página web: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/index.jsp>. Con este procedimiento se determinaron las siguientes propiedades de la superficie: área, perímetro, cota máxima, cota mínima y centroide X, Y, Z, bajo la interpolación entre el DEM y el vector de la microcuenca.

5.2. Caracterización biofísica de la microcuenca

La caracterización biofísica de la microcuenca incluyó la descripción de los climas, la hidrología, los tipos de suelos y el uso del suelo y vegetación. Se utilizaron fuentes de información secundaria (información vectorial) obtenida de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía en las series más actualizadas. La información se interpretó con las guías del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publicadas para su cartografía temática. También se integró un listado de la biodiversidad de flora y fauna, mismo que se obtuvo al aplicar una entrevista individual del tipo estructurada a informantes clave dentro de las 28 comunidades localizadas en la microcuenca.

5.3. Análisis geomorfométrico

5.3.1 Tamaño

Para determinar el tamaño de la cuenca, se recurrió a la clasificación reportada por Viramontes-Olivas *et al.* (2007): muy pequeña (< 25), pequeña (25 – 250), intermedia-

pequeña (250 – 500), intermedia-grande (500 – 2500), grande (2500 – 5000) y muy grande (> 5000)

5.3.2. La curva hipsométrica

Para la obtención de la curva hipsométrica se implementaron las cotas promedio y el porcentaje del área acumulada entre ellas. Se definieron 12 intervalos de datos altimétricos y se generaron en el ArcGis 10.3. Para el análisis se empleó el criterio propuesto Strahler en 1952 (Guerra y González, 2002), donde se identifican tres zonas de la cuenca de acuerdo a la dinámica de sedimentos (relacionando la altura relativa con el porcentaje de área: fase de desequilibrio (juventud), fase de equilibrio (madurez) y fase de monanock (vejez).

5.3.3. Elevación media

Se obtuvo a partir de la curva hipsométrica. Se determinó la elevación media equivalente al 50% del área de la cuenca (eje X de la gráfica).

5.3.4. Frecuencia de altitudes

Para determinar la frecuencia de altitudes se utilizaron las frecuencias altimétricas promedio de las curvas a nivel a cada 20 metros.

5.3.5. Pendiente media

Se estimó con el programa ArcGis 10.3, con la herramienta *Slope*. Se utilizó el recorte del MDE de la microcuenca, mismo que se reclasificó a 10 intervalos y mediante una ponderación entre los porcentajes y el número de sitios se obtuvo este parámetro. Para su interpretación se utilizaron los valores reportados por Viramontes-Olivas et al. (2007): llano (0 – 2), suave (2 – 5), accidentado medio (5 – 10), accidentado (10 – 15), fuertemente accidentado (15 – 25), escarpado (25 – 50) y muy escarpado (> 50).

5.3.6. Coeficiente o factor de forma

Para la estimación del índice de forma se empleó el factor propuesto por Gravelius. Se calculó a partir de la relación del área de la cuenca y la longitud de la misma (Viramontes-Olivas et al. 2007), mediante la siguiente fórmula:

$$F = A/L^2$$

Donde:

F = Factor forma

A = Área de la cuenca en km^2

L^2 = Longitud de la cuenca en km

5.3.7. Coeficiente de compacidad

Se utilizó el coeficiente de Gravelius, que es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo que tenga la misma área de la cuenca (Viramontes-Olivas et al. 2007). Se estimó con la siguiente fórmula:

$$K_c = \frac{0.282P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

K_c = Coeficiente de compacidad (adimensional)

P = Perímetro de la cuenca en km

A = Área de la cuenca en km^2

Para su interpretación se utilizó la clasificación reportada por Viramontes-Olivas et al. (2007), con tres clases de forma de cuencas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Forma de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad

Clase de Forma	Índice de Compacidad (K_c)	Forma de la Cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 a más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

5.3.8. Proporción de elongación

Relación que existe entre el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la máxima longitud de la cuenca y se determina utilizando la siguiente fórmula propuesta por Shumm (Viramontes *et al.*, 2007).

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L_c}$$

Donde:

Re = Proporción de elongación (Adimensional).

A = Área de la cuenca km^2 .

L_c = Longitud del cauce principal de la cuenca km.

$\pi = 3.1416$.

De acuerdo con Breña y Jacobo (2006), si la $Re = 1.0$, la cuenca es plana, mientras que de $0.6 \leq Re \leq 0.8$, la cuenca será de relieve pronunciado.

5.3.9. Relación de circularidad (R)

Es el cociente entre el área de la cuenca y el círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca. La expresión mediante la cual se calcula es:

$$R_{ci} = \frac{4 \pi A}{P^2}$$

Donde:

R_{ci} es la relación de circularidad, adimensional; P es el perímetro de la cuenca, en m; y A es la superficie de la cuenca, en m^2 .

De acuerdo con Breña y Jacobo (2006), en diversas cuencas se ha determinado que si: $R_{ci} = 1.0$, la cuenca es circular $R_{ci} = 0.785$, la cuenca es cuadrada.

5.3.10. Coeficiente de masividad (K_m)

Representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}}$$

Para su interpretación se utilizó la clases de valores de K_m considerados por el INE (2004): muy montañosa (0 – 35), montañosa (35 – 70) y moderadamente montañosa (70 – 105).

5.3.11. Pendiente media de la cuenca

Para obtener este parámetro se utilizó el software ArcGis 10.3 y de insumos un modelo digital de elevación con tamaño de pixel de 30 metros, con dicho modelo se obtuvo un mapa de pendientes, posteriormente se realizó una reclasificación a 10 intervalos y finalmente se realizó una ponderación entre el número de ocurrencias por intervalo por el promedio de la pendiente.

5.3.12. Cuantificación de la red hídrica

Para obtener el número de corrientes perenes e intermitentes, se obtuvo a través del SIG, mediante la herramienta Summarize.

5.3.13. Orden mayor de la red hídrica

Se utilizó el método de Strahler (1957), en el cual se menciona que un curso de orden 1 carece de tributarios, uno de orden 2 es formado por la confluencia de dos cursos de orden 1, uno de orden 3 es formado por la confluencia de dos de orden 2, y así sucesivamente. El orden de una cuenca de drenaje está dado por el curso de orden mayor (INE, 2004).

5.3.14. Relación de bifurcación

Para su estimación se utilizó el método propuesto por Horton (1945) y mejorado por Strahler (1946), en el cual se relaciona el número de cauces de cualquier orden entre el número de cauces del orden inmediato superior (Docampo et al., 1989).

Se determinó utilizando la siguiente fórmula:

$$Rb = S_n / (S_n + 1)$$

$$Rb = \text{Promedio de la } \sum (S_n / S_{n+1}) + (S_{n+1} / S_{n+2}) + (S_{n+2} / S_{n+3}) + (\dots)$$

Donde:

S_n = Número de corrientes en el orden n.

Para su análisis se utilizaron los criterios propuestos por Summerfiel (1991) donde establece que:

Cuenca homogénea: $3 \leq R_b \leq 5$

Cuenca muy elongada: $R_b > 10$

5.3.15. Densidad de drenaje

Es la relación que existe entre la longitud de corrientes y el área de drenaje.

Se determinó utilizando la siguiente fórmula:

$$D_h = \frac{L_c}{A}$$

Dónde:

D_h = Longitud de corrientes por km²

L_c = Longitud de corrientes de diferentes órdenes en km

A = Área de la cuenca en km²

5.3.16. Densidad de corriente

Entendido como la suma de las longitudes de los tributarios (N_s) dividida por el valor del área (A) de la cuenca y se define a través de la expresión:

$$D_s = \frac{N_s}{A}$$

Dónde:

D_s = Densidad de corriente en km/km²

N_s = Suma de las longitudes de los tributarios en km

A = Área de la cuenca en km²

Para su interpretación se utilizaron los siguientes criterios (Breña y Jacobo, 2006):

$D_s > 500$ km/m² significa que existe una combinación de un régimen pluvial alto con una litología fácilmente erosionable.

$D_s < 5 \text{ km/km}^2$ significa que el régimen pluvial de poco valor o resistencia del material litológico de gran magnitud.

5.3.17. Longitud del cauce principal

Se obtuvo a través del SIG, implementando el raster de la dirección de flujo y para ello se utilizó la opción *Flow Length* que se encuentra en la herramienta Hydrology.

5.3.18. Pendiente del cauce principal

Se determinó a partir de los valores extremos, el cual consiste en determinar el desnivel (H) entre el punto más elevado y más bajo del río principal y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce (L), lo que significa:

$$S = 100 \frac{H}{L}$$

Dónde:

S : Pendiente del tramo del cauce en %.

H : Desnivel entre el punto más elevado y más bajo del cauce en metros.

L : Longitud del cauce en metros.

5.4. Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida, y se calcula mediante la siguiente fórmula (Martínez *et al.*, 2012):

$$T_c = 0.02 \frac{L^{1.15}}{H^{0.385}}$$

Dónde:

Tc = Tiempo de concentración en minutos

H = desnivel entre el punto más alejado de la cuenca y el sitio de aforo, en metros.

L = Longitud del cauce principal, en metros.

5.5. Estimación del escurrimiento medio y máximo instantáneo

5.5.1 Cálculo del escurrimiento medio escurrido

Para estimar el escurrimiento medio se requieren los valores de la precipitación media, de la superficie de la microcuenca y del coeficiente de escurrimiento. Para su estimación se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_m = C P_m A$$

Dónde:

V_m = Volumen medio escurrido (m³)

A = Área de la cuenca (ha)

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

P_m = Precipitación media (mm)

Para obtener el valor de la precipitación, se utilizaron los registros de 60 años de tres estaciones meteorológicas cercanas a la microcuenca (Cuadro 4). Se realizó una interpolación utilizando el método Spline con el programa ArcMap 10.3 para obtener las isoyetas de la microcuenca. De este mapa se asignaron los valores de precipitación para cada uso del suelo.

Cuadro 4. Estaciones climatológicas

Estación	Años	Lugar	Ubicación espacial		Altura msnm	Precipitación media anual (mm)
			Latitud (N)	Longitud (W)		
00012057	1951 - 2010	Malinaltepec	17°14'39"	098°40'11"	1514	2131.8
00012088	1951 - 2010	Tlacoapa	17°15'45"	098°44'53"	1420	1642.9
00012104	1951 - 2010	Zitlaltepec	17°11'29"	098°32'59"	1850	2266.6

Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>

Para obtener el valor del coeficiente de escurrimiento (C), se utilizaron los valores del Cuadro 5, de acuerdo a los tipos de suelos, uso de suelo y pendientes. Se determinó el valor de C para cada área parcial. A partir de la ponderación de los coeficientes de escurrimiento para cada uso del suelo, de acuerdo a su superficie (Cuadro 6) se obtuvo un coeficiente de escurrimiento ponderado de 0.52.

Cuadro 5. Valores del coeficiente de escurrimiento

Uso del Suelo	Vegetación	Textura suelo		
		Gruesa	Media	Fina
		1	2	3
Bosque plano (0-5% Pend.)	Bosque	0.10	0.30	0.40
Bosque ondulado (6-10%)	Bosque	0.25	0.35	0.50
Bosque escarpado (11-30%)	Bosque	0.30	0.50	0.60
Pastizal plano (0-5%)	Pastizal	0.10	0.30	0.40
Pastizal ondulado (6-10%)	Pastizal	0.16	0.36	0.55
Pastizal escarpado (11-30%)	Pastizal	0.22	0.42	0.60
Cultivo plano (0-5%)	Cultivos	0.30	0.50	0.60
Cultivo ondulado (6-10%)	Cultivos	0.40	0.60	0.70
Cultivo escarpado (11-30%)	Cultivos	0.52	0.72	0.82

Fuente: Becerra (1999)

Cuadro 6. Ponderación del coeficiente de escurrimiento C de la microcuenca La Ciénega

Uso de suelo	Superficie (A) (Ha)	Pendiente promedio %	Precipitación media anual (mm)*	C	Textura del suelo	(C) (A)
Vegetación secundaria	911.57	20.9	2000	0.3	Gruesa	273.471
Área agrícola	2301.32	20.8	2150	0.72	Media	1656.9504
Derrumbes	90.35	17.4	2250	0.22	Gruesa	19.877
Asentamientos humanos	338.53	13.3	2250	0.42	Media	142.1826
Bosque natural	4898.78	23.5	2150	0.5	Media	2449.39
Pastizales	634.86	19.2	2150	0.42	Media	266.6412
Total	9175.41					4808.5122

* Obtenida por interpolación

Por lo tanto: $C = 4808.51 / 9175.41 = 0.52$

Precipitación promedio = $(2000 + 2150 + 2250 + 2250 + 2150 + 2150) / 6 = 2158 \text{ mm}$

El volumen medio de escurrimiento se calculó como:

$V_m = CPA = (0.52) (2158 \text{ mm}) (9175.41 \text{ ha}) (1\text{m} / 1000 \text{ mm}) (10000 \text{ m}^2/\text{ha})$

$V_m = \underline{102\,962\,780.9 \text{ m}^3}$ o $V_m = 102.96 \text{ millones de metros cúbicos.}$

5.5.2 Cálculo del escurrimiento máximo instantáneo

El escurrimiento máximo instantáneo se calculó con la ecuación del método racional modificado como:

$$Q_p = \frac{CLA}{360}$$

Dónde:

Q_p = Esguerrimiento máximo instantáneo (m^3/s)

C = Coeficiente de esguerrimiento

L = Lluvia máxima en 24 horas para un período de retorno dado (mm)

A = Área de drenaje (ha)

360 = Factor de ajuste de unidades

Se consideró un periodo de retorno de 5 años, que es el utilizado comúnmente para el diseño de obras de conservación. Para las tres estaciones del área el promedio de la lluvia máxima en 24 horas, para un periodo de retorno de 5 años, es de 117.2 mm.

$$Q_p = (0.52)(117.2)(9175.41)/360 = 1553.3 \text{ m}^3/s$$

Se calculó también, con fines comparativos, con la información disponible en la Secretaría de Comunicaciones y transportes (<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/guerrero.pdf>).

Para una lluvia máxima en 24 años, para un periodo de retorno de 10 años, en los mapas publicados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, para la zona de la microcuenca se reporta una lluvia máxima en 24 horas con isoyetas de 90, 120 y 150 mm, por lo que se tomó el promedio de las tres isoyetas (120 mm).

El cálculo fue:

$$Q_p = 0.52 (120) (9175.41) / 360 = 1590.4044 \text{ m}^3/s$$

5.6. Estimación de la erosión con la EUPS

5.6.1 Erosión actual

Para estimar el promedio anual de erosión se empleó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). La fórmula de la EUPS es:

$$A = R K L S C P$$

Dónde:

A = Pérdida de suelo (ton * ha⁻¹ * año⁻¹)

R = Factor de la erosividad de la lluvia (MJ mm * ha⁻¹ * h⁻¹ * año⁻¹)

K = Factor de la erosionabilidad del suelo (t * ha⁻¹ * h) (MJ mm * ha⁻¹)

L = Longitud de la pendiente (adimensional)

S = Factor del grado de la pendiente (adimensional)

C = Factor de cultivo o cobertura vegetal (adimensional)

P = Factor de prácticas mecánicas (adimensional)

Para interpretar el grado de afectación en relación a la tasa de erosión hídrica se utilizaron los valores que se muestran a continuación (Cuadro 7):

Cuadro 7. Tasa de erosión hídrica

Nivel de erosión	T/ha año
Nula a leve	< 10
Moderada	10 – 50
Fuerte	50 – 200
Muy fuerte	> 200

Fuente: FAO (1980)

5.6.2 Estimación de la erosión potencial

La erosión potencial se estimó con la siguiente ecuación:

$$E_p = R K L S$$

Dónde:

E_p = Erosión potencial

R = Factor de la erosibilidad de la lluvia

K = Factor de la erosionabilidad del suelo

LS = Factor de longitud y grado de pendiente

5.6.3. Estimación de los parámetros de la EUPS

Erosividad de la lluvia (Factor R)

Se obtuvo información de precipitación media anual publicada por la Comisión Nacional del Agua (<http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>) para 10 estaciones localizadas en la región hidrológica Costa Chica, de acuerdo a un gradiente altitudinal (Figura 2 ; Cuadro 8). Se obtuvo una regresión lineal simple para estimar la precipitación media anual (P_m) a partir de la altitud (H). El modelo de regresión es:

$$P_m = 1375.163 + 0.410H \quad R^2 = 0.791, \quad p = 0.001$$

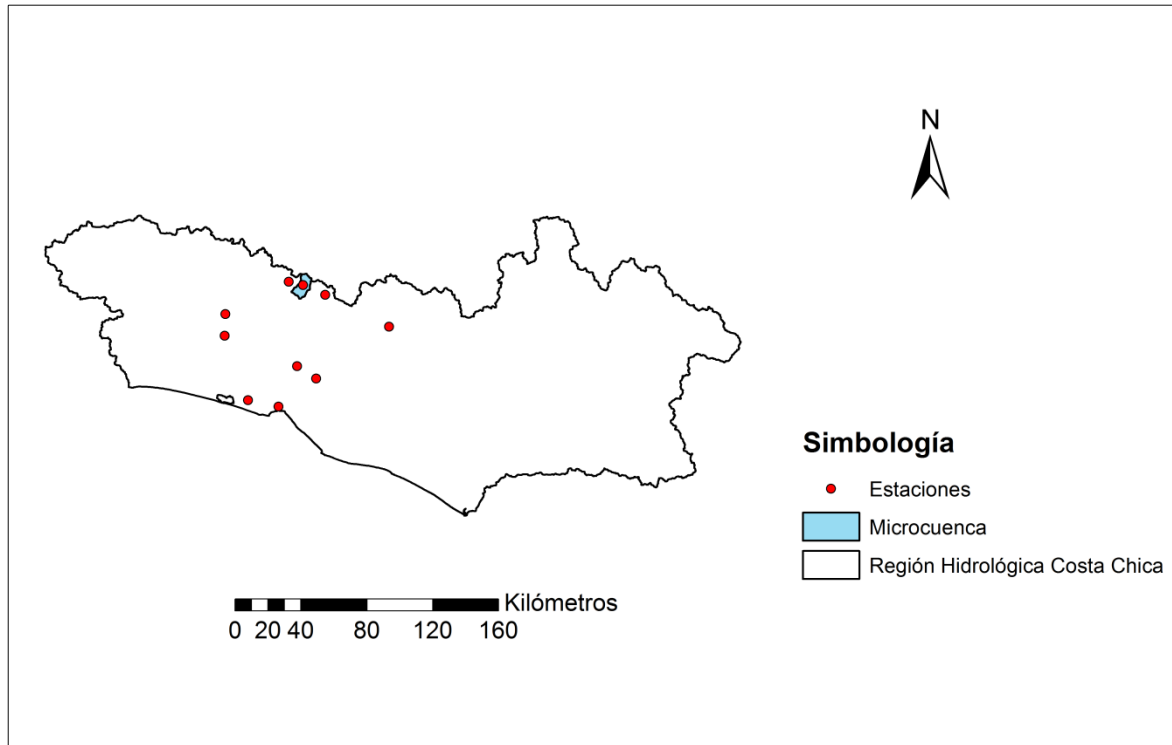


Figura 2. Localización de las estaciones utilizadas para la regresión precipitación – altitud

Fuente: Generación propia a partir de precipitación media anual de la CNA (2016)

Cuadro 8. Precipitación media anual de las estaciones utilizadas para la regresión precipitación - altitud

Estación	Altitud (m)	Precipitación media anual (mm)
Marquelia	10	1,383.80
Copala	20	1,417.80
Azoyu	360	1,403.30
Ayutla (CFE)	368	1,598.60
San Luis Acatlán	538	1,681.70
Ayutla	874	1,754.10
Rancho viejo	1,000.	1,735.30
Tlacoapa (CFE)	1,420	1,642.90
Malinaltepec (CFE)	1,514	2,131.80
Zitlaltepec	1,850	2,266.60

Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>

Se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016) (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>) para obtener las elevaciones del área de la microcuenca, con una resolución de pixel de 15 m. Con la ecuación de regresión estimada para la precipitación y la altitud se estimó la precipitación media anual por pixel, utilizando la herramienta Raster Calculator del programa ArcMap 10.3. Posteriormente, se utilizó la misma herramienta para estimar la erosividad de la lluvia por pixel utilizando la ecuación reportada por Cortéz (1991) para la zona V:

$$R = 3.4880P - 0.000188P^2$$

Dónde:

R = E_{l30} anual (MJ mm/ha hr)

P = Lluvia anual en mm

Cálculo de erosionabilidad del suelo (factor K)

Para determinar este factor se utilizó el conjunto de datos vectoriales de edafología (clave: E14-8 escala 1:250 000) de la serie II (2002-2007) elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En dicha información se muestran las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos así como de la textura superficial dominante. Para determinar el valor de la erosionabilidad de cada unidad de suelo de la microcuenca, se recurrió a la tabla propuesta por FAO (1980) que utiliza unidades de suelo de acuerdo a su clasificación y textura superficial (Cuadro 1). En el mapa vectorial de suelos se agregó un campo con el valor de k y se convirtió a formato raster con una resolución de pixel de 15 m.

