



IDENTIFICACIÓN DE ACCIONES DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO FORESTAL EN CUENCAS

PROYECTO INTERNO RD-0805.1

INFORME FINAL

Subcoordinación de Conservación de Cuencas y Tecnología Forestal
COORDINACIÓN DE TECNOLOGÍA DE RIEGO Y DRENAJE

Autores: M.Sc. Raúl Medina Mendoza
M.I. Werner Wruck Spilleckeo
MPD. Alfredo Gómez Garzón
MI. Pedro Rivera Ruíz
M.C. Héctor Cortés Torres

MÉXICO, 2008

CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	6
2 OBJETIVOS	7
3 METODOLOGÍA	7
4 RESULTADOS	8
4.1 Delimitación y subdivisión del Río Huixtla	8
4.2 Descripción física de la cuenca Arroyo Agua Fría	8
4.2.1 Ubicación:	8
4.2.2 Ubicación hidrológica.....	9
4.2.3 Ubicación geográfica	9
4.3 Fisiografía y geología	9
4.4 Topografía	10
4.5 Hidrología	10
4.6 Clima	11
4.7 Suelo	12
4.8 Vegetación	13
4.9 Uso de suelo y Vegetación	13
4.10 Caracterización hidrológica y morfométrica	15
4.11 Parámetros relacionados al área y longitud de la cuenca	15
4.12 Parámetros relacionados a la forma de la cuenca	17
4.13 Parámetros relacionados a la topografía (relieve y altitud)	18
4.14 Parámetros relativos a la red hidrográfica	22
4.14.1 Número de Curva	25
4.14.2 Cálculo del Escurrimiento (Q)	26
4.14.3 Cálculo del escurrimiento máximo por métodos empíricos.....	26
4.14.4 Estimación de la tasa de erosión	28
4.14.5 Factor (R): Erosividad de la lluvia	28
4.14.6 Factor (K) Erosionabilidad del suelo	29
4.14.7 Factor (L) (S) Longitud de pendiente y pendiente.....	29
4.14.8 Factor (C) (P): Cubierta vegetal y práctica de Conservación del suelo	32
4.15 Erosión total	33
4.16 Estimación de la producción de azolves	34
4.17 Identificación de acciones de Restauración Hidrológico Forestal para el control de la erosión y del caudal:	35

4.17.1	El uso de suelo recomendado.....	35
4.17.2	Agroforestería: Cultivo de callejones.....	36
4.17.3	Café con árboles y / o fruticultura.....	37
4.17.4	Reforestación, incluyendo plantación de muros vivos:	37
4.17.5	Manejo integral de áreas desprovistas de vegetación, como son cárcavas y áreas con deslizamientos	38
4.17.6	Manejo integral de cárcavas	38
4.17.7	Manejo del área de corte de los deslizamientos	39
4.17.8	Manejo del área de relleno.....	40
4.18	Cambios de la erosión y producción de azolves que salen de la cuenca, con la propuesta de cambio de uso de suelo.....	41
4.19	Obras en cauces	42
4.20	Selección de obras	45
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
6	BIBLIOGRAFÍA.....	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ubicación geográfica de los puntos extremos de la cuenca (BB) Agua Fría.....	9
Tabla 2.	Superficies de los grupos de pendientes	10
Tabla 3.	Microcuencas internas de la cuenca BB Arroyo Agua Fría, con sus respectivas superficies y tiempo de concentración.....	11
Tabla 4.	Datos de precipitación media en diferentes estaciones cercanas al área de estudio	11
Tabla 5.	Determinación de la textura y del factor K del suelo en la microcuenca (BB) Arroyo Frío	13
Tabla 6.	Uso de suelo en la subcuenca (BB) Arroyo Agua Fría, año 2008	14
Tabla 7.	Cálculo del volumen y altura media de la cuenca.....	18
Tabla 8.	Cálculo de las curvas hipsométricas	19
Tabla 9.	Distribución de los grupos de pendientes	20
Tabla 10.	Pendientes medias, cauces de las microcuencas internas de la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío	21
Tabla 11.	Alejamiento en las microcuencas internas de la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría	23
Tabla 12.	Tiempo de concentración, en horas; según Kirpich para la cuenca BB y 7 microcuencas internas	24
Tabla 13.	Orden según Horton y Strahler de los cauces en la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío	25
Tabla 14.	Número de curva, según grupo hidrológico del suelo, el uso de suelo 2008, y el uso de suelo recomendado, (condición media / condición húmeda).....	25
Tabla 15.	Texturas y valores de K en los suelos de la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría	29
Tabla 16.	Estimación de la longitud de la pendiente, según Williams y Berndt.....	30
Tabla 17.	Estimación del factor (LS) para la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría.....	32
Tabla 18.	Áreas con los diversos factores LS	32
Tabla 19.	Uso de suelo y el factor (C) en la cuenca (BB) Arroyo Frío	32
Tabla 20.	Tasas de erosión (en t ha ⁻¹ año ⁻¹) respectivas para el uso de suelo 2008	33
Tabla 21.	Tasa de erosión por hectárea y tasa de erosión total, situación actual 2008	34
Tabla 22.	Cambio de uso de suelo recomendado para la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría.....	35