Calculo del factor topográfico o la longitud e inclinación de la pendiente (factor LS)

Para estimar el factor LS se utilizó el modelo digital de elevación con resolución de 15 m para estimar el mapa de pendientes (mapa Slope) de la microcuenca utilizando la herramienta Slope del programa ArcGis 10.3. A partir del mismo modelo de elevación se utilizó la herramienta Fill para rellenar los sumideros (Mapa Fill). El archivo generado se utilizó para generar la dirección del flujo de cada celda (Mapa Flow_Dir) utilizando la herramienta Flow Direction, como un paso previo a la generación de un archivo de acumulación del flujo (Flow_Acc) con la herramienta Flow Accumulation.

El factor L se calculó utilizando las siguientes fórmulas, de acuerdo con Pastrana (2014):

$$L = (\lambda/22.3)^m$$

$$m = F / (1+F)$$

$$F = (\text{Sen}\beta/0.0896) / [3(\text{sen}\beta)^{0.08} + 0.56]$$

$$L_{(i,j)} = [(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}] / [X^m * D^{m+2} * (22.3)^m]$$

Dónde:

L es el factor longitud de la pendiente

λ es la longitud de pendiente en m

m es un parámetro de acuerdo con lo escarpado de la pendiente.

$A_{(i,j)}$ [m] es el área aportadora unitaria a la entrada de una celda; D es el tamaño de celda o pixel, en este caso con resolución de 15 m; X es el factor de corrección de forma.

En ArcGis 10.3 se utilizó la herramienta Raster Calculator aplicando las fórmulas anteriores (Pastrana, 2014):

$$F = ((\sin(\text{Slope} * 0.01745)/0.0896)/(3 * \text{Power}(\sin(\text{Slope} * 0.01745), 0.8) + 0.56))$$

Para estimar m en Raster Calculator de ArcGis 10.3 se utilizó la fórmula:

$$F/(1+F)$$

Para estimar L con Raster Calculator de ArcGis 10.3 se utilizó la expresión:

$$(\text{Power}(\text{Flow_acc} + 625, (m+1)) - \text{Power}(\text{Flow_acc}, (m+1))) / (\text{Power}(25, (m+2)) * \text{Power}(22.13, m))$$

El factor S se estimó considerando las siguientes fórmulas:

$$S_{(i,j)} = 10.8 \text{ Sen } \beta_{(i,j)} \text{ si } \tan \beta_{(i,j)} \text{ es menor de } 0.09$$

$$S_{(i,j)} = 16.8 \text{ Sen } \beta_{(i,j)} \text{ si } \tan \beta_{(i,j)} \text{ es mayor de } 0.09$$

El factor S se estimó en ArcGis como:

$$\text{Con}((\tan(\text{Slope} * 0.01745) < 0.09), (10.08 * \sin(\text{Slope} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{Slope} * 0.01745) - 0.5))$$

Finalmente se obtuvo el factor LS en ArcGis como:

$$L * S$$

Cálculo de cobertura vegetal (Factor C)

Con apoyo de las imágenes Spot 5 del Google Earth con una resolución espacial por pixel de 2.5 metros, se digitalizaron seis tipos de uso de suelo para la microcuenca (Figura 3, 4, 5, 6, 7 y 8): asentamientos humanos, pastizales, bosque natural, derrumbes, vegetación secundaria y áreas agrícolas. Posteriormente, se llevaron al ArcGis 10.3 para realizar los geoprocesamientos correspondientes (transformación a vector). Una vez que se convirtió a formato vectorial, se trabajó la tabla de atributos asignándole a cada uso de suelo un valor correspondiente al factor C (Cuadro 2). El mapa vectorial se convirtió a formato raster con una resolución de pixel de 15 m.



Figura 3. Asentamientos humanos



Figura 4. Pastizales presentes en la microcuenca



Figura 5. Bosque primario



Figura 6. Derrumbes y cárcavas



Figura 7. Vegetación secundaria



Figura 8. Área agrícola

Prácticas de conservación (*factor P*)

Para determinar este factor, se utilizaron los métodos de control de la erosión laminar que menciona Wischmeier & Smith (1978), como son el surcado en contorno, el terraceo y el cultivo en fajas.

Se creó un mapa en formato raster de cada factor de la USLE, con resolución de pixel de 15 m, y se multiplicaron utilizando la herramienta “Raster Calculator” del programa ArcMap 10.3.

5.7. Estimación de la erosión bajo diferentes escenarios de prácticas de conservación.

Se consideraron las siguientes prácticas de conservación como propuestas de manejo de las áreas agrícolas: surcado al contorno, terrazas de formación sucesiva y terraza vivas con el pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Se utilizaron los siguientes

valores de P de 0.8, 0.6 y 0.01, respectivamente. Se creó un mapa en formato raster con los valores de P para cada una de estas prácticas de conservación. Posteriormente se estimó la erosión para cada mapa de P utilizando los mapas de los otros factores de la USLE.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Ubicación de la microcuenca

La microcuenca “La Ciénega” se localiza al norte de los límites político-administrativos del municipio de Malinaltepec. Se ubica entre las coordenadas UTM 189600 y 191500 en Latitud Norte, 528000 y 540000 en Longitud Este. El municipio colinda al norte con Copanatoyac, al sur con San Luis Acatlán e Iliatenco, al este con Atlamajalcingo del Monte y Metlatónoc; y al oeste con Tlacoapa (Figura 9). Se encuentra inmersa en los siguientes espacios hídricos del país: Región Hidrológica (RH20), cuenca del río Papagayo y Subcuenca Omitlán – azul (Figura 13).

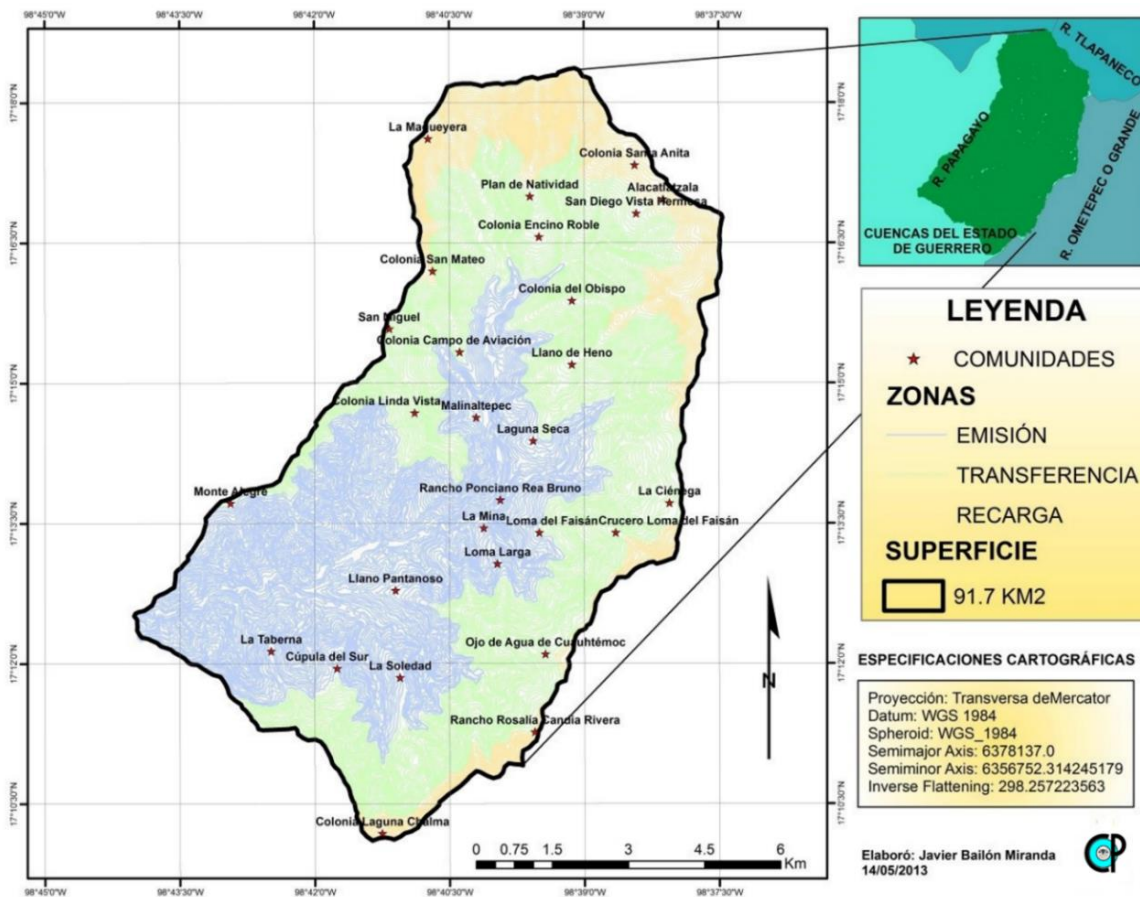


Figura 9. Distribución espacial de las comunidades

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2013)

La cuenca constituye el espacio geográfico de 28 comunidades (Cuadro 9).

Cuadro 9. Comunidades que se encuentran dentro de la microcuenca

No.	COMUNIDAD	LONGITUD	LATITUD	MSNM	UBICACIÓN ESPACIAL	GRUPO ÉTNICO
1	Malinaltepec	98°40'12.00"	17°14'38.00"	1510	Zona de transferencia	Me'phaa
2	Alacatlalzala	98°38'7.01"	17°16'58.01"	2220	Zona de recarga	Tu'unSavi
3	Encino Roble	98°39'29.99"	17°16'34.00"	1930	Zona de transferencia	Me'phaa
4	Colonia del Obispo	98°39'7.99"	17°15'52.99"	1990	Zona de transferencia	Me'phaa
5	Monte Alegre	98°42'56.02"	17°13'43.00"	1720	Zona de transferencia	Me'phaa
6	Ojo de Agua	98°39'25.99"	17°12'6.01"	2120	Zona de transferencia	Me'phaa
7	Colonia San Mateo	98°40'41.02"	17°16'12.00"	2210	Zona de recarga	Me'phaa
8	La Soledad	98°41'3.01"	17°11'51.00"	1680	Zona de emisión	Me'phaa
9	San Miguel	98°41'10.00"	17°15'34.99"	2080	Zona de transferencia	Me'phaa
10	Laguna Seca	98°39'33.98"	17°14'22.99"	1620	Zona de emisión	Me'phaa
11	La Ciénega	98°38'3.01"	17°13'43.00"	2050	Zona de transferencia	Me'phaa
12	Loma del Faisán	98°39'29.99"	17°13'23.99"	1720	Zona de transferencia	Me'phaa
13	Llano Pantanoso	98°41'6.00"	17°12'47.02"	1550	Zona de emisión	Me'phaa
14	La Taberna	98°42'29.02"	17°12'7.99"	1620	Zona de emisión	Me'phaa
15	Crucero Loma del Faisán	98°38'39.01"	17°13'23.99"	2100	Zona de transferencia	Me'phaa
16	Cúpula del Sur	98°41'44.99"	17°11'57.01"	1680	Zona de emisión	Me'phaa
17	Colonia Linda Vista	98°40'53.00"	17°14'40.99"	1880	Zona de transferencia	Me'phaa
18	Loma Larga	98°39'58.00"	17°13'4.01"	1620	Zona de emisión	Me'phaa
19	La Magueyera	98°40'44.00"	17°17'37.00"	2480	Zona de recarga	Me'phaa
20	La Mina	98°40'7.00"	17°13'27.01"	1460	Zona de emisión	Me'phaa
21	Colonia Santa Anita	98°38'26.02"	17°17'20.00"	2240	Zona de recarga	Tu'unSavi

No.	COMUNIDAD	LONGITUD	LATITUD	MSNM	UBICACIÓN ESPACIAL	GRUPO ÉTNICO
22	Colonia Laguna Chalma	98°41'15.00"	17°10'10.99"	1800	Zona de recarga	Me'phaa
23	Llano de Heno	98°39'7.99"	17°15'11.99"	1990	Zona de transferencia	de Me'phaa
24	Plan de Natividad	98°39'36.00"	17°16'59.99"	2110	Zona de transferencia	de Me'phaa
25	Rancho Rosalía Candía	98°39'33.01"	17°11'16.01"	2180	Zona de recarga	Me'phaa
26	Rancho Ponciano Rea	98°39'56.02"	17°13'45.01"	1360	Zona de emisión	Me'phaa
27	Col. Campo de Aviación	98°40'23.02"	17°15'20.02"	1770	Zona de transferencia	de Me'phaa
28	San Diego Vista Hermosa	98°38'25.01"	17°16'49.01"	2100	Zona de transferencia	de Tu'unSavi

6.2 Características físicas y bióticas

6.2.1 Climatología

De acuerdo con el Sistema de Clasificación Climática de Köppen y modificado por E. García, se identifican tres tipos de climas dentro de la microcuenca (Figura 10). El C(w2)(w) corresponde a un clima templado subhúmedo, con lluvias en verano y humedad, además de presentar una temperatura media anual de 12 a 18°C. El A(C)w2(w) es un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano y humedad alta, con una temperatura media anual de entre 18 a 22 °C. El clima Aw2 (w) pertenece a un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y humedad alta con temperatura media anual mayor a los 22°C (INEGI, 2009a), estas condiciones son medias óptimas para la producción de café en la parte media y alta y el plátano en las partes bajas de la microcuenca (Ruiz *et al.*, 2013).

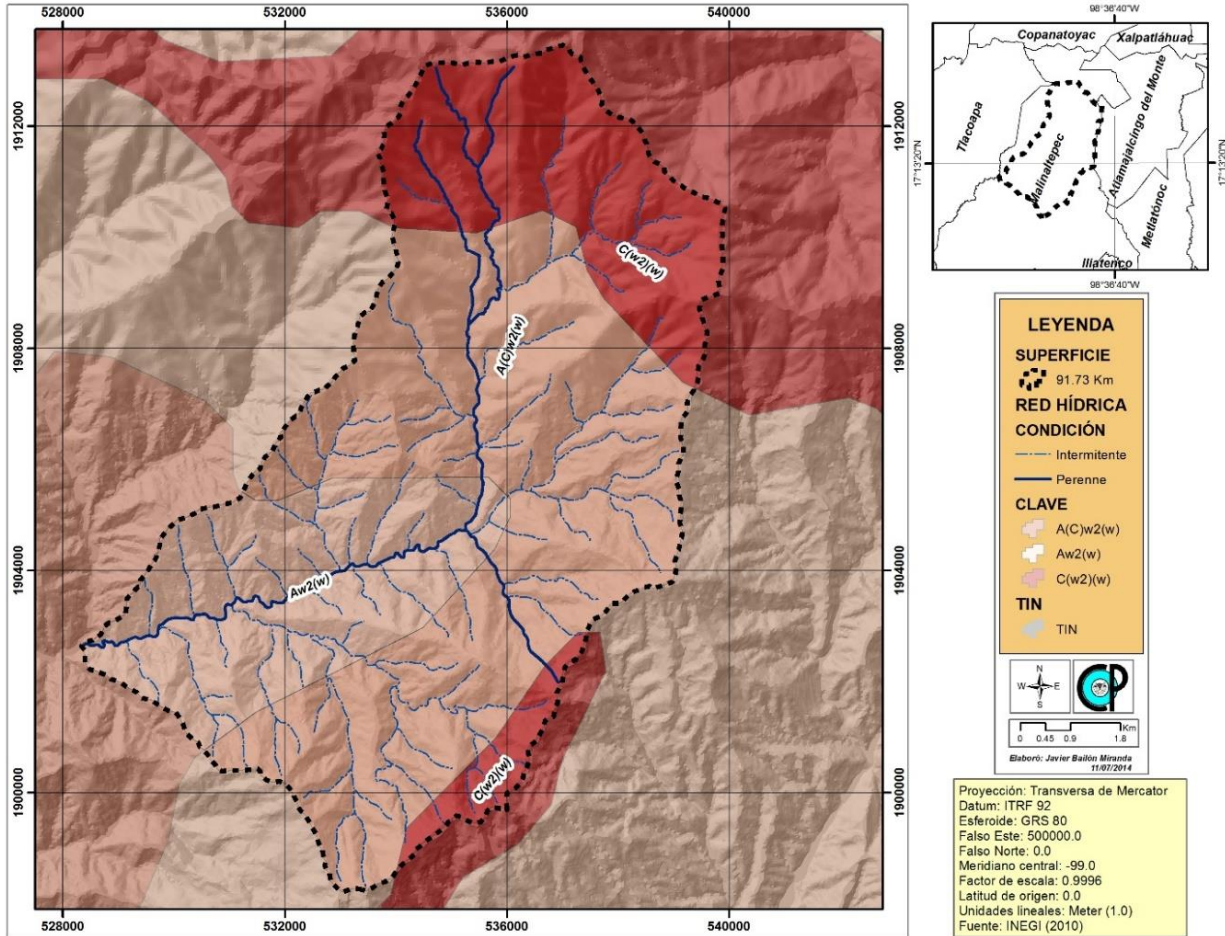


Figura 10. Climas presentes

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2013)

6.2.2. Edafología

Dentro de la microcuenca se reconocen dos tipos de unidades de suelos (Figura 11), según la clasificación de suelos FAO/UNESCO (1976). Dichas unidades corresponden a la unidad de Regosol y Litosol (INEGI, 2007). La subunidad de Regosol eútrico asociado a Cambisol dístrico y Litosol con textura media (Re+Bd+I/2/P), cubre un área de 88.7 km² en la parte alta, media y baja de la microcuenca (Figura 11). En la parte norte de la microcuenca se encuentra inmersa la unidad de Litosol asociado a Feozen háplico y Regosol eútrico con textura media (I+Hh+Re/2), en una superficie de 3 km² (Figura 11). El suelo Regosol y las

características climáticas representan condiciones medias óptimas para el desarrollo de cultivos de café y plátano (Ruiz *et al.*, 2013).