Tabla 23. Uso de suelo recomendado de la cuenca BB Arroyo Agua Frío	35
Tabla 24. Actividades recomendadas, con sus superficies y costos asociadas	41
Tabla 25. Resultados de las tasas de erosión con el uso actual de suelo (2008), el uso recomendado y las diferencias	41
Tabla 26. La necesidad de obras transversales: distancia (d) y cantidad de obras (C) por cada microcuenca interna, con su superficie, longitud de cauces (Lc), longitud de cauces con pendientes inferiores a los 20 %, las pendientes medias de estos tramos ($j_{20\%}$), suponiendo una altura de obras de 3m, 4m y de 5 m.	44
Tabla 27. Estimación aproximadamente de volúmenes de represas y sus costos unitarios.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Influencia del área de una cuenca sobre el escurrimiento superficial	15
Figura 2. Efecto del tamaño de la cuenca sobre el tiempo de recorrido del escurrimiento superficial.....	16
Figura 3. Influencia de la longitud del cauce sobre el tiempo que tarda en llegar a la salida el escurrimiento superficial	16
Figura 4. Efecto de la forma de la cuenca sobre el escurrimiento: a) tiempo de recorrido; b) tiempo de acumulación de flujo	17
Figura 5. Curva hipsométrica	19
Figura 6. Ordenación de cauces de acuerdo al criterio de Horton - Strahler.....	24

RESUMEN EJECUTIVO

1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 10 años se han presentado muy fuertes lluvias que han desencadenado situaciones de desastre en diversas partes del territorio nacional, entre los que destaca la Costa de Chiapas, lugar en donde a consecuencia de las fuertes lluvias y grandes escurrimientos pico, se tuvieron inundaciones y fuertes pérdidas de infraestructura y desafortunadamente, de vidas humanas.

Las cuencas de la Costa de Chiapas ante grandes e intensos aguaceros se han comportado como cuencas torrenciales con las características siguientes: son cuencas de relieve accidentado, deforestadas parcial o totalmente, de suelos poco evolucionados, erosionados y erosionables, donde se originan avenidas súbitas y violentas de aguas cargadas de sedimentos procedentes de la erosión de las laderas y cauces.

El fenómeno torrencial se puede corregir mediante la intervención tanto en los cauces como en la cuenca, integrando un conjunto de acciones relacionadas con la cubierta vegetal y otras de ingeniería de los recursos naturales, armónicamente distribuidas en la cuenca y los cauces bajo un enfoque que en España (López Cadenas F., García Rodríguez J.L., J.A.Mintegui, Tragsa, entre otros), se promueve como Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas (RHFC), que es el que se propone aplicar con este proyecto de desarrollo interno, iniciando con el diagnóstico para identificar las acciones necesarias para implementar dicho enfoque de trabajo y contribuir a resolver la problemática que se ha venido presentando en la Costa de Chiapas.