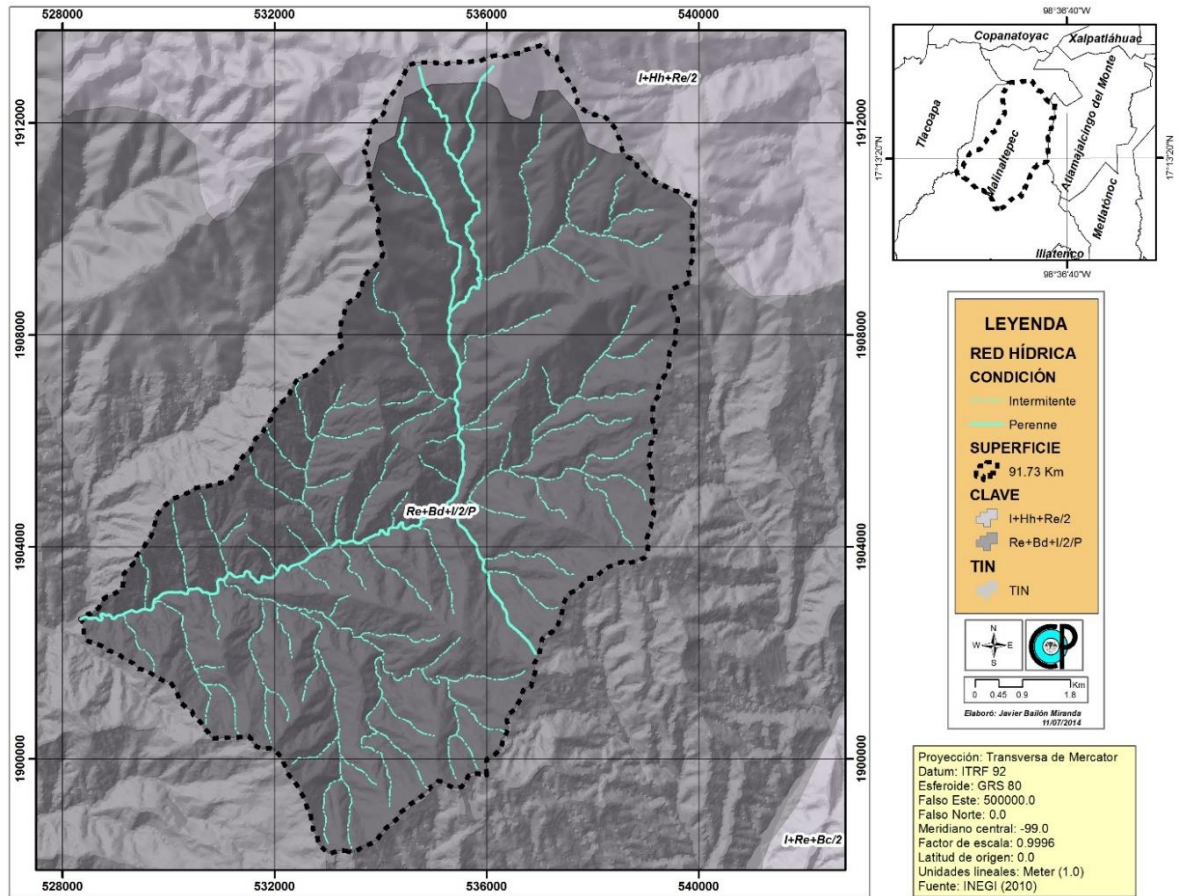


Figura 11. Tipos de suelo

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2007)

Los Regosoles, del griego *reghos*, son suelos con poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general, son claros o pobres en materia orgánica, muy parecidos a la roca madre. En nuestro país constituyen el segundo tipo de suelo más importante por su extensión (19.2%). Muchas veces están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad (INEGI, 2008).

Los Litosoles, del griego *lithos*, son los suelos más abundantes del país (ocupan 22 de cada 100 hectáreas de suelo). Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Son de muy baja fertilidad natural y muy susceptible a la erosión. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. Generalmente, se localizan en terrenos de bosques, selvas y pastizales (INEGI, 2008).

6.2.3 Fisiografía

La microcuenca “La Ciénega” pertenece a la provincia Sierra Madre del Sur; dentro de la subprovincia Cordillera Costera del Sur y forma parte del sistema de topofomas de sierra alta complejas de la región Montaña del estado de Guerrero (Figura 12).



Figura 12. Subprovincias fisiográficas de Guerrero

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2013)

6.2.4 Hidrología

La red hidrológica de la microcuenca se ubica en los límites del parteaguas en la vertiente de la cuenca “Río Papagayo”, el cual desemboca en el Océano Pacífico, en los límites de los municipios de Acapulco y San Marcos. Se encuentra en la Región Hidrológica (RH-20) corresponde a la Costa Chica de Guerrero (Figura 13).

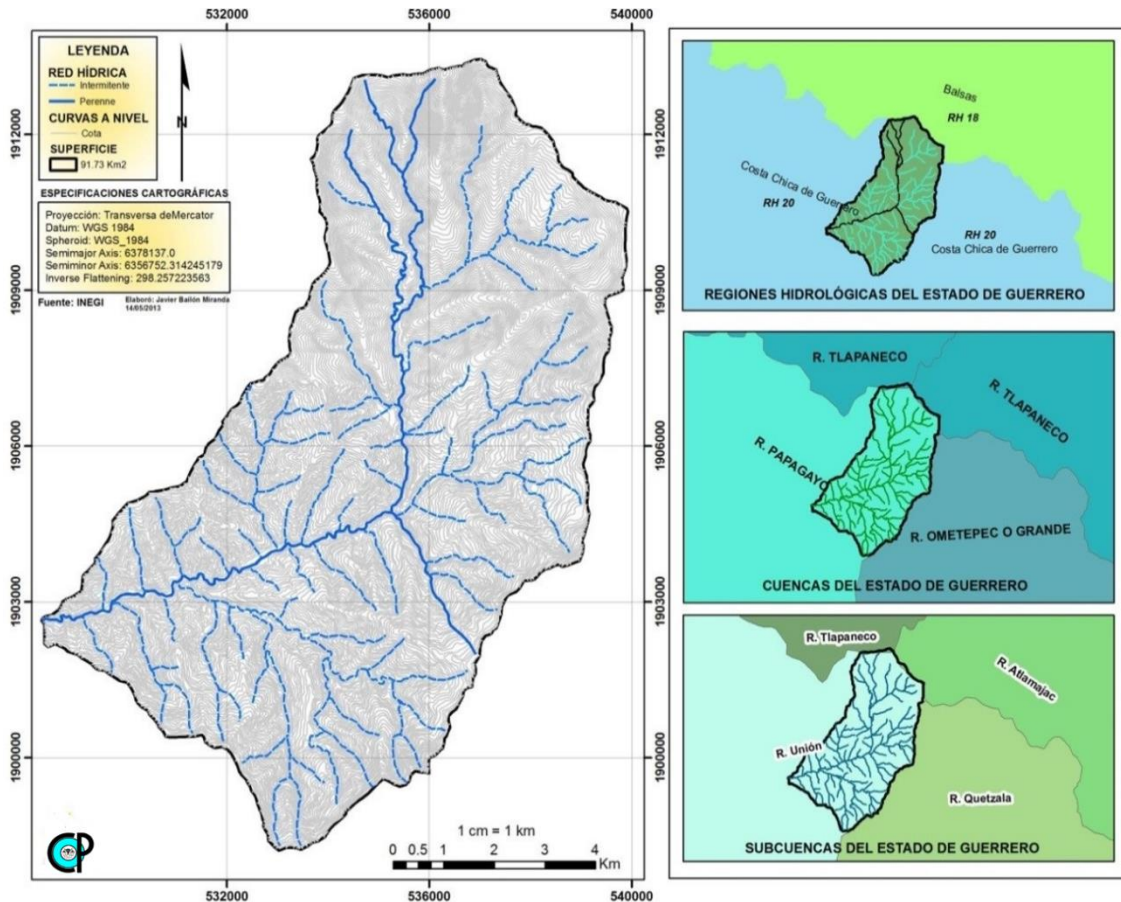


Figura 13. Regiones hidrográficas, cuencas y subcuencas de Guerrero

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2013)

6.2.5 Geología

La geología de la microcuenca “La Ciénaga” comprende al denominado complejo Mixteco, el cual aflora en la parte noreste del estado de Guerrero y se extiende hacia los estados de Puebla y Oaxaca. Tuvo su formación en el Paleozoico que equivale a

una antigüedad superior a los 248 millones de años (INEGI, 2009b). La roca del área corresponde a la clase metamórfica de tipo esquistos, resultado de un metamorfismo regional (Figura 14).

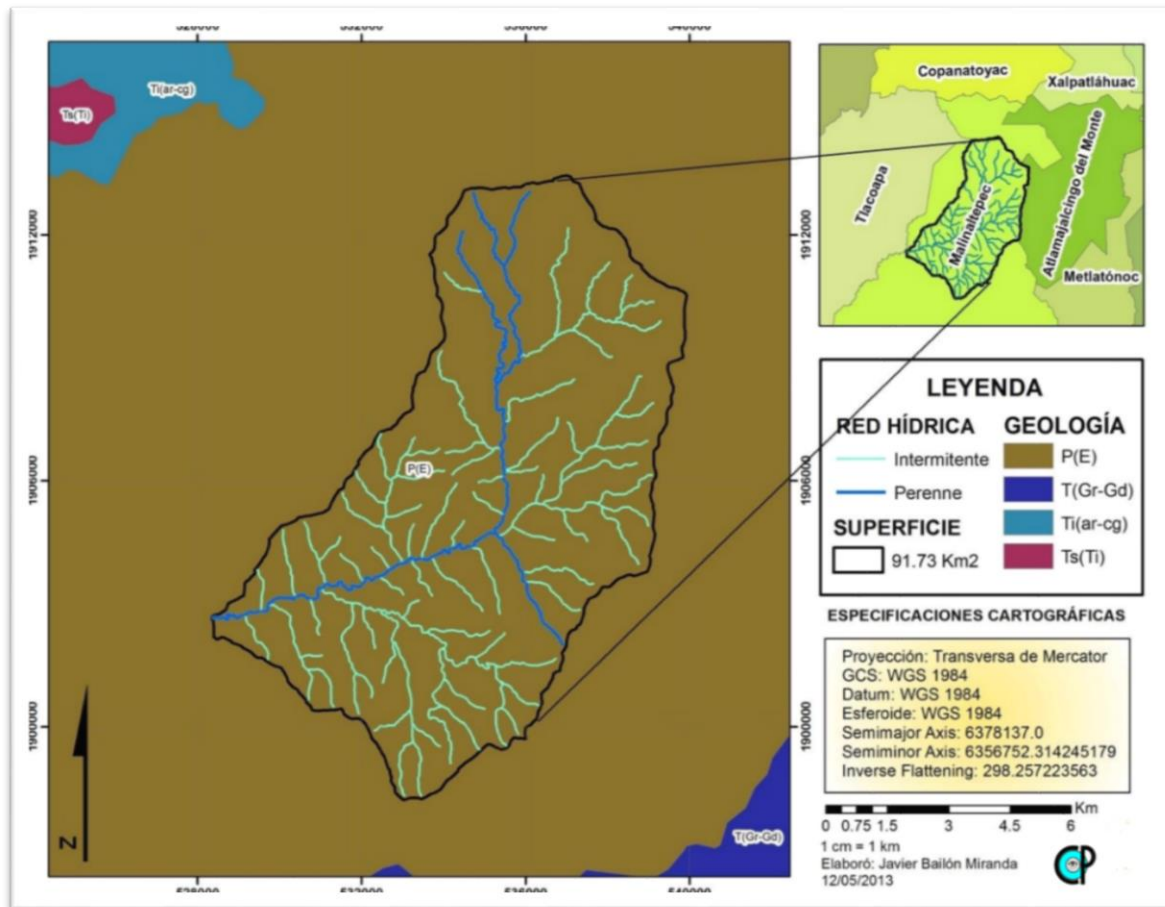


Figura 14. Mapa de geología

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2013)

6.2.6 Uso de suelo y vegetación

La microcuenca se ubica en un ecosistema templado. Las comunidades vegetales de referencia son principalmente el bosque pino-encino, encino-pino y encino en la parte alta y parte de la zona media (Figura 15). El bosque de pino-encino (PQ) es el más representativo, asociado con vegetación secundaria y cubre una superficie de 63.80 km², seguido del pastizal inducido (I) que abarca un área de 27.73 km² y el bosque

mesófilo de montaña (M) localizado en la porción sureste de la microcuenca que abarca una superficie mínima de 0.18 km². En la zona baja y media existe pastizal y vegetación secundaria arbustiva en estado de recuperación, debido a la remoción de la vegetación natural para realizar actividades agrícolas. Existen zonas de pocas hectáreas que se han destinado a la recuperación natural, como es el bosque mesófilo de montaña que se encuentra ubicado a la altura de la comunidad de Ojo de Agua de Cuauhtémoc (Figura 15). Sin embargo, hay algunos otros espacios que se encuentran en total degradación y con claros problemas de erosión hídrica y laminar. Se observa que en la microcuenca las condiciones naturales en la cobertura forestal han cambiado, como es el caso de la superficie de pastizal y la cobertura que cubre el BPQ asociado con vegetación secundaria.

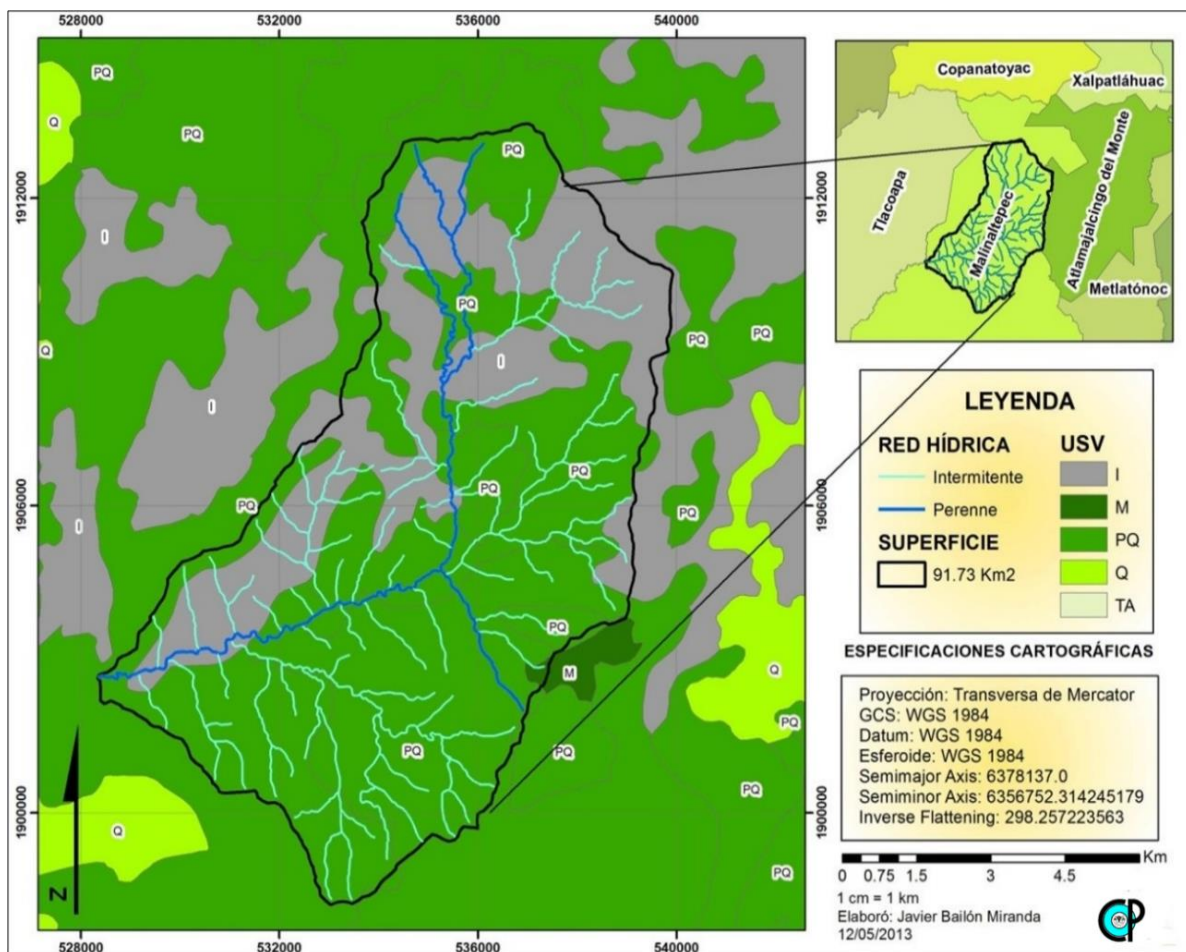


Figura 15. Uso de suelo y vegetación

Fuente: Generación propia con información vectorial de INEGI (2013)

6.2.7 Fauna

Respecto a la fauna presente, existe el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el jabalí (*Tayassu tajacu*), la ardilla (*Sciurus ssp*), el conejo (*Sylvilagus ssp*), el tigrillo (*Leopardus wiedii*), el tlacuache (*Didelphis ssp*), el armadillo (*Dasypus vemcinctus*), el mapache (*Procyon lotor*), el tejón (*Nasua narica*), el zorro (*Urocyon ssp*), el zorrillo (*Mephitis macroura*), paloma de monte (*Columba ssp*), correcaminos (*Geococcyx velox*), gavilán (*Buteo ssp*), víbora de cascabel (*Crotalus ssp*), culebra mazacuata (*Boa constrictor*), lagartija (*Sceloporus ssp*), entre otras.

6.3 Análisis hidromorfométrico de la microcuenca la Ciénega

6.3.1 Parámetros del relieve

Tamaño de la cuenca

De acuerdo a los cálculos realizados, la microcuenca “La Ciénega” tiene una extensión territorial de 91.75 km² (9175.41 ha) y un perímetro de 44.7 km. Por lo que de acuerdo a Campos (1998) es considerada como una cuenca pequeña ya que se ubica entre los rangos de 25 a 250 km².

Centroide X, Y y Z

El valor del centroide X 534585 en coordenadas UTM.

El valor del centroide Y 1905789 en coordenadas UTM.

El valor del centroide Z es de 2132 m.

El centroide X - Y hace referencia a la ubicación geográfica de la microcuenca a partir del centro, mientras que el centroide Z representa la elevación.

La curva hipsométrica

Considerando la forma de la curva hipsométrica (Figura 16) y tomando en cuenta el criterio propuesto por Campos (1998), la microcuenca se encuentra entre la fase intermedia y la fase de monadnock. Es decir, se encuentra entre una etapa madura y una etapa vieja, con la tendencia a la vejez. Esto significa que dentro de la microcuenca se llevan a cabo un proceso erosivo importante y que el suelo erosionado tiene por destino las partes bajas y el asolvamiento o la generación y/o ampliación de las planicies de inundación.

De acuerdo a la forma de la curva hipsométrica, la microcuenca muestra una amplia variación altitudinal, y una distribución de áreas casi simétricas. Se trata de una cuenca de valles profundos y estrechos, por lo que la hipsometría está determinada por la vertiente. La curva también indica lo pronunciado que está el relieve en la parte alta, ya que a pesar de que se trata de una microcuenca muy montañosa, solo el 56.44% de su superficie, que representa 5.90 km², presenta elevaciones mayores. En cambio, en el 91.07% se aprecia uniformidad en el relieve, lo que viene a representar una superficie de 83.37 km². Finalmente, tan solo el 2.49% de longitud representan sitios estables o de planicie (Cuadro 10; Figura 16).

Cuadro 10. Datos para generar la curva hipsométrica

Nº ORDEN	COTA MIN	COTA MAX	Área Parcial (km ²)	Área Acumulada (km ²)	Área que queda sobre la superficie (km ²)	Porcentaje de área entre C.N.	Porcentaje de área sobre C.N.
1	1102	1324	5.90	5.90	91.55	6.44%	100.00%
2	1325	1547	17.30	23.20	85.65	18.90%	93.56%
3	1548	1769	22.20	45.40	68.35	24.25%	74.66%
4	1770	1992	21.58	66.98	46.15	23.57%	50.41%
5	1993	2215	15.67	82.65	24.57	17.12%	26.84%
6	2216	2437	6.62	89.27	8.90	7.23%	9.72%
7	2438	2660	1.80	91.07	2.28	1.97%	2.49%
8	2661	2883	0.48	91.55	0.48	0.52%	0.52%
Total			91.7			100%	

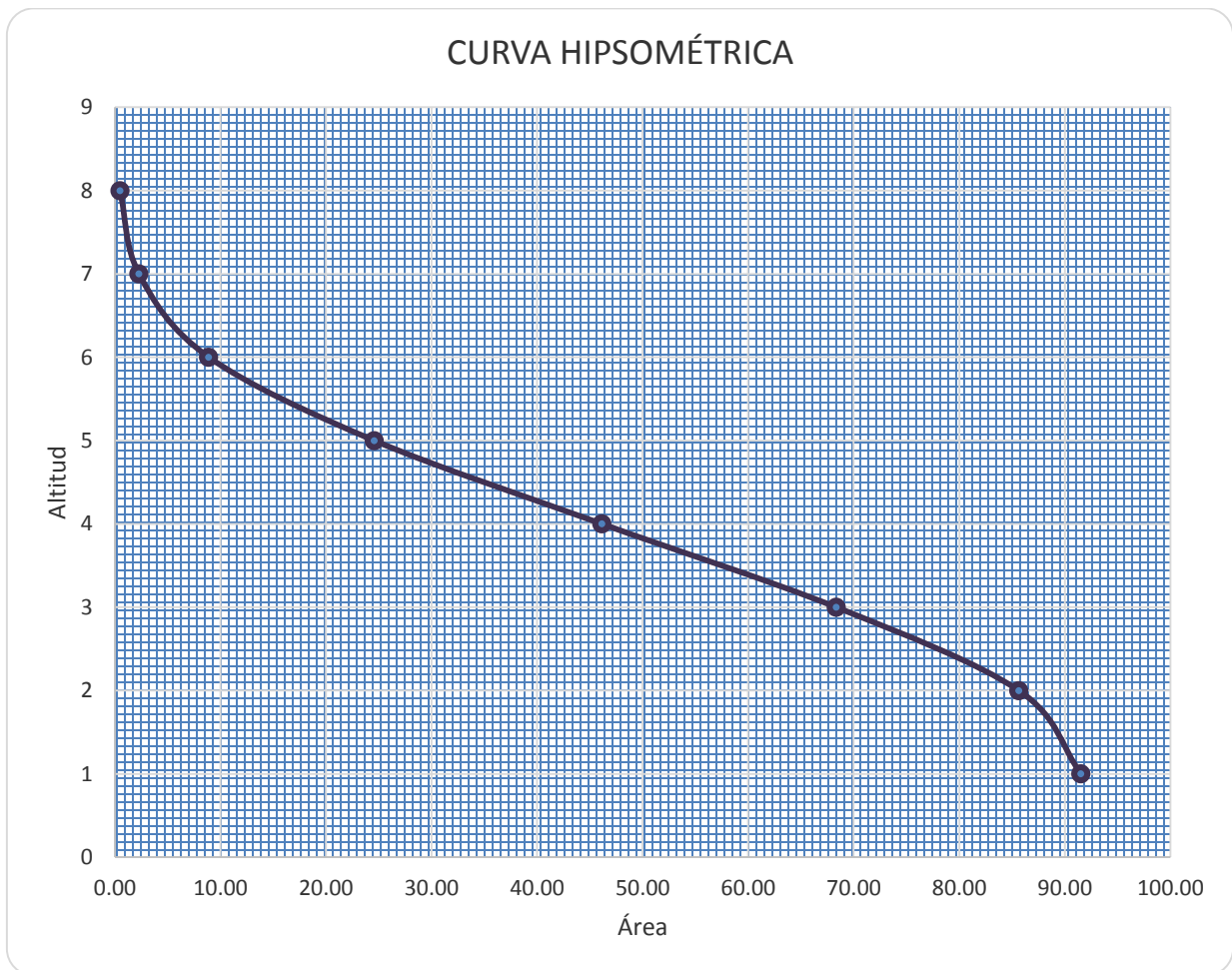


Figura 16. Curva hipsométrica de la microcuenca

Elevación media

La elevación media (50% del área acumulada en la curva hipsométrica) es de 1992 m, catalogándose como una cuenca de clase baja en cuanto a su elevación, según la clasificación de acuerdo con INE (2004). Así mismo, este valor indica las características térmicas que existen dentro de la microcuenca respecto a la distribución climática en la zona (Figura 10).

Frecuencia de altitudes

El rango de altitudes de la microcuenca va desde 1102 m en las zonas más bajas hasta 2883 m en las zonas altas (Figura 17 y 18, Cuadro 10), presentando una diferencia altitudinal de 1992 m. Esto determina varios pisos altitudinales, con una altitud más frecuente de 1881 m.

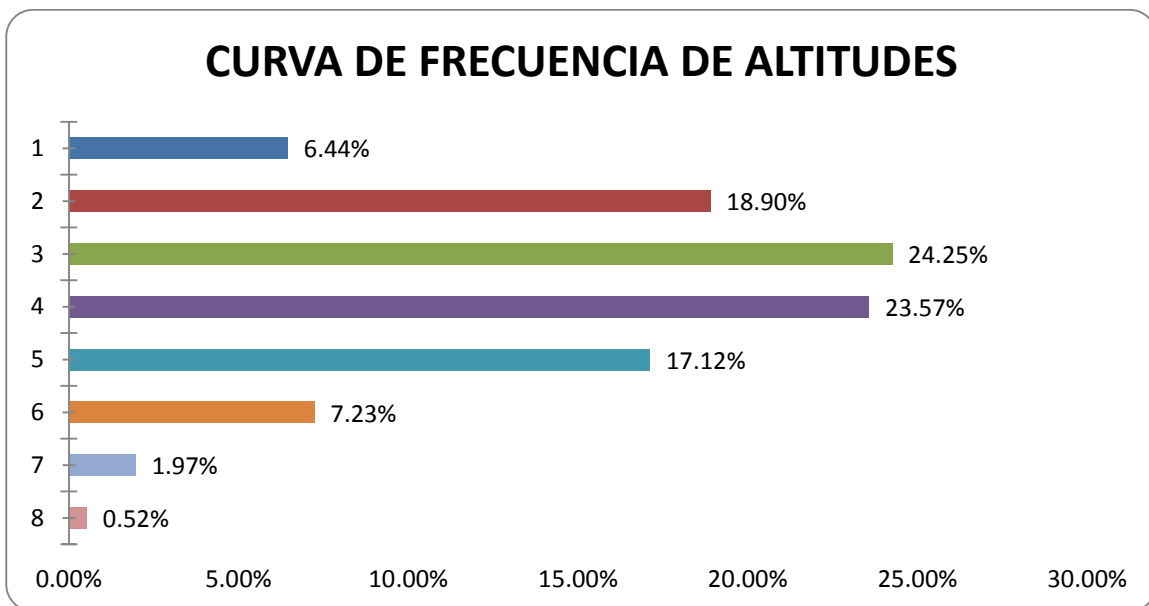


Figura 17. Frecuencias altimétricas de la microcuenca la Ciénega

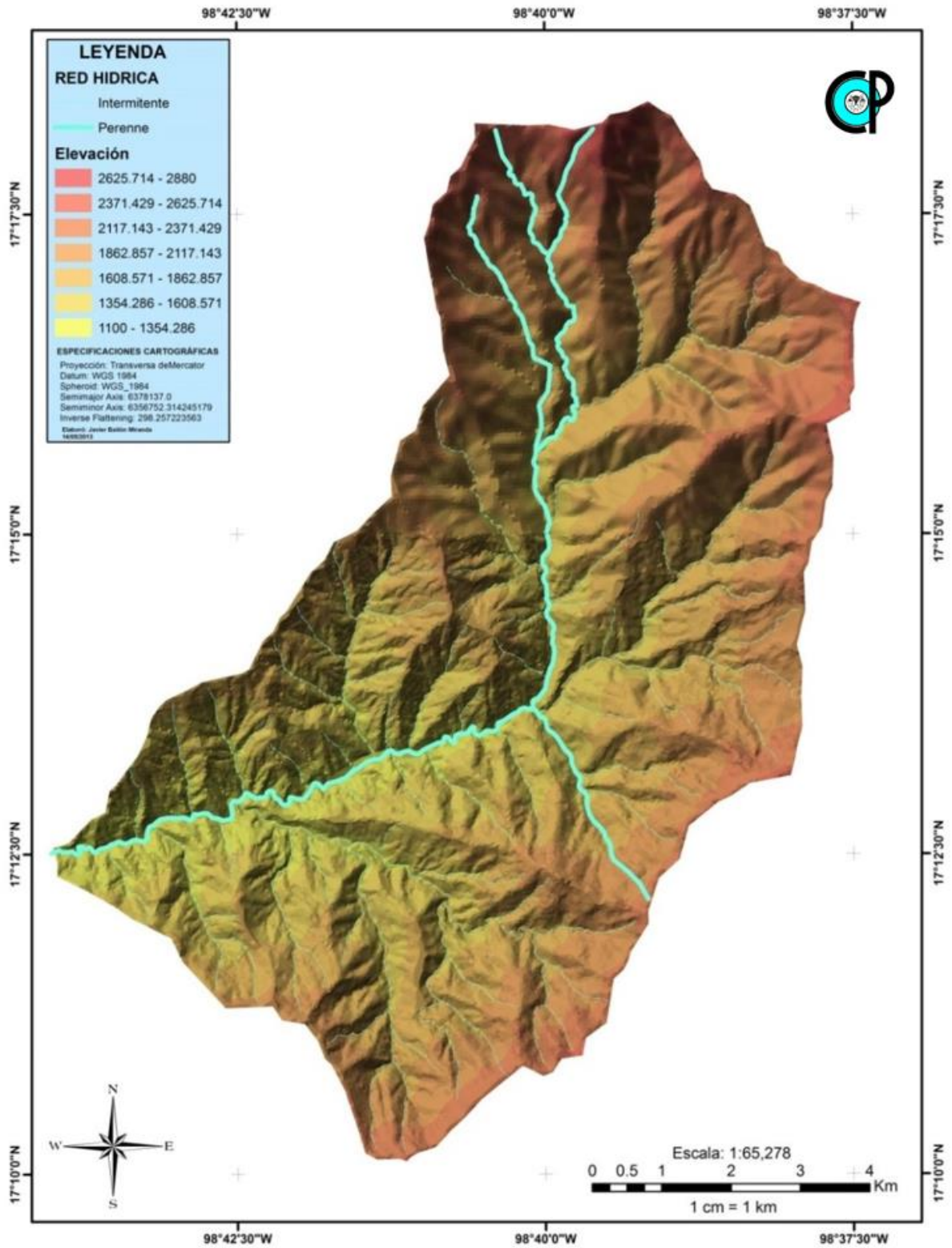


Figura 18. Gradientes altitudinales de la microcuenca
 Fuente: Construcción a partir de información ASTER GDEM (2014)

Pendiente media de la microcuenca

Dentro de la microcuenca existen pendientes que van del 0 al 48 por ciento (Figura 19). Los lugares planos ocupan tan solo 0.79 km², mientras que los sitios de pendiente fuerte cubren el 0.11 de km² (Cuadro 11). Una superficie de 24.51 km² presenta una pendiente del 26.42 % y representa el 26.72% de la superficie total de la microcuenca.

Cuadro 11. Pendiente media de la microcuenca La Ciénega

No.	Rango de pendientes %			Ocurrencia	Ocurrencia	Superficie	(1) * (2)
	Inf.	Sup.	Prom. (1)	%	(2)	(Km2)	
1	0	4.8	2.4	0.87	318	0.79	763.2
2	4.8	9.6	7.2	2.65	973	2.43	7005.6
3	9.6	14.4	12	7.26	2663	6.65	31956
4	14.4	19.2	16.8	14.09	5171	12.92	86872.8
5	19.2	24.02	21.61	22.83	8378	20.93	181048.5
							8
6	24.02	28.82	26.42	26.72	9808	24.51	259127.3
							6
7	28.82	33.62	31.22	17.60	6460	16.14	201681.2
8	33.62	38.43	36.025	6.52	2394	5.98	86243.85
9	38.43	43.23	40.83	1.34	493	1.23	20129.19
10	43.23	48.04	45.635	0.11	42	0.10	1916.67
			TOTAL	100	36700	91.7	876744.4
							5
							Pendiente media de la cuenca (%)
							23.9

La pendiente media de la microcuenca en los 91.7 km² de extensión, es de 23.9 % (Cuadro 11), lo cual significa que el tipo de relieve es fuertemente accidentado (Figura 19). En la microcuenca existen sitios que representan espacios planos (0 – 2%), espacios suaves (2 – 5%), medianos (5 – 10%), accidentados (10 – 15%) y fuertes (15 – 25%). Esta variación en el relieve influye directamente en el aumento de las velocidades de los escurrimientos del agua de manera superficial, por lo tanto se considera que el tiempo de concentración del agua de la parte alta a la zona de emisión será en menor tiempo.

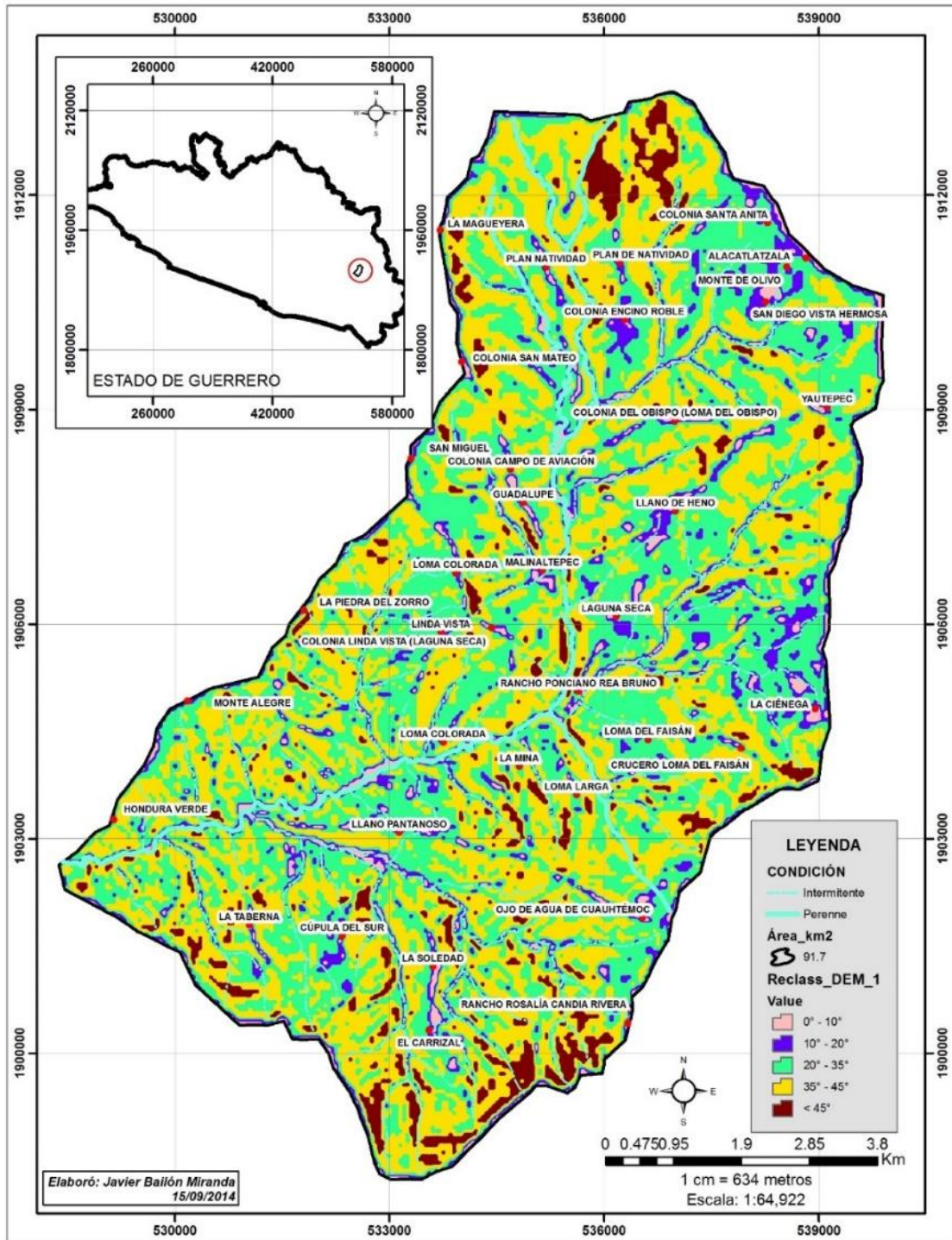


Figura 19. Mapa de pendientes

Fuente: Construcción a partir de información ASTER GDEM (2014)

Factor de forma (F)

El índice de forma obtenido fue de 0.46. De acuerdo a este valor la microcuenca presenta una forma moderadamente achatada, lo que indica que el tiempo del viaje de agua será moderado. Esta condición será determinante para el tiempo de concentración del agua de la parte alta a la zona de depósito, partiendo del principio de que valores cercanos a 1 tendrán la tendencia de concentrar mayor volumen de escurrimiento. Por otra parte, este resultado indica que las crecidas serán menos bruscas en caso de lluvias concentradas o tormentas.