La RHFC en forma resumida se puede enfocar en dos grandes componentes. 1) el Ordenamiento Agrohidrológico de su cuenca vertiente, con el que se busca conocer su estado físico y su previsible comportamiento hidrológico y geo-torrencial ante los eventos hidrometeorológicos extremos que suceden en la propia cuenca y, 2) la RHF propiamente dicha, en la cual se procede a actuar con las medidas pertinentes en las áreas y cauces de la cuenca que lo necesiten, teniendo un doble objetivo: a) reducir la vulnerabilidad de la cuenca ante los efectos que le cauce su geodinamismo torrencial y b) contribuir a su aprovechamiento sustentable.

La utilización de las cubiertas vegetales apropiadas (herbáceas, arbustivas y arbóreas) en las diferentes zonas de la cuenca, desempeña un papel esencial en la consecución de ambos objetivos. El bosque contribuye de un modo especial, pues constituye un elemento eficaz para regular el ciclo del agua y proteger al suelo de la erosión hídrica ya que con la recuperación forestal de la cuenca y debido al control que la vegetación forestal ejerce sobre la erosión superficial, se retiran sedimentos en suspensión que enturbian y densifican la corriente disminuyendo así el peso específico de la misma. Igualmente, debido al control significativo que la vegetación forestal ejerce sobre los escurrimientos directos, la recuperación forestal produce una disminución de los escurrimientos pico.

Es importante mencionar que las intervenciones en la cuenca para restaurarla necesitan de unos plazos muy dilatados, -años-, por lo que es necesario iniciar desde ahora para aspirar en un futuro a alcanzar dicha restauración y proteger la infraestructura productiva y de servicios y por supuesto, las vidas humanas asociadas a los desastres..

2 OBJETIVOS

Elaborar un proyecto de Restauración Hidrológico Forestal de una cuenca de la Costa de Chiapas a partir del diagnóstico del uso, manejo y conservación de laderas y cauces, aplicando sistemas de información geográfica, metodologías de investigación social, y productiva, apoyados en la modelación hidrológica,

3 METODOLOGÍA

Se trabajará dentro de la cuenca del río Huixtla, de preferencia en una de sus subcuencas hidrográficas, en la cual se aplicará una adecuación a nuestro país, de la metodología generada por los Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, herederos de más de 50 años de experiencias en las cuencas de régimen torrencial en su territorio, y cuya estructura metodológica de trabajo se basa en dos ejes bien definidos: en el primer eje se realiza el estudio descriptivo de la cuenca, desde el estudio más detallado de campo a la elaboración de cálculos y cartografía en gabinete, donde no sólo se observarán las geoformas, sino la red de drenaje, la vegetación y el suelo. En estos dos últimos apartados se trabajará a fondo con unos inventarios lo más riguroso posibles, para suministrar información de calidad que facilitará el Ordenamiento Agrohídrológico de la cuenca, teniendo en cuenta tanto sus posibilidades físicas, como los objetivos que se pretenden alcanzar con las obras y trabajos propuestos en el proyecto. En el segundo eje se realiza el estudio y análisis de los datos pluviométricos. La unión de éstos dos ejes se produce cuando es necesario proponer las intervenciones tanto en las laderas como los cauces. El paso previo es el Ordenamiento Agrohídrológico de la cuenca donde se propondrá la selección de alternativas que se deben implementar y donde están éstas localizadas. Como en todo proyecto de ingeniería es necesario describir las diferentes intervenciones o actuaciones con las obras y trabajos que se realicen dentro del proyecto de restauración hidrológico forestal, evaluar los costos,. Todo ello se integrará en una Memoria Técnica con sus correspondientes anexos de las descripciones técnicas de las obras y la cartografía vinculada.