Índice de compacidad o índice de Gravelius (K)

De acuerdo a la clasificación hecha por Campos (1998), la microcuenca se encuentra en la clase de forma II, ya que su índice de compacidad es de 1.28. Esto significa que la forma que posee es de oval-redonda a oval-oblonga. Por lo tanto, tendrá gastos picos más amortiguados y recesiones más prolongadas, reduciendo así el riesgo de inundaciones aguas debajo de la microcuenca.

Relación de elongación (R)

El valor obtenido de la relación de elongación fue de 0.77. Esto indica que la microcuenca de la Ciénega es de relieve pronunciado.

Relación de circularidad (Rc)

La microcuenca tiene 0.58 de relación de circularidad. Esto indica que la microcuenca es de circularidad intermedia. Se infiere que esta característica no intensifica las crecidas y vigorosidad del río principal, pero sí de los afluentes primarios de acuerdo a la relación de elongación y al índice de compacidad, respectivamente.

Coefficiente de masividad (K_m)

El valor de este factor fue es de 19.5, lo cual indica que la microcuenca es montañosa. Este dato es importante por la intensidad de lluvia de la zona, donde las precipitaciones promedio anuales oscilan entre los 1800 a los 2500 mm y pueden causar un fuerte proceso erosivo.

6.3.2 Parámetros de la red hídrica

Cuantificación de la red hídrica

En la microcuenca se tiene un total de 147 ríos, de los cuales 115 son intermitentes y 30 son perennes (Figura 20). Los primeros se distribuyen en 124.89 km y los segundos en 26.30 km. De acuerdo a las clases de valores de los escurrimientos, la red hídrica de la microcuenca se encuentra en la clase media y esta condición es la que le da un buen drenaje y por lo tanto un buen escurrimiento.

Orden mayor de la red hídrica

De los 147 ríos, en la microcuenca existen órdenes de corrientes que van del 1° al 4° orden. En el Cuadro 12 se puede observar que el primer orden tiene un mayor número de cauces, mientras que el tercer orden es el que menos número presenta. En general, la red hídrica de la microcuenca presenta una clase de órdenes del tipo medio, lo que significa que la estructura de la red hídrica está bien definida y por lo tanto el orden 4 nos indica que la microcuenca se encuentra en una etapa madura. Esto coincide con el resultado obtenido en la curva hipsométrica.

Cuadro 12. Orden de corriente que conforma la microcuenca

Orden de corriente	Suma de corrientes	Longitud (km)
1	76	99.831472
2	39	31.886993
3	15	9.394098
4	17	8.967153
Total	147	150.079716

Relación de bifurcación

La microcuenca presenta un valor de bifurcación en promedio de 1.79 (Cuadro 13). Este valor es bajo en comparación con los propuestos por Summerfiel (1991), lo que significa que la cuenca litológicamente es un espacio homogéneo. Por lo tanto, la microcuenca es bien drenada y esto a su vez puede provocar crecidas violentas en las partes bajas de los cauces principales.

Cuadro 13. Relación de bifurcación

No. De Orden de Corriente	No. Total de Cauces	Relación de Bifurcación	
1	76	De 1° a 2° orden	1.94871795
2	39	De 2° a 3° orden	2.6
3	15	De 3° a 4° orden	0.83333333
4	18	Suma	5.38205128
	Suma	Promedio	1.79401709
	148		

Densidad del drenaje

La densidad de drenaje de la microcuenca la Ciénega es de 1.65 km/km², lo cual indica que se encuentra en una moderada densidad de drenaje de acuerdo a Delgadillo y Páez (2008). Esta condición se debe a las características litológicas que se encuentra en la microcuenca, ya que cuando la densidad de drenaje es alta es porque los materiales a nivel superficial son impermeables, vegetación dispersa y relieve muy montañoso (Strahler, 1964).

Densidad de corriente

El valor de la densidad de corriente es de 1.14 km/km². De acuerdo a los criterios de Breña y Jacobo (2006), la densidad de corriente tiene un régimen pluvial de poca cuantía o el material litológico es resistente a la erosión.

Longitud del cauce principal

La microcuenca presenta una longitud del cauce principal de 19.02 km. De acuerdo a las clases de valores de longitud del cauce principal descritas por INE (2004) se encuentra en la clase de longitud del cauce del tipo largo. Este valor, aunado con la pendiente media del cauce principal repercute directamente en el tiempo de concentración del agua a la zona de depósito de la cuenca.

Pendiente del cauce principal

El cauce principal de la microcuenca presenta una pendiente del 11.48%. De acuerdo a la clasificación del INE (2004) es una pendiente moderada. En la Figura 21 se puede apreciar que a partir de los 1600 m el grado de inclinación del cauce principal aumenta drásticamente. Esta tendencia es lógica, ya que a esa altura se encuentra el área de transición de la de la zona de garganta a la zona de cabecera de la microcuenca. Por otra parte, es ahí donde se manifiestan las inclinaciones más pronunciadas de acuerdo al mapa de pendientes (Figura 19), ya que se representan inclinaciones de 20 a mayores de 45%.

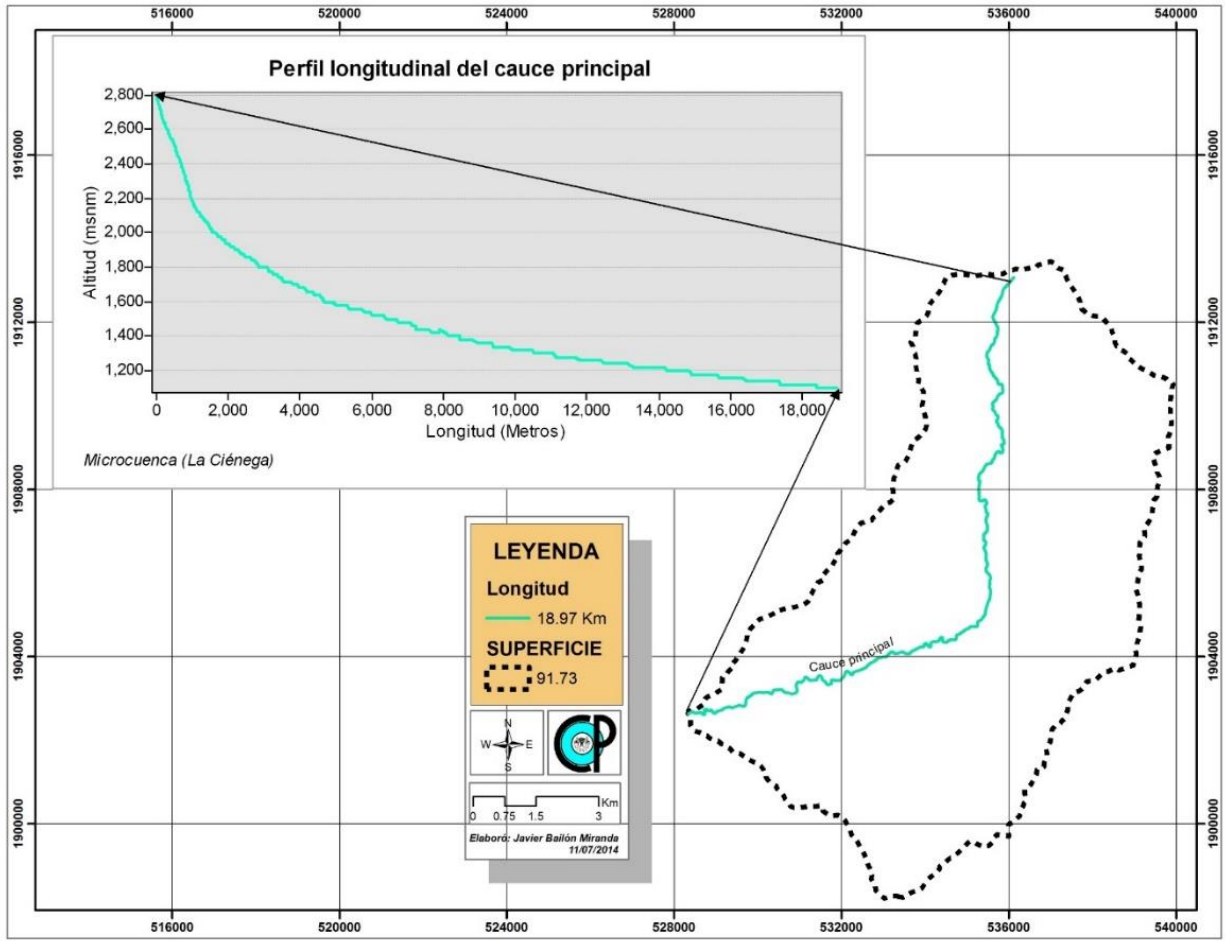


Figura 21, Perfil longitudinal del cauce principal

Fuente: Generación propia a partir de datos vectoriales topográficos INEGI (2013)

Tiempo de concentración

En la microcuenca La Ciénega se registró un tiempo de concentración del agua de la parte alta a la zona de aforo de 96.87 minutos, lo cual significa que los escurrimientos son lentos de acuerdo a los establecido por el INE (2004). Este factor está relacionado con los resultados que se describieron en los parámetros de forma. Las condiciones morfométricas que indican en términos generales que es una cuenca moderadamente achatada, en la cual el viaje del agua es moderado, que es oval-redonda a oval-oblonga, de acuerdo al índice de compacidad permiten inferir que tendrá gastos picos amortiguados. A pesar de que la cuenca posee un relieve pronunciado, el factor forma

es el que viene a condicionar el tiempo de concentración del agua. Por lo tanto, a mayor tiempo de concentración mayor volumen de agua o mayor escurrimiento.

Resumen de los parámetros hidro – geomorfológicos

Cuadro 14. Parámetros básicos

Parámetro	Valor	Unidad
Área de la cuenca (A)	91.7	Km ²
Centroide X	534585	Metros
Centroide Y	1905789	Metros
Centroide Z	2132	m.s.n.m
Perímetro de la cuenca (P)	44.7	Km
Longitud de la cuenca (L)	14.10	Km
Longitud del cauce principal (Lp)	19.2	Km
Cota inicial del cauce principal	1100	m.s.n.m
Cota final del cauce principal	2880	m.s.n.m
Longitud total de cauces (Lt)	151.20	Km
Ancho de la cuenca (w)	6.5	Km
Altitud media de la cuenca	1992	m.s.n.m
Altitud más frecuente	1881	m.s.n.m
Altitud de frecuencia media	1788	m.s.n.m

Cuadro 15. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca

Parámetro	Valor	Interpretación
Factor forma de la cuenca (F)	0.46	Moderadamente achatada
Relación de elongación (R)	0.77	Relieve pronunciado
Relación de circularidad (Rc)	0.58	De circular intermedia
Índice de compacidad o índice de Gravelius (K)	1.31	Oval-redonda a oval-oblonga
Coefficiente de masividad (K _m)	19.5	Montañosa

Cuadro 16. Parámetros del relieve de la microcuenca

Parámetro	Valor	Unidad
Pendiente media de la cuenca	23.9	%
Pendiente media del cauce principal	11.48	%

Cuadro 17. Parámetros de la red hídrica

Parámetro	Valor
Densidad de drenaje	1.65
Constantes de estabilidad del río (C)	0.61
Densidad de corriente (Dc) o densidad hidrográfica (Dh)	1.14

6.4 Escurrimientos

6.4.1 Escurrimiento medio

El volumen medio que puede escurrir para la microcuenca La Ciénega es de 102 962 780.9 m³ o 102.96 millones de metros cúbicos, considerando los diferentes usos de suelos, las superficies que conforman a cada uno de ellos, el grado de inclinación y las texturas de los tipos de suelo. Este dato se puede utilizar como referencia para la construcción de obras hidráulicas de almacenamiento o de retención de agua para usos múltiples.

6.4.2 Escurrimiento máximo instantáneo

El escurrimiento máximo a la salida de la microcuenca para un periodo de retorno de 5 años fue de 1, 553.3 m³/s. Es un valor muy alto, asociado a la superficie de la cuenca. Debido a que el tamaño de la microcuenca es extenso, se considera sólo como un valor de referencia. Para el diseño de obras pequeñas de captación de agua o control de la erosión, el cálculo específico del escurrimiento máximo para el diseño de obras de excedencia es más útil.

6.5. Erosión de la microcuenca

Erosividad de la lluvia (Factor R)

La erosividad en la microcuenca tuvo un rango de 5730 MJ mm/ha hr a 7690 MJ mm/ha hr (Figura 22). Estos valores indican un alto potencial erosivo.

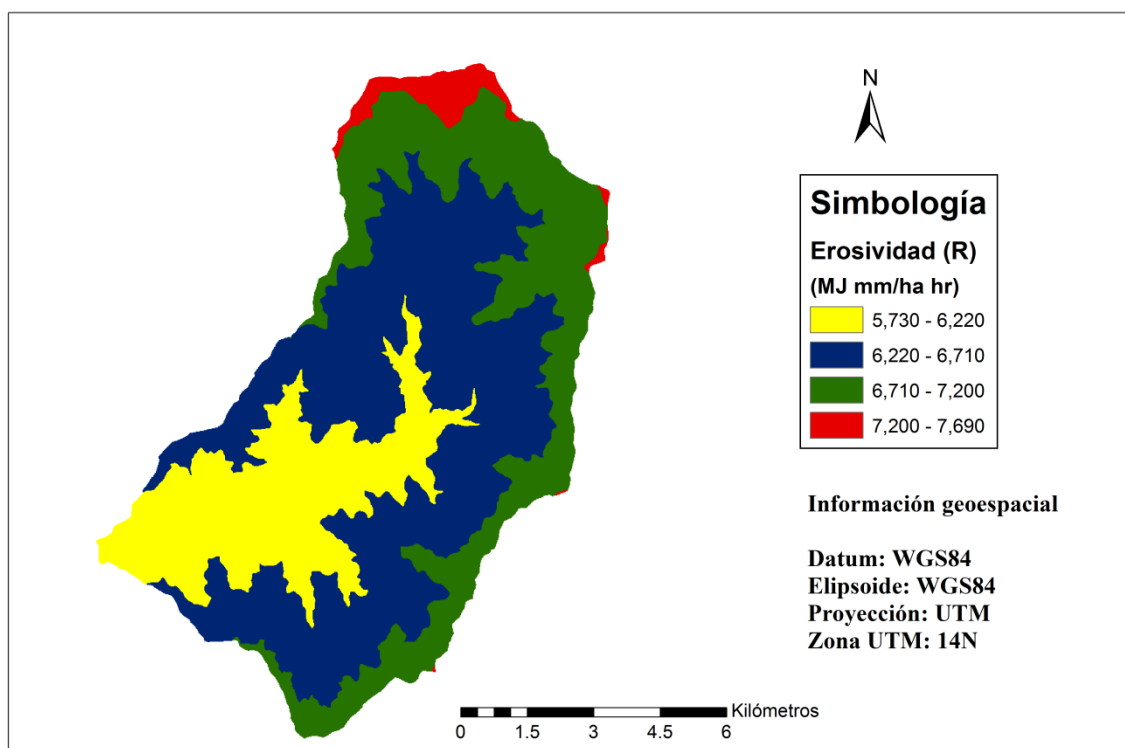


Figura 22. Índice de erosividad de la lluvia (Factor R)

Erosionabilidad de la lluvia (Factor K)

En la microcuenca existen dos tipos de suelo de acuerdo al mapa de edafología: Litosol de textura media (306.25 ha, 3.34 % de la superficie de la microcuenca) y Regosol de textura gruesa (8870.16 ha, 96.66 % de la superficie total). Los valores de K (Figura 23) fueron 0.2 para el Litosol y 0.026 para el Regosol.

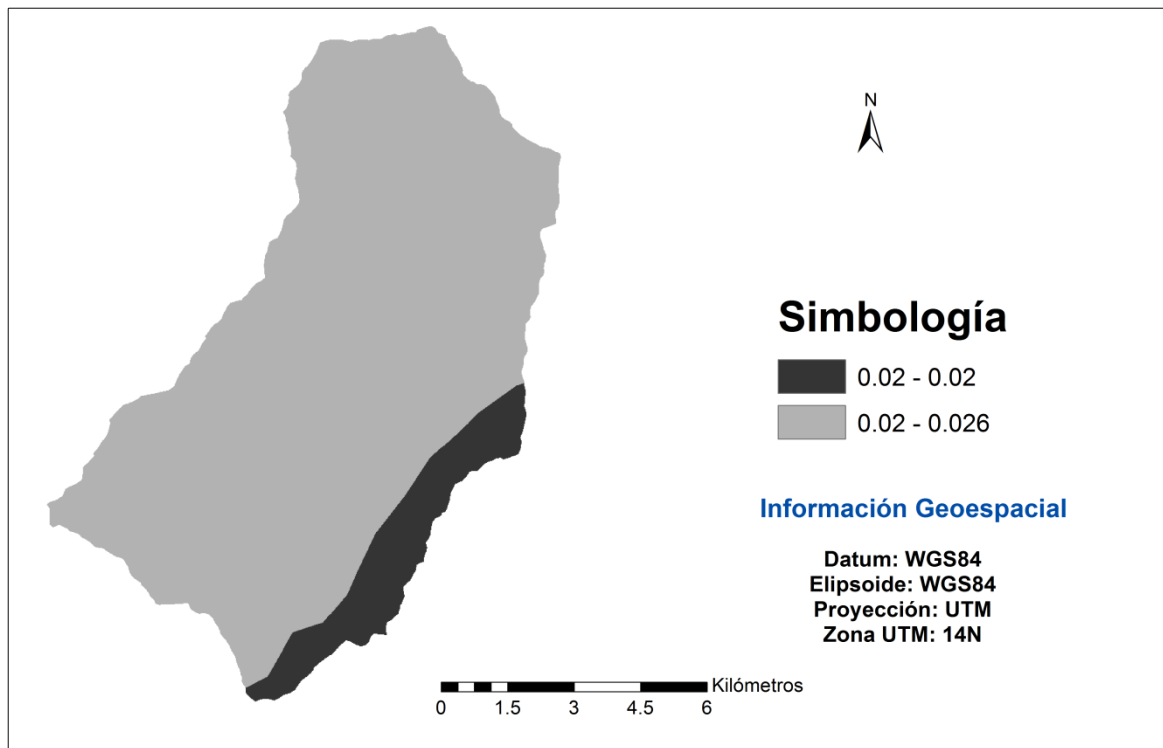


Figura 23. Índice de erosionabilidad (Factor K)

Factor LS

La mayoría del área tuvo un valor de LS en el rango de 0.030 a 9.79, lo cual representa la pérdida de suelo por erosión hídrica; considerando los efectos que tiene la longitud y las pendientes presentes de la microcuenca, por otra parte los rangos obtenidos indican la presencia de espacios suavemente ondulados y de terrenos escarpados, los valores más altos (9.79) ocurrieron en la zona de cabecera de la microcuenca y a lo largo del cauce principal y esto se debe a la ausencia de cobertura forestal, a la presencia de deslizamientos en masa pero sobre todo a la alta pendiente (Figura 24).

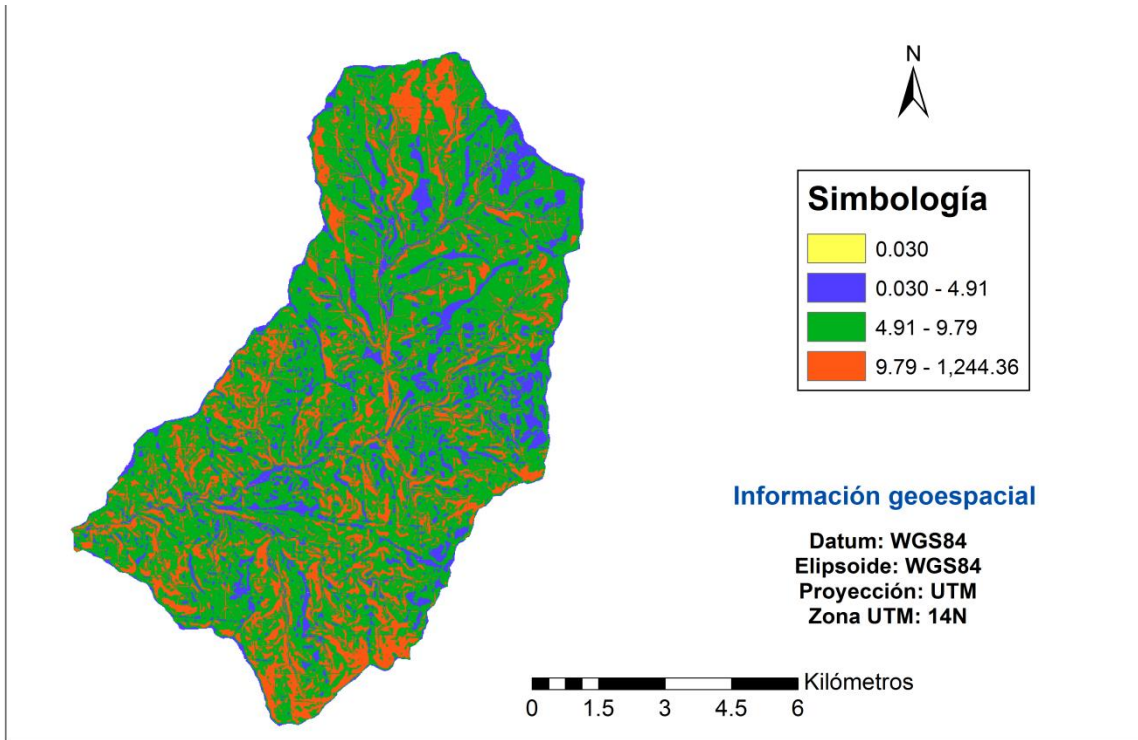


Figura 24. Valores del factor LS

Factor C (cobertura vegetal)

Se delimitaron seis usos de suelos dentro de la microcuenca. El bosque primario o bosque natural es el que mayor extensión territorial ocupa, con 4831.78 hectáreas, lo que representa el 53.01 % de la superficie de la microcuenca. Los derrumbes junto con los asentamientos humanos son los que menor superficie presentan, ya que entre los dos usos apenas cubren 4.64 hectáreas. Los valores de C variaron de 0.001 a 1 (Figura 25).

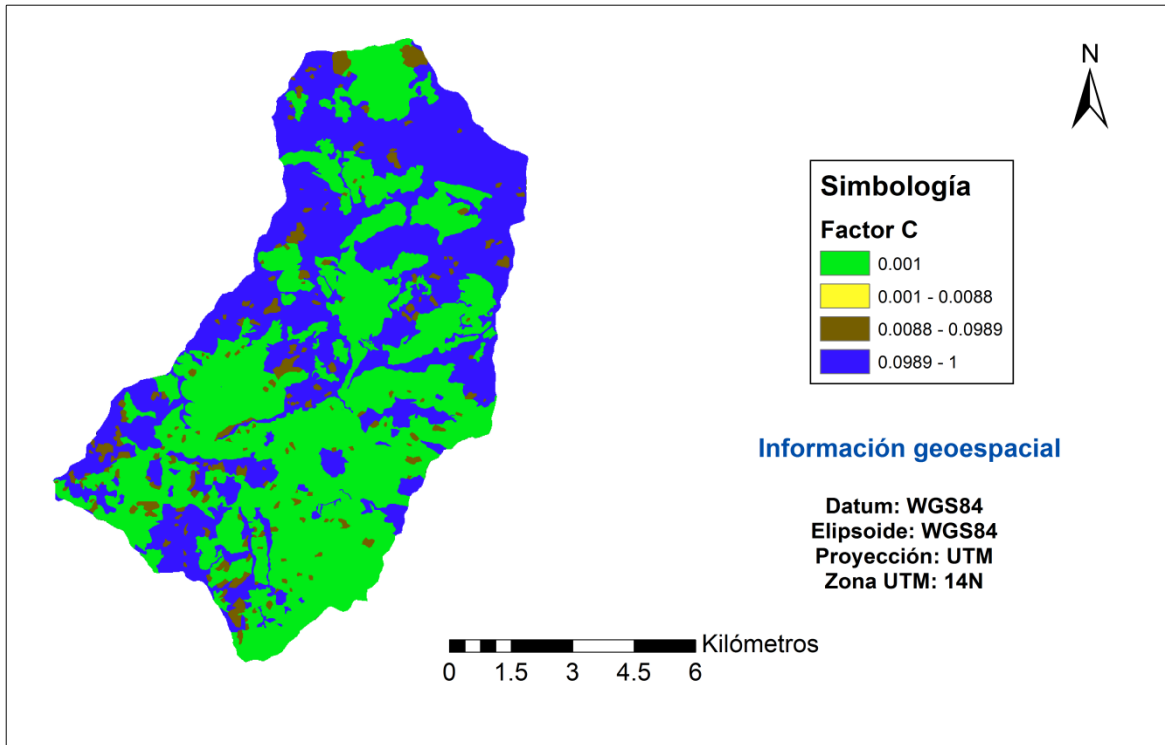


Figura 25. Valores del factor C

Factor P

Para la condición actual el valor de P fue de 1 para todos los usos de suelos. Los mapas de valores de P para los escenarios con prácticas de conservación de suelos se muestran en las Figuras 26, 27 y 28.

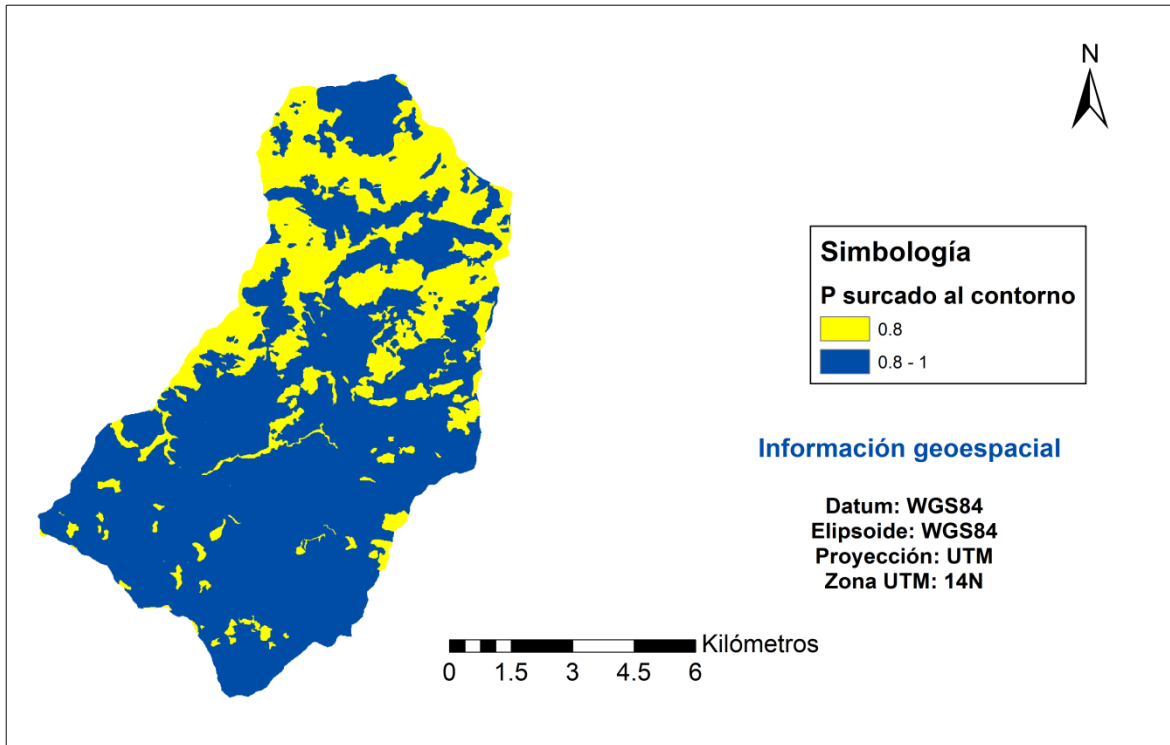


Figura 26. Factor P utilizando surcado al contorno

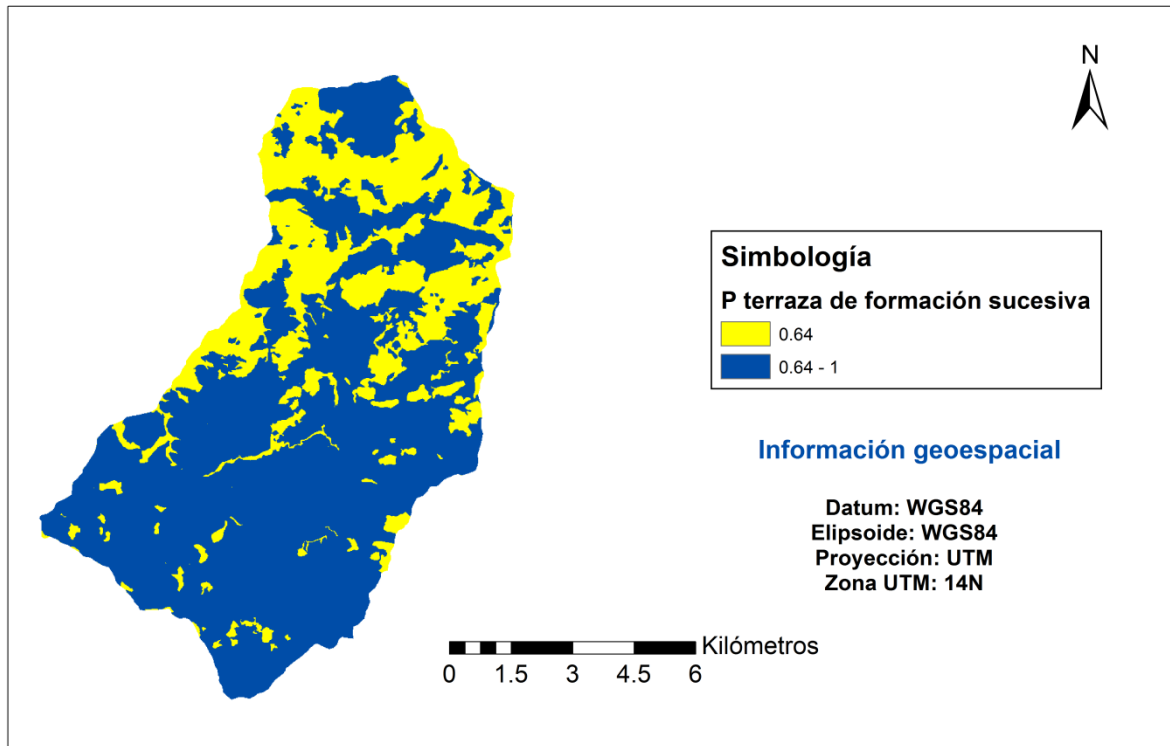


Figura 27, Factor P utilizando terrazas de formación sucesiva

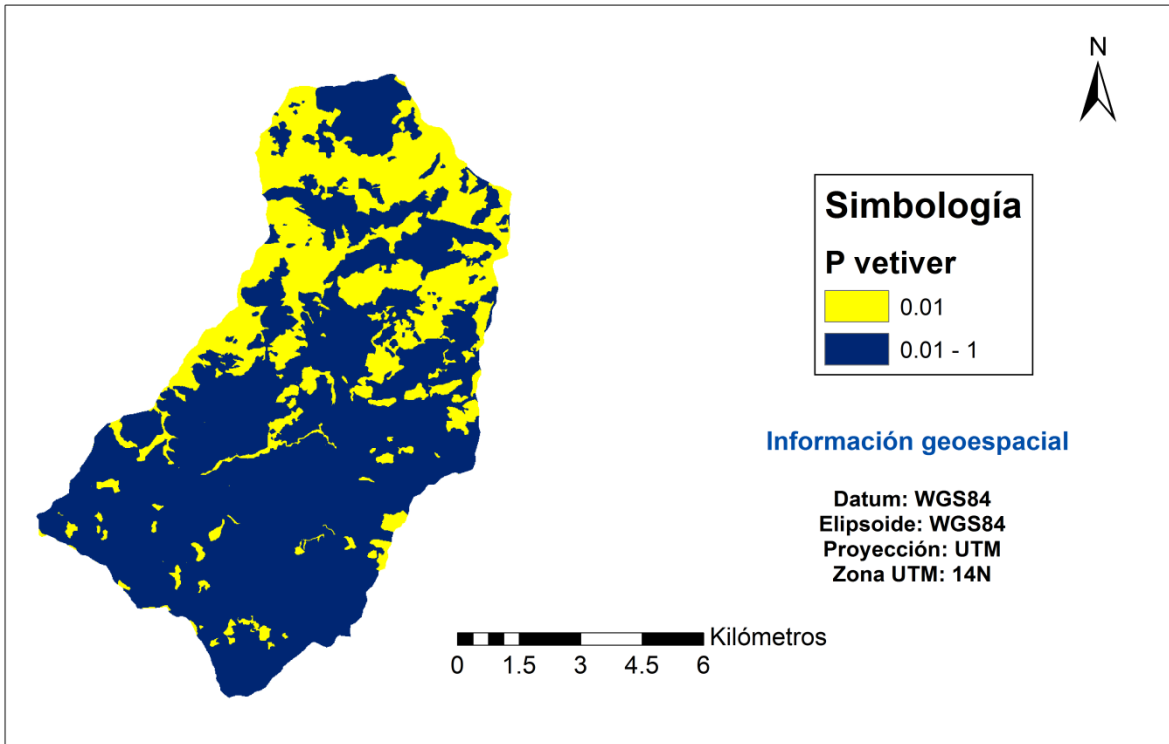


Figura 28. Factor P utilizando vetiver como barreras vivas

Erosión potencial (E)

La erosión potencial en la microcuenca es alta (Figura 29, Cuadro 18). La mayor parte de la superficie tiene una erosión potencial mayor de 299 ton/ha-año. Esto indica un alto riesgo a la erosión si la vegetación es removida o no se tienen prácticas de conservación de suelos adecuadas en las tierras agrícolas.