4 RESULTADOS

4.1 Delimitación y subdivisión del Río Huixtla

La cuenca del río Huixtla puede subdividirse en las siguientes subcuencas (ver Plano del Anexo cartográfico):

- ⇒ cuenca Río Etzumú,
- ⇒ cuenca Río Tolimán,
- ⇒ sección Medio Alto Huixtla,
- ⇒ cuenca Río Negro,
- ⇒ sección Medio Bajo Huixtla.

Todas las subcuencas fueron a su vez subdivididas en microcuencas, y la microcuenca seleccionada para identificar las acciones de restauración hidrológico forestal fue la Microcuenca (BB) o Arroyo Agua Fría, como parte de la subcuenca (B) o Río Tolimán.

La microcuenca (BB) Arroyo Agua Fría, termina en la confluencia con el Arroyo Chevolcán, el cual forma la microcuenca (BC) y también forma parte de la subcuenca (B) Tolimán. La microcuenca (BA) arroyo Ojo de Agua desemboca después de la confluencia de las arriba mencionadas microcuencas (BA) y (BB), formando al mismo río Tolimán. El río Tolimán (subcuenca (B)) y el río Etzumú (subcuenca (A)), se unen en las inmediaciones del poblado de Belisario Domínguez, formando el río Huixtla, el cual desemboca en el sistema lagunar de la planicie.

La subdivisión de la cuenca del Río Huixtla fue realizada, utilizando las curvas de nivel de los mapas topográficos escala 1:50,000 del INEGI, y finalmente con las curvas de nivel del modelo de elevación digital del LIDAR, con diferencias entre curvas de nivel de 20 m; el cual se utiliza en el presente estudio, con un resultado de 949.19 ha totales para la microcuenca Arroyo Frío

Dentro de la cuenca del Río Huixtla se seleccionó la microcuenca (BB) Arroyo Agua Fría, por su fácil acceso (sobre la carretera Huixtla – Motozintla), su alto nivel de degradación ambiental, con la consecuente aportación de sedimentos; y por su ubicación en la parte más alta de la cuenca, colindante con la división continental. Asimismo por su representatividad respecto a la problemática y topografía, nunicamente para la cuenca del río Huixtla, sino también para toda la Costa de Chiapas. La microcuenca es una de las tantas “fabricas de azolves”, que llegan hacia la planicie de la Costa de Chiapas.

4.2 Descripción física de la cuenca Arroyo Agua Fría

4.2.1 Ubicación:

Ubicación política, poblaciones y acceso

La cuenca (BB) Arroyo Agua Fría, con una superficie de 949.19 ha, se ubica en el suroeste del municipio de Motozintla, Chiapas. La carretera Motozintla – Huixtla la atraviesa, pasando por la División Continental en dirección hacia Huixtla (Ver Plano 01, Anexo Cartográfico). Las poblaciones más importantes son: Las Cruces (División Continental, en el noreste de la cuenca), Rincón Buenavista (División Continental, norte de la cuenca), San Felipe (ladera norte), Barrio Nuevo Chiapas (ladera norte), Villa Flores (parte baja, ladera norte), Álvaro Obregón (parte baja, ladera norte), El Rosario

(parteagua sur de la cuenca), El Aserradero (parteagua sur de la cuenca), Plan de Urbina (parteagua sur de la cuenca), El Mango (salida de la cuenca);

4.2.2 Ubicación hidrológica

La cuenca (BB) Arroyo Agua Fría se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Huixtla, su parteagua noreste forma la División Continental entre el Océano Pacífico y el Golfo de México. Es ala vez el parteagua noreste de la cuenca del Río Huixtla, parte de su subcuenca (B) Río Tolimán, la cual forma una de las dos subcuencas altas del Río Huixtla (Ver Plano 02, Anexo cartográfico).

El río Huixtla es uno de los grandes ríos del Soconusco, de la Costa de Chiapas, que pasa por la ciudad del mismo nombre y desemboca en el sistema estuarino de la Encrucijada, el cual desemboca finalmente al Océano Pacífico. El conjunto de las cuencas de la Costa de Chiapas forma la región Hidrológica No. 23, Costa de Chiapas, del cual el Río Huixtla forma parte en su sección (23-B).