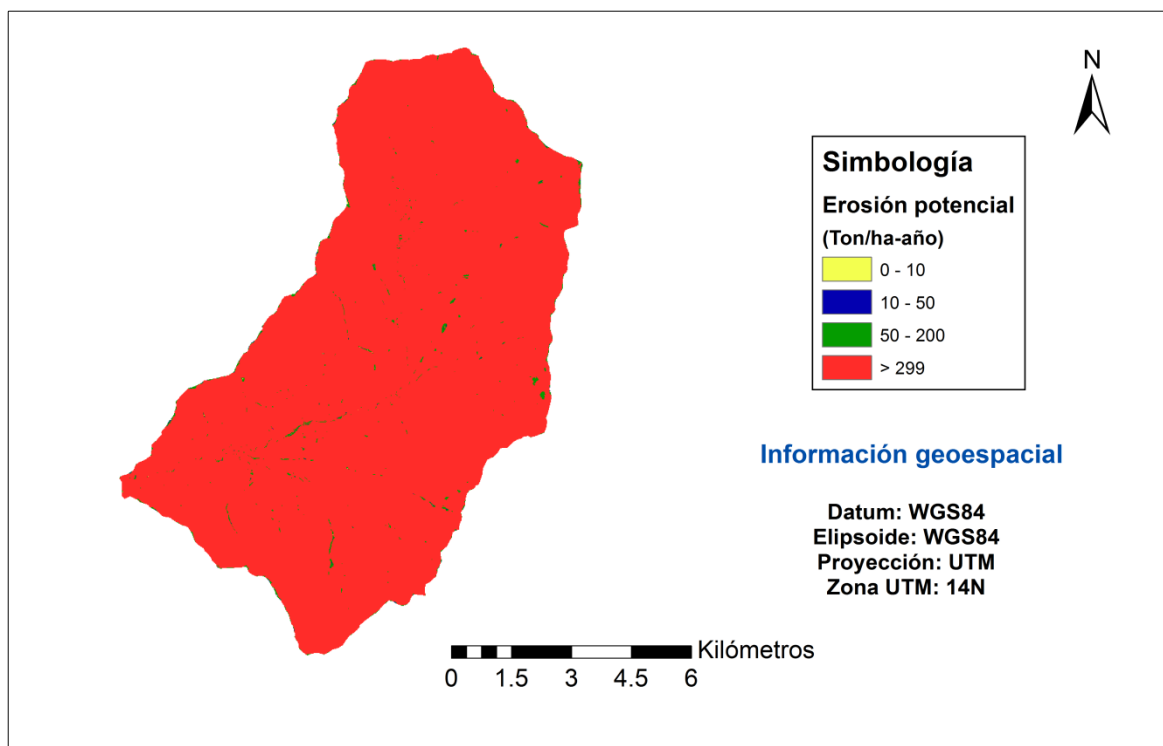


Figura 29. Erosión potencial de la microcuenca La Ciénega

Cuadro 18. Erosión potencial

Erosión potencial (Ton/ha-año)	Grado	Km ²	Ha	%
0 - 10	Ligera	0.010575	1.0575	0.01
10 - 50	Moderada	0.039825	3.9825	0.04
50 - 200	Fuerte	0.7029	70.29	0.77
> 200	Muy fuerte	91.006875	9100.6875	99.18

Erosión actual

La mayor parte de la superficie de la microcuenca tiene una erosión ligera (Figura 30; Cuadro 19). Esto se asocia a la presencia de bosques y otros tipos de vegetación en más de la mitad de la superficie de la microcuenca, estas zonas deben mantener la vegetación natural. Sin embargo, se presenta erosión muy fuerte en el 32% de la microcuenca; este aspecto se asocia a la actividad agrícola y zonas muy degradadas. Es una superficie importante en la que se debe promover prácticas de conservación de suelos

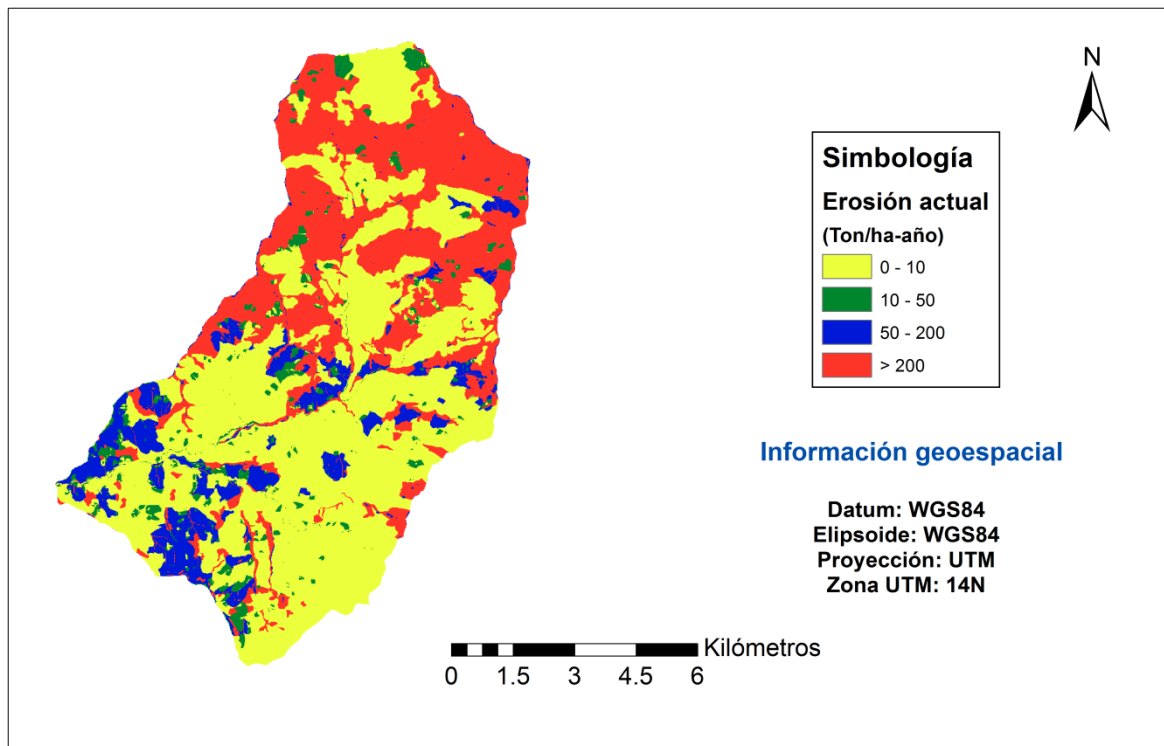


Figura 30. Erosión actual en la microcuenca

Cuadro 19. Erosión actual en la microcuenca la Ciénega

Erosión actual (Ton/ha-año)	Categoría	Km2	ha	%
0 - 10	Ligera	49.15395	4915.4	53.6
10 - 50	Moderada	4.244175	424.4	4.6
50 -200	Fuerte	8.991225	899.1	9.8
> 200	Muy fuerte	29.29635	2929.6	32.0

6.6 Propuestas de prácticas de conservación de suelos de la microcuenca

Surcado al contorno

La práctica de surcado al contorno, prevista como una práctica mecánica, tiene muy poco impacto en la reducción de la erosión (Figura 31, Cuadro 20).

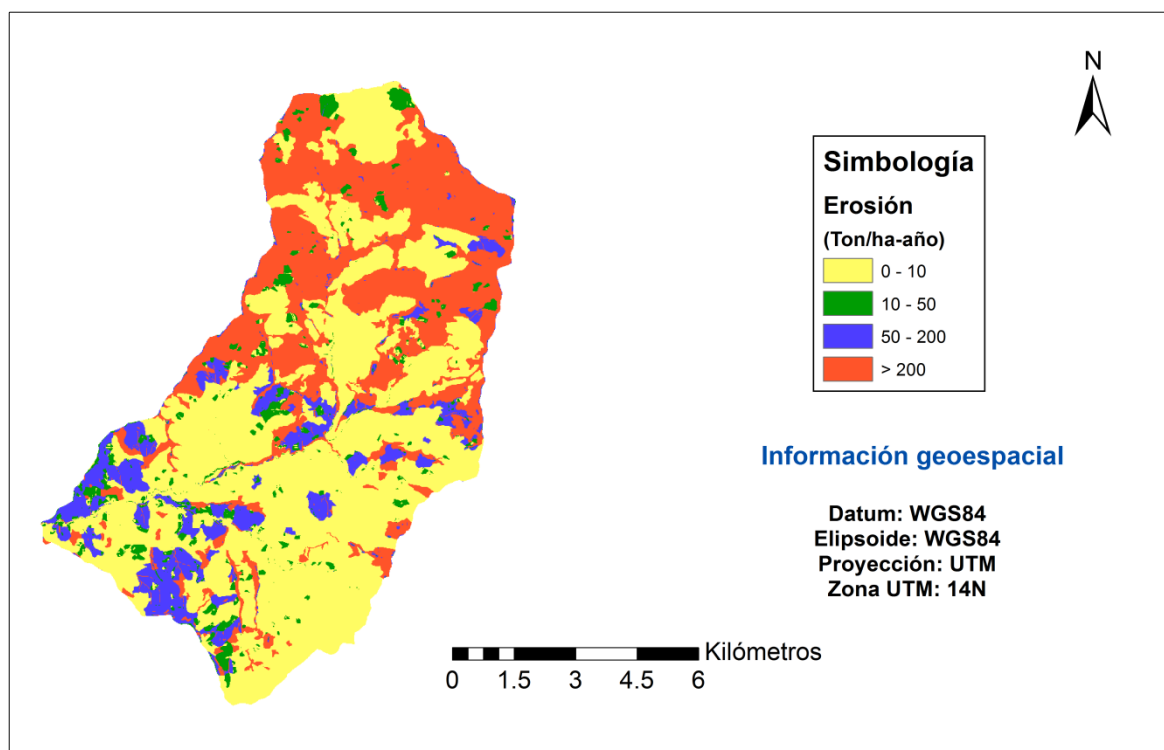


Figura 31. Erosión estimada al utilizar surcado al contorno

Cuadro 20. Erosión estimada al utilizar surcado al contorno

Erosión	Nivel	Km ²	ha	%
0 - 10	Ligera	49.15395	4915.4	53.6
10 - 50	Moderada	4.272075	427.2	4.7
50 - 200	Fuerte	9.115425	911.5	9.9
> 200	Muy fuerte	29.144475	2914.4	31.8

Terraza en contorno

Las terrazas de formación sucesiva tampoco son una opción tecnológica para el control de la erosión en las tierras agrícolas de la microcuenca. La incidencia en la tasa de erosión de las zonas con erosión actual fuerte y muy fuerte es pequeña (Figura 32; Cuadro 21).

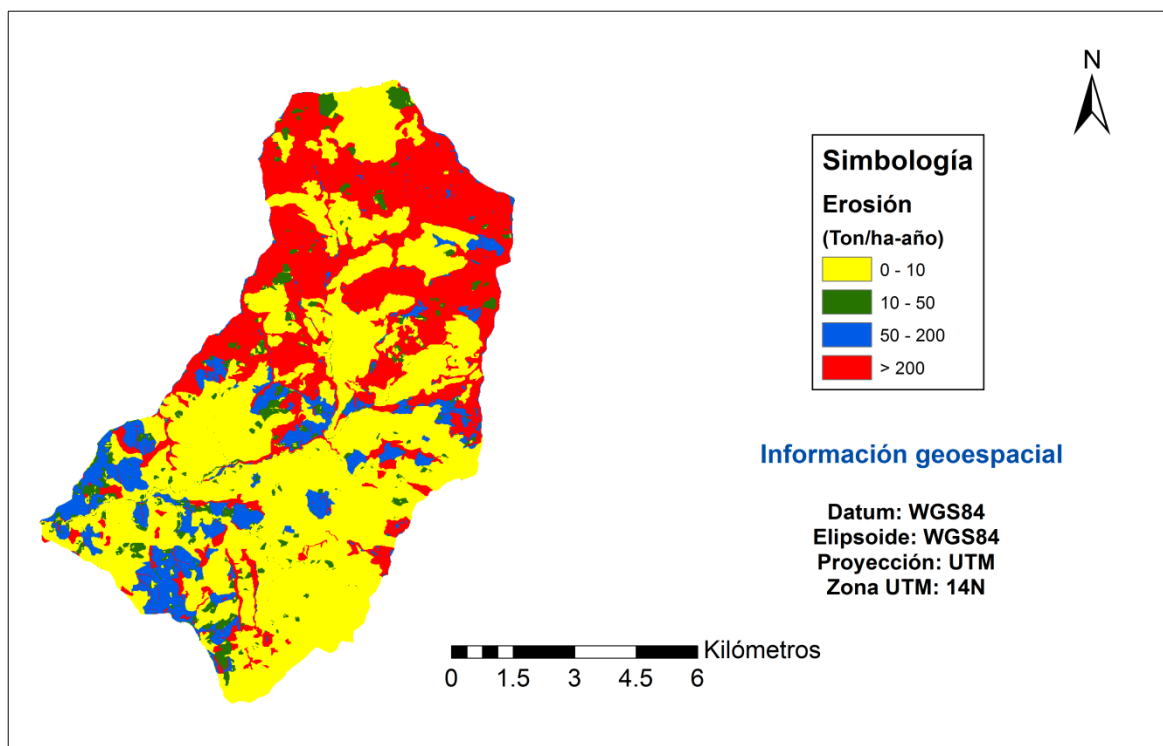


Figura 32. Erosión estimada con terrazas en contorno

Cuadro 21. Erosión estimada al implementar terrazas en contorno

Erosión	Grado	Km2	ha	%
0 - 10	Ligera	49.15395	4915.4	53.6
10 - 50	Moderada	4.31145	431.1	4.7
50 - 200	Fuerte	9.355725	935.6	10.2
> 200	Muy fuerte	28.864575	2886.5	31.5

Barreras vivas con vetiver

Los resultados estiman que con barreras vivas de vetiver reducirían de manera significativa la erosión en las tierras agrícolas con erosión actual fuerte y muy fuerte (Figura 33: Cuadro 22). El vetiver (Figura 34 y Figura 35) es una planta que se adapta a una diversidad de condiciones ambientales, por su tipo de crecimiento no compete con los cultivos y no se convierte en maleza (National Research Council, 1993). Esto hace prever que puede ser aceptada por los productores rurales de la microcuenca.

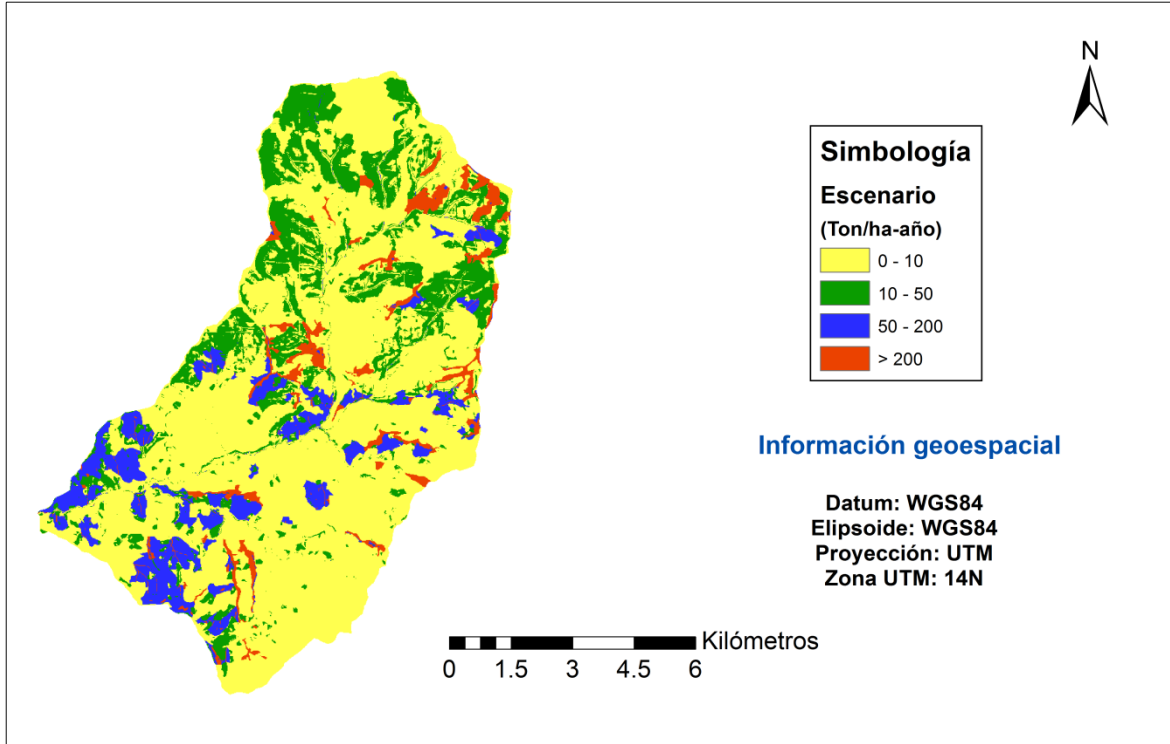


Figura 33. Erosión utilizando barreras vivas con vetiver



Figura 34. Planta de vetiver en maceta para reproducción



Figura 35. Barrera viva con vetiver en el área de la microcuenca

Cuadro 22. Erosión estimada con terrazas vivas con vetiver

Erosión (Ton/ha-año)	Grado	Km²	ha	%
0 - 10	Ligera	60.83145	6083.1	66.3
10 - 50	Moderada	17.727525	1772.8	19.3
50 - 200	Fuerte	8.665875	866.6	9.5
> 200	Muy fuerte	4.461075	446.1	4.9

Comparación de la superficie de cambio

Se puede apreciar claramente como de los tres escenarios de manejo, el escenario integrado por las barreras vivas con vetiver es el que mayores resultados arroja en cuanto a la disminución de la tasa de erosión (Cuadro 23; Figura 36).

Cuadro 23. Comparación de la superficie de cambio entre la erosión actual, los surcos en contorno, las terrazas en contorno y las barreras vivas con vetiver

Categoría	Erosión actual		Surcos en contorno		Superficie de cambio		Terrazas en contorno		Superficie de cambio		Barreras vivas con vetiver		Superficie de cambio	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	Ha	%	Ha	%
Ligera	4915.4	54	4915.4	53.6	0	0	4915.4	53.6	0	0	6083.1	66.3	1167.7	12.7
moderada	424.4	4.6	427.2	4.7	2.8	0.1	431.1	4.7	6.7	0.1	1772.8	19.3	1348.4	14.7
fuerte	899.1	9.8	911.5	9.9	12.4	0.1	935.6	10.2	36.5	0.4	866.6	9.5	32.5	0.3
muy fuerte	2929.6	32	2914.4	31.8	-15.2	0.2	2886.5	31.5	43.1	0.5	446.1	4.9	2483.5	27.1
Total	9168.5	100	9168.5	100	0	0.4	9168.6	100	86.3	1	9168.6	100	5032.1	54.8

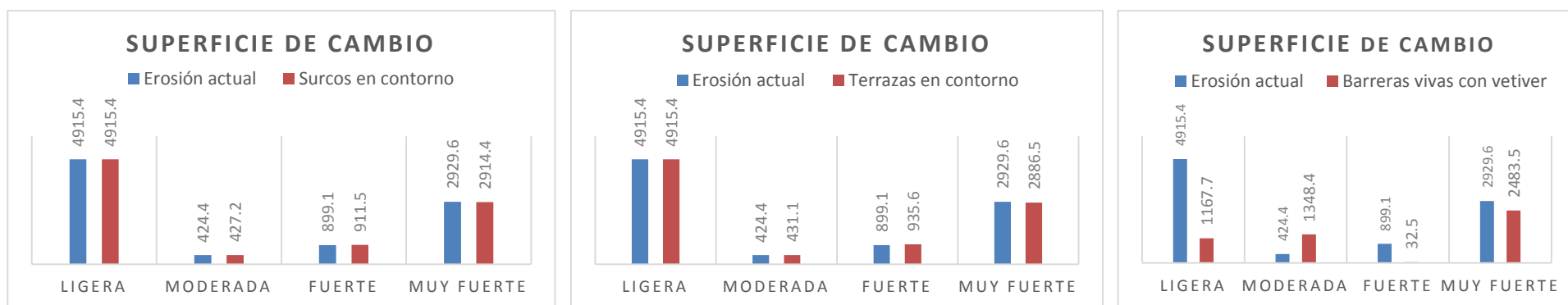


Figura 36. Comparación de la superficie de cambio entre la erosión actual, los surcos en contorno, las terrazas en contorno y las barreras vivas con vetiver

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

La microcuenca La Ciénega es de tipo montañosa y a pesar de ser una cuenca pequeña es un espacio vulnerable a procesos de erosión laminar e hídrica, ya que presenta un relieve fuertemente accidentado (23.9 % de pendiente media). Esta vulnerabilidad se asocia también a su forma achatada, a la cantidad de los ríos (147), a la baja relación de bifurcación (1.79), a la moderada densidad de drenaje, a la larga longitud del cauce principal y a una pendiente del 11.48 %.