4.2.3 Ubicación geográfica

Las coordenadas extremas geográficas de la cuenca del Arroyo Agua Fría son las siguientes:

Tabla 1. Ubicación geográfica de los puntos extremos de la cuenca (BB) Agua Fría

	Grados	UTM
Extremo norte	15° 21'00" n	1697,282 N
Extremo sur	15° 19'25" n	1694,133 N
Extremo poniente	92° 19'30" w	572,550 E (15)
Extremo oriente	92° 16'15" w	578,209 E (15)

4.3 Fisiografía y geología

La cuenca se ubica en la ladera sur de la División Continental de la Provincia Fisiográfica Cordillera Centroamericana, en la transición entre la Subprovincia 83 Sierras del Sur de Chiapas y la Subprovincia 86 Volcanes de Centroamérica, atravesando las dos subprovincias por la mitad de la cuenca. La ladera norte pertenece a la Sierra Sur de Chiapas y la ladera sur a los Volcanes de Centroamérica. Lo que corresponde a la ladera norte son Paleozoico, rocas ignéas intrusivas ácidas (Pigia), mientras que la ladera sur es Terciario ignea extrusiva intermedia.

Las afloramientos de roca ígnea intrusiva ácida da origen a formaciones de granodiorita como roca madre; los cuales se encuentran paralelos a la línea de costa y se originan a partir de un magmatismo del Mesozoico, hasta el Cenozoico-Terciario (Neoceno). Este tipo de roca cuenta con una textura porfídica de granos grandes redondeados por una matriz; dado que es una masa de magma solidificado no cuenta con una estructura definida, pero si cuenta con una mineralogía compleja, como son cuarzo, feldespatos, vidrio, silicatos y hornblenda. Este tipo de afloramientos de granodiorita se consideran inestables, debido a que no tienen una estructura bien definida llegando a ocasionar movimientos en masa bajo ciertas condiciones ambientales.

En la cuenca media del Río Huixtla se localizaron también afloramientos tanto de andesita como de toba andesítica, los cuales se encuentran expuestos a procesos de meteorización química, lo que implica la transformación de la roca. Durante esta transformación, la roca original se

descompone en sustancias que son estables en el ambiente superficial, sin embargo las abundantes precipitaciones ocasionan la disolución de ciertos minerales, que asociado a las fuertes pendientes de los terrenos ocasionan condiciones de pérdida de suelos severas.

Estas características geológicas aunadas a las características texturales de los suelos que en general van de medias a gruesas propician tasas de infiltración muy elevadas que al saturar el perfil propician condiciones de alta inestabilidad, estas características sumadas a las fuertes pendientes nos dan como resultado una zona con gran cantidad de deslizamientos que se manifiestan en un proceso de erosión en masa.

En toda el área se presentan movimientos telúricos relacionados con la secuencia de la falla de la Costa del Pacífico, y así del cinturón Volcánico Centro Americano actualmente activo. La Plataforma del Pacífico se desliza lentamente debajo de la plataforma americana levantándola, provocando sismos, grietas y así el desarrollo volcánico. Una falla secundaria al norte del área de estudio atraviesa el valle de Motozintla-Cuilco–Montagua, lo cual provoca una inestabilidad geológico extraordinario en toda la región del sureste de Chiapas y sur de Guatemala.

4.4 Topografía

Las condiciones orográficas son de sierra abrupta, dominan las pendientes superiores a los 80 %, con 57.5 % de la superficie total. De toda la cuenca 87% de la superficie total tiene pendientes superiores a los 40 %. No hay planicies. Las disminuciones de las pendientes únicamente se registran acercándose a las cimas por la forma cóncava de estas. Las barrancas también son abruptas y profundas sin disminución de pendientes.

Tabla 2. Superficies de los grupos de pendientes

s (%)	s-media	ha	%
0 a 10	0.05	10.24	1.08
10 a 20	0.15	12.60	1.33
20 a 40	0.30	100.38	10.58
40 a 80	0.80	279.75	29.47
> 80	1.00	546.22	57.55
		949.19	100.00

La parte más lejana (el extremo sureste) tiene 2165 msnm, mientras la parte más elevado tiene 2205 msnm (ladera norte). La salida de la cuenca (la parte más baja, en el extremo poniente) tiene 1115 msnm, lo cual es una diferencia de altura de 1090 m entre el extremo alto y bajo. Así también existe variabilidad climatológica, respecto a temperatura, ya que la parte más elevada es más fresca y templado, que la parte más bajo. (Ver plano 03 Topografía y plano 04 Pendientes del Anexo Cartográfico).

4.5 Hidrología

La cuenca BB Arroyo Agua Fría es parte de la subcuenca Tolimán de la cuenca del Río Huixtla, el cual inicia en la Sierra Madre del Sur de Chiapas, fluyendo hacia el sistema estuarino La Crucijada, de la costa del Pacífico Chiapaneca. Es parte de la Región Hidrológica No. 23, Costa de Chiapas. La cuenca BB se subdivide en las siguientes microcuencas internas:

Tabla 3. Microcuencas internas de la cuenca BB Arroyo Agua Fría, con sus respectivas superficies y tiempo de concentración

Microcuenca interna	ha	Longitud de cauces principales (km)	(Tc) Tiempo de concentración horas
bba	239.47	3.2630	4.238
bbb	115.02	2.0670	2.413
bbc	20.45	0.5360	1.362
bbd	200.73	2.9790	3.644
bbe	77.99	0.9170	2.081
bbf	97.18	2.1000	2.495
bbg	198.35	2.1510	4.706
BB	949.19	14.0130	8.691
BB principal		6.8670	8.691

El tiempo de concentración se cálculo con el método de Kirpich - (ver Plano 05 Hidrología y Microcuencas del Anexo Cartográfico)

4.6 Clima

El clima del área de estudio es por su ubicación latitudinal (15°20'n) tropical, por su altura sobre nivel del mar entre caluroso (parte baja 1115 msnm) hasta templado (parte más alta 2205 msnm). Es muy húmedo por su posición geográfica, la cercanía al Océano Pacífico. El suelo es húmeda durante más de 10 meses del año (fuente: INEGI, carta 1:1000,000 Humedad en el suelo). Tiene una precipitación entre 3500 a 4000 mm/año (fuente: INEGI, Carta de Precipitación Total Anual 1 : 1'000,000, hoja Villahermosa).

El clima según Köppen modificado por García es el siguiente (fuente: INEGI; Carta de Climas 1: 1000,000; Hoja Villahermosa):

- ⇒ La parte alta (arriba de 1800msnm): C(m)(w) = Clima templado, con temperaturas medias anuales entre 12 y 18 °C, con el mes más seco inferior a 40 mm /mes y una lluvia invernal inferior a los 5 % de la lluvia total.
- ⇒ la parte baja (debajo de 1800 msnm): A(C)m(w) = Clima cálido, subgrupo de climas semicálidos (A(C)) con temperaturas medias anuales entre 18 a 22°C, húmedos con abundantes lluvias de verano, con el mes más seco inferior a 40 mm /mes y una lluvia invernal inferior a los 5 % de la lluvia total.

En el siguiente cuadro se puede observar la distribución de la precipitación durante el año, de las estaciones climatológicas mas cercanas:

Tabla 4. Datos de precipitación media en diferentes estaciones cercanas al área de estudio

estación	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	año	msn m
07-103 B. Domínguez	6.8	5.0	41.5	78.7	273.6	413.5	281.0	375.9	412.3	204.0	43.8	13.7	2149.8	700
07-057 Motozintla	1.1	1.5	2.6	14.9	71.2	186.6	133.8	131.7	154.9	86.5	14.6	2.6	802.0	1455
07-030 finca Chiripa	39.1	51.3	86.0	186.5	408.7	663.5	515.9	567.4	712.9	527.3	155.3	46.9	3960.8	750
07-083 finca Sta. Anita	53.7	61.3	150.1	304.8	641.8	825.3	582	683.5	863.3	559.9	167	74.6	4967.3	720
07-040 Huixtla	18.5	10.1	39.2	78.8	336.5	575.2	452.7	558.4	647.6	501.5	167.1	17.1	3402.7	40

(Fuente: INEGI, Carta de Precipitación Total Anual 1 : 1'000,000)

Se observan una temporada seca durante el invierno entre finales de noviembre hasta febrero – marzo, más al norte prolongándose hasta abril-mayo, donde las precipitaciones son mínimas y ocasionales. Y una temporada húmeda, que ocurre durante todo el resto del año. Dentro de la temporada húmeda ocurre un tiempo de canícula de menores niveles de precipitación, dejando dos máximos: en junio y en septiembre ocurren niveles de precipitaciones mayores que en julio y en agosto.

Las precipitaciones en toda la región están en función de la temperatura de la superficie marina tanto del Océano Pacífico frente a América Central, como del Mar Caribe; los volúmenes de agua evaporada en las masas de aire provenientes de estas áreas, el cual estimula los movimientos convectivos y el desarrollo ciclónico en el área, y así los niveles de precipitación. El sol pasa verticalmente en mayo (incremento de niveles de precipitación de junio) y finales de julio (incremento de mayores niveles de precipitación en septiembre), considerando una cierta inercia en el calentamiento oceánico. El calor latente adsorbido por la evaporación es liberado durante el proceso de condensación, desarrollando movimientos convectivos aceleradas y ciclones, los cuales afectan a toda la región, en especial las laderas expuestas hacia el océano Pacífico. Así la primera cordillera recibe la mayor cantidad de precipitación, lo cual explica los altos niveles de precipitación de las fincas Chiripa y Santa Anita, mientras las comunidades detrás de la División Continental, como son Motozintla se ubican en la “Sombra de la Lluvia” de dicha cordillera, con niveles de precipitación mucho más inferiores. Los niveles de precipitación relativamente bajas de las comunidades de Belisario Domínguez se puede explicar con su situación topográfico de estar ubicado en el fondo de la barranca del Río Huixtla, rodeado de montañas, las cuales “cosechan” la precipitación proveniente del aire húmedo de las masas oceánicas cálidas, las cuales al ascender por la cordillera condensan y se precipitan la mayor parte del agua almacenado.

La microcuenca (BB) Arroyo Frío se ubica sobre la cordillera entre Motozintla y Belisario Domínguez, pero con niveles de precipitación mucho más superior que ambas, debido a su posición de levantar las masas de aire proveniente de cualquier lado por su altura y así induciendo movimientos convectivos y así desarrollando precipitaciones de gran intensidad. No hay estación meteorológico en esta posición, sino en algunas fincas cafetaleras sobre la ladera Sur de la cuenca vecina del Río Huehuetán (Finca La Chiripa (estación 07-030)) y Río Islamapa (Finca Santa Anita (estación 07-083)), los cuales se acercan más a la realidad del área de estudio.

De esta misma parte se obtuvo el factor (R): En la finca Argovia se obtuvo a través de la medición de intensidades de precipitación, la cual se presentó en el siguiente trabajo: “Cortés Torres, Medina M., Arellano M., Baumann, Rodríguez M., 2008; La Lluvia y su Potencial Erosivo en la Costa de Chiapas; VI Seminario Internacional de Uso Integral del Agua 6 al 8 de agosto 2008; Jiutepec, Mor.”

4.7 Suelo

Las características genéticas y morfológicas de los suelos de la microcuenca se tienen su origen en la complejidad litológica dada por la composición y la edad de los materiales eruptivos, así como la influencia climatológica, como son radiación solar y precipitación pluvial; además los factores como la pendiente, las infiltraciones y los escurrimientos: la intemperización, erosión, el transporte y el depósito del material edáfico. Así se desarrollaron varias formas de suelos de cenizas volcánicas, por su variabilidad en la edad; los cuales debido a su estructura presentan poca adhesividad y cohesividad y a su bajo contenido de materia orgánica, hacen que estos suelos

sean susceptibles a los procesos erosivos y de deslizamientos. Los suelos son relativamente profundas, lo cual explica su origen de cenizas volcánicas.

Interpretación de cartografía edafológica:

Ladera Norte:

Re+Hh+I/2 = Regosol eutrico con Feozem haplico y Litosol, textura media

Ladera Sur:

Ah+To+Bd/3 = Acrisol humico con Andosol ortico y Cambisol districo, textura fina.

(Fuente de información: INEGI, carta Edafológica 1:250,000, hoja D15-2 Huixtla; según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)).

En el recorrido de campo de detecto las siguientes texturas:

Texturas y factor K de erosividad del suelo

Tabla 5. Determinación de la textura y del factor K del suelo en la microcuenca (BB) Arroyo Frío

	% arcilla	% limo	% arena fina	% arena gruesa	% materia orgánica	ha	Factor K (t ha hr ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
Ladera norte	20	30	40	10	< 0.5	610.29	0.0575
oriente	40	40	10	10	< 0.5	78.82	0.0310
Ladera sur	5	30	50	15	< 0.5	260.09	0.0740

(Ver Plano 07 Suelo y Factor K del Anexo Cartográfico)

4.8 Vegetación

La vegetación original en toda la cuenca era bosque mesófilo de montaña con *Liquidambar styraciflua*, *Clethra* sp., *Chiranthodendron pentadactylon*, *Quercus duratifolia*, *Pinus oocarpa*, y una gran abundancia de epifitas, musgos, orquídeas, Bromeliaceas y Polypodiaceas, debido a los muy altos niveles de precipitación. En la parte baja de la ladera sur hay presencia de un bosque de pino y pino-encino, donde hay presencia de *Pinus oocarpa*, *Pinus michoacana*, *Pinus chiapaneca*, debido al tipo de suelo que tiene muy poca capacidad de almacenamiento de humedad, es ácido y altamente erodible. Allí hay *Quercus pedicularis*, *Quercus crassifolia*, y *Quercus candicans*, además de *Arbutus jalapensis*. En el bosque mesófilo de montaña también hay presencia de *Chiranthodendron pentadactylon*, *Quercus duratifolia*, *Clethra* sp., *Hedyosmum mexicanum*, y *Saurauia scabrada*. En el sotobosque hay presencia de *Cyathea mexicana* (helecho arbórea), además en todos los sitios hay abundancia en epifitas, musgos, Bromeliaceas y Polypodiaceas.

4.9 Uso de suelo y Vegetación

Del Bosque mesófilo de montaña (FM) quedan únicamente 1.3 % (12.59 ha) de la superficie original. Del bosque de pino y pino – encino hay 1.9 % (18.20 ha) de la superficie de la cuenca en buen estado y 27.6 % (262.39 ha) de la superficie gravemente alterada, debido a incendios y sobreexplotación de madera.

Tabla 6. Uso de suelo en la subcuenca (BB) Arroyo Agua Fría, año 2008

uso suelo 2008		ha	%
A	Agricultura	346.87	36.5
CMT	cementerio	1.15	0.1
D	suelo desnudo, cárcava, derrumbe	36.61	3.9
FB	forestal, bosque	18.20	1.9
FM	Forestal, bosque mesófilo de montaña	12.59	1.3
FP	forestal, mucho disturbio, acahual	262.39	27.6
FRU	Frutal	2.84	0.3
P	pastizal, maleza	44.69	4.7
PF	acahual incipiente	183.74	19.4
U	urbano, caserío	40.11	4.2
Total		949.19	100.0

(Ver plano 06, Uso de suelo 2008)

El uso actual del suelo y la vegetación están determinadas por el cambio de uso de suelo hacia la agricultura nómada en laderas, originalmente de roza - tumba – quema y siembra por espeque sin labranza, manteniendo el sistema radicular arbórea – arbustiva en el suelo intacto; además de varios años de descanso entre siembra y siembra, donde un acahual secundario podía desarrollarse. Este sistema ha