El volumen medio que escurre en la microcuenca es de 102.96 millones de m³ y el escurrimiento máximo instantáneo es de 1 553.3 m³/s, considerando un periodo de retorno de 5 años, lo que indica condiciones de vulnerabilidad a movimientos en masa e inundaciones de las partes bajas.

La erosión potencial en la microcuenca es alta, ya que la mayor parte de la superficie presenta una erosión potencial mayor de 299 ton/ha-año.

La erosión actual en casi la mitad de la superficie de la microcuenca (53.6%) es ligera, debido a la presencia de bosque primario. Mientras que la erosión muy fuerte (32% de la superficie de la microcuenca) se asocia a actividades agrícolas y áreas degradadas.

Finalmente, dentro de las propuestas planteadas en la presente investigación como una forma de mitigar o de frenar el efecto erosivo dentro de las áreas agrícolas de la microcuenca, se establecen tres escenarios de manejo, el primero con surcado al contorno, el segundo con terrazas en contorno y el tercero con el establecimiento de barreras vivas con vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Por ello, dentro de los escenarios generados el que mayor impacto producirá en la reducción de la erosión hídrica actual en las áreas agrícolas y degradadas será el establecimiento de barreras

vivas con vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ya que se comprobó una reducción del 27.1 % de la erosión en la categoría muy fuerte a moderada y ligera.

7.2. Recomendaciones

Dentro de las áreas de cultivo, además de implementar las barreras vivas con pasto vetiver, se propone evaluar el establecimiento de cultivos anuales y plantas perennes leñosas (sistemas agroforestales).

Se sugiere socializar la información generada en la presente investigación con las autoridades agrarias de Mainaltepec. Esto puede contribuir al diseño y la ejecución de un plan de manejo para el aprovechamiento sustentable del bosque primario. Dentro de las estrategias prioritarias de manejo sustentable de la vegetación primaria, pueden desarrollarse proyectos de servicios ambientales, tales como recarga de los manantiales, refugio de la fauna silvestre y regulación de la temperatura. También, puede ser viable el aprovechamiento de madera a baja intensidad a escala local con un plan de manejo forestal que considere controlar los procesos de erosión laminar e hídrica dentro de la microcuenca.

En la zona de cabecera de la microcuenca existen cárcavas superiores a los 50 cm de profundidad. En estas zonas se propone el diseño e implementación de presas de gaviones.

Se requieren programas de reforestación con especies nativas en las zonas desprovistas de cobertura forestal. Deben priorizarse las zonas de recarga hídrica de la microcuenca.

En las de pastizales hay erosión laminar y degradación de los suelos. Para su control se requiere diseñar obras de conservación de suelos y de manejo de la vegetación.

CAPÍTULO VIII. LITERATURA CITADA

Aguilar, A. (2004). *Geografía general*. Pearson Educación. México. 306 p.

Anaya, O. (2012). *Caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica Chinchao, Distrito de Chinchao, provincia Huanuco, Region Huanuco*. Enero 12, 2016, de Universidad Nacional Agraria de la Selva Sitio web: http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/CARACTERIZACION%20MORFOMETRICA%20DE%20LA%20CUENCA%20HIDROGRAFICA%20CHINCHAO,%20DISTRITO%20DE%20CHINCHAO,%20PROVINCIA%20DE%20HUANUCO,.pdf

Andrade, M. (1996). *El planteamiento andino comunitario, guía para su formulación*. 3ra. Edición. Quito Ecuador. INEFAN/FAO/Gobierno Países Bajos.

ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. (2014). ASTGTM2_N17W099_dem. Recuperado de <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

Banco Mundial. (1992). *Informe sobre el Desarrollo Mundial 1992. Ambiente y Desarrollo. Indicadores del desarrollo mundial*. Washington, D.C. 316 p.

Barkin, D. y T. King. (1986). *Desarrollo económico regional (enfoque de cuencas hidrológicas de México)*. 5a. ed. Siglo Veintiuno Editores. México. 267 p.

Becerra, A. (1999). *Escorrentía, erosión y conservación de suelos*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 376 p.

Breña, A. F. y Jacobo, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Tlalpan, D.F. México: UAM. 287 p.

- Brooks, K. N., P.F. Ffolliott, H.M. Gregersen y L.F. DeBano. (1997). *Hydrology and the management of watersheds*. 2a. ed. Iowa State University Press. Ames, Iowa. 502 p.
- Bueno-Hurtado, P., M.A. Velázquez-Valle, A. López-Santos, I. Sánchez-Cohen y J.L. González-Barrios. (2015). *Implementation of a model to estimate water erosion with distributed parameters applied to watersheds*. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, 15(1): 47-54. doi: 10.5154/r.rchsza.2015.08.012.
- Bustamante, A. (2006). *La Gestión del agua en cuencas*. En: Ocampo, F.I., J.F. Escobedo C. y B. Ramírez V, El agua un recursos en crisis. Colegio de Postgraduados. Puebla, México. pp. 140-156.
- Bustamante, A., M.A. Tornero, G. Cruz y E. Sandoval. (2002). *Investigación experimental agropecuaria con enfoque de cuencas*. En: Aragón, G.A., J.F. López-Olguín y M Tornero C. (Eds.). Métodos para la generación de tecnología agrícola de punta. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México. pp. 1 – 14.
- Cambell, J.L., C.T. Driscoll, C.E. Eagar, G.E. Likens, T.G. Siccama, C.E. Johnson, T.J. Fahey, S.P. Hamburg, R.T. Holmes, A.S. Donald y C. Buso. (2007). *Long-term Trends from Ecosystem Research at the Hubbard Brook Experimental Forest*. Gen. Tech. Rep. NRS-17. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 41 p.
- Campos, A. (1998). *Proceso del ciclo hidrológico*. 3a. Reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. 550 p.
- CNA. (2016). *Estaciones climatológicas*. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>.

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales*. México. pp. 17 – 20.
- Committee on U.S. Geological Survey (USGS) Water Resources Research. (1997). *Watershed Research in the U.S. Geological Survey*. National Academy Press, Washington, D.C. 86 p.
- CONABIO. (1998). *Subcuencas hidrológicas*. Catálogo de metadatos geográficos. Recuperado de: C:\2.Cartografía_simplificada\CONABIO-DESC...20-03-2014\Subcuencas hidrológicas1\subcu1mcw.html.
- CONAGUA. (2015). *Estadísticas del Agua en México, edición 2015*. Comisión Nacional del Agua. México. 295 p.
- Cortés T., H.G. (1991). *Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos. México. 168 pp.
- Cotler, H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. México, D.F. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Instituto Nacional de Ecología. 347 p.
- Delgadillo, A. y G. Paez. (2008). *Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgos por crecidas*. En: Ferrer, C. y Duarte (editores). Plan de desarrollo urbano del municipio de Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del valle de Mocotíes. Mérida. PNUD – Fundación para Prevenir los Riesgos del Estado de Mérida (FUNDAPRIS).

Díaz-Rivera, J.R., D. Pérez Costa, Y. Rodríguez-Álvarez y J.M. Febles-González. (2008). *Determinación de índices de erosión de suelos aplicando análisis SIG para la localidad de San Andrés en la provincia de Pinar del Río*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 14(1): 15-21.

Docampo, L., B.G. de Bikuña, E. Rico y A. Rallo. (1989). *Morfometría de las cuencas de la red hidrográfica de Bizkaia* (País Vasco, España). Limnética 5: 51-67.

Dourojeanni, A. (2002). *Políticas públicas para el desarrollo sustentable: La gestión integral de cuencas*. LC/R 1399. CEPAL. 231 p.

FAO. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos*. Roma, Italia. 86 p

FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Estudio y planificación de cuencas hidrográficas*. Recuperado de <http://books.google.com.mx/books?id=fC6zUFx512EC&pg=PA3&lpg=PA3&dq=sinonimos+de+cuenca+hidrografica&source=bl&ots=ZCOjq1PoTx&sig=tdXoLbOVyP78Cf77jKlxT5S8PLw&hl=es&sa=X&ei=uJEVVNXeA6eF8gGd7YGIBg&sqi=2&ved=0CFUQ6AEwBw#v=onepage&q=sinonimos%20de%20cuenca%20hidrografica&f=false>.

FAO/UNESCO. (1976). *Mapa mundial de suelos 1:500000*. Vol III. México y América Central.

Figuroa S., B, A. Amante, H.G. Cortés, J. Pimentel, E.S. Osuna. J.M. Rodríguez y F.J. Morales. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Postgraduados, Montecillo Estado de México. México. 150 p.

FIRCO. (2009). *Guía técnica para la elaboración de planes rectores de producción y conservación (PRPC)*. México. FIRCO. 163 p.

Flores, E. (2013). *En Guerrero: "Las enfermedades, no el río, nos van a matar"*. Revista Proceso, 25 de septiembre de 2013. Recuperado de <http://www.proceso.com.mx/353758/en-guerrero-las-enfermedades-no-el-rio-nos-van-a-matar>.

García-Oliva, F., J.M. Mass, V.J. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. (2006). *El enfoque ecosistémico y su aplicación en problemas de manejo y restauración ecológica: el caso de la selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco*. En: Oyama, K. y A. Castillo (Coords.) Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México. Siglo XXI Editores. pp. 111 – 126.

Geoconda, Y., G. Siles, W. Velásquez y A. Alberto. (2012). *Cuencas y procesos hidrológicos*. De Uní-Norte Ruacs. Abril 26, 2012. Recuperado de <https://docs.google.com/document/d/1QAASe9yLs8hkDMRsE7qwHWLRD91ZA70Jzqn8v4UceD0/edit>.

Global Water Partnership. (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*. Recuperado de [http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/A%20Handbook%20for%20Integrated%20Water%20Resources%20Management%20in%20Basins%20\(INBO,%20GWP,%202009\)%20SPANISH.pdf](http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/A%20Handbook%20for%20Integrated%20Water%20Resources%20Management%20in%20Basins%20(INBO,%20GWP,%202009)%20SPANISH.pdf).

Guerra, F. y J. González. (2002). *Caracterización morfométrica de la cuenca de la Quebrada la Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela*. Geoenseñanza 7: 88-108.

Herrera, M, I. (2006). *Estudio geomorfométrico para el desarrollo de la microcuenca "Tejamanil" del municipio de Gral. Heliodoro Castillo, Guerrero, Méx.* Tesis para optar el grado de Biólogo. Universidad Autónoma de Guerrero. Chilpancingo de los Bravos, México.

- Horton, R.E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geological Society of America Bulletin. V. Recuperado de http://www.geos.ed.ac.uk/homes/s0451705/horton_1945.pdf.
- INE. (2007). *Indicadores Socioeconómicos de las Cuencas Hidrográficas de México como insumo para el Diagnóstico Ambiental*. Enero 12, 2016, INE Sitio web: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/inf_2007_indi_socioeconomicos.pdf.
- INE. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional pico de tancítaro*. Enero 08, 2016, de Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf.
- INEGI. (2007). *Conjuntos de datos vectoriales edafológico escala 1:250 000, serie II*.
- INEGI. (2008). *Guía para la interpretación de cartografía de edafología*. México. INEGI. pp 28.
- INEGI. (2009a). *Guía para la interpretación de cartografía climatológica*. México. INEGI. pp 28.
- INEGI. (2009b). *Guía para la interpretación de cartografía geológica*. México. INEGI.
- INEGI. (2013). *Conjuntos de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000, serie III*.
- INEGI. (2013). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V, capa unión*. Recuperado de file:///C:/2.Cartografía_simplificada/1.-

Vectores%20guerrero/usosv250000_v/GUERRERO_USV_serie%20V/uso%20de%20suelo_serie%20V/capa_union.html

INEGI. (2016). *Continúo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>.

INEGI, INE y CONAGUA. (2007). *Mapa de Cuencas Hidrográficas de México, 2007. Escala 1:250000*, elaborada por Priego A.G., E. Isunza, N. Luna y J.L. Pérez. México, D.F.

Jardi, M. (1985). *Forma de una cuenca de drenaje*. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía XIX*: 41-68.

Jønch-Clausen, T y J. Fugl. (2001). *Firming up the conceptual basis of integrated water resources management*. *Water Resources Development 17(4)*: 501–510.

Ley de Aguas Nacionales. (2014). Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992 TEXTO VIGENTE Última reforma publicada DOF 11-08-2014. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_110814.pdf

Linsley, R., M. Kohler y J. Paulhus. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Mc Graw – Hill. New York. p. 386.

Martínez, M., D. Fernández, y R. Salas. (2012). *Hidrología aplicada a pequeñas obras hidráulicas*. Recuperado de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%C3%8DA.pdf

- Miller, B.A.y R.B. Reidinger. (1998). *Comprehiensive river basin developiment he Tennessee Valley Authority*. World Bank Technical Paper No. 416. Washington, D.C. 86 p.
- Monsalve, G.S. (1998): *Hidrología en la ingeniería*. 2da edición. Alfaomega, Bogotá, Colombia. 358 p.
- Morgan, R.P.C. (1996). *Soil erosion and conservation*. Longman, New York. 198 p.
- National Research Council. (1993). *Vetiver grass: a thing green line against erosion*. National Academy Press. Washington, D.C. 171 p.
- ONU. (1992). *Programa 21. Capítulo 13, sección II*. pp. 25-26. Recuperado de: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1718a21_summary_spanish.pdf.
- Pastrana, O.V. (2014). *Determinación de la erosión hídrica potencial y actual a través de los sistemas de información geográfica*. Tesis Ingeniero Agrónomo Especialista en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.114 p.
- Proyecto Tacaná (2009). *Guía para la elaboración de planes de manejo de microcuencas. Basada en la sistematización de la experiencia del proyecto Tacaná desarrollada en San Marcos*. Guatemala. Policolor, Guatemala, Guatemala.
- Racca J.M.G.. (2007). *Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno*. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 77: 31-38.
- Ríos, J.R. (2006). *El pasado y presente de la Comisión del Papaloapan: historia de un archivo vivo*. Boletín del Archivo Histórico del Agua 11(33): 48 – 52.

Rivera-Toral, F., S. Pérez-Nieto, L.A. Ibañez-Castillo y F.R. Hernández-Saucedo. (2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia* 46: 101-105.

Romero, A. Y F. López. (1987). *Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir*. 2016, de Departamento de geografía física. Universidad de Murcia Sitio web: <file:///C:/Users/javier/Downloads/Dialnet-MorfometriaDeRedesFluviales-105414.pdf>.

Ruiz, J. (2001). *Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación*. UNELLEZ. Barinas – Venezuela. p. 298.

Ruiz, J. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Recuperado de: http://www.inifapcirpac.gob.mx/publicaciones_nuevas/Requerimientos%20Agroec%20de%20Cultivos%20da%20Edici%F3n.pdf.

SARH. (1977). *Manual de conservación de suelo y agua*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. p. 584.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT). (s/f). *Isoyetas de intensidad de lluvia (mm/hr) para el estado de Guerrero*. Recuperado de <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/guerrero.pdf>

SEMARNAT y CONAGUA. (2010). *Informe de la 16ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP 16*. México.

- Semanario La Región. (2013). *De los fracasos de la extinta comisión del Papaloapan*.
En línea: <http://www.laregionsemanario.com/2013/09/de-los-fracasos-de-la-extinta-comision.html>
- SEMARNAT y UACH. (2002). *Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana*, Escala 1:1 000 000.
- Shapira, Y. (1973). *Comisiones de desarrollo regional: la Comisión del Fuerte*.
Dualismo 2(1): 139-175
- Strahler, A. (1946). *Geomorphic terminology and classification of land masses*, *Journal of Geology*, 54, 32-42.
- Strahler, A. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*, *Amer. Geophys. Union Trans.*, Vol. 38, pp. 913-920. Recuperado de <http://www.uvm.edu/pdodds/files/papers/others/1957/strahler1957a.pdf>
- Strahler, A.N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks*, In: V. T. Chow, Ed., *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill Book Company, New York, 1964. pp. 4-39 – 4-76.
- Summerfield, M. A. (1991). *Global geomorphology*. Editorial Longman Scientific and Technical. New York, U.S. 536 p.
- U.S. Forest Service. (1995). *Ecosystem analysis at the watershed scale*. Regional Ecosystem Office, Portland, Oregon, U.S. 26 p.
- Viramontes, O. O., L.F. Escoboza, A.C. Pinedo, A.A. Pinedo, G.V.M. Reyes, C.J.A. Román y M.A. Pérez. (2007). *Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua*. *TECNOCENCIA Chihuahua* 1(3): 23–25.

Wanielista, M., R. Kersten y R. Eaglin. (1997). *Hydrology: water quantity and quality control*. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. United States. 567 p.

Ward, A.D. y W.J. Elliot (1995). *Environmental Hydrology*. CRC/Lewis. Boca Raton. FL.

Wischmeier, W. H. y Smith D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-A. guide to conservation planning*. USDA Handbook no. 537. 58 p.

Zury, W. (2011). *Manual de planificación y gestión participativa de cuencas y microcuencas*. Enero 09, 2016, de FAO Sitio web: http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Documentos_complementarios_2011/ManualPlanificacion_y_Gestion_Participativa_de_cuencas_W_%20Zury_2009/Cap_1_2_3.pdf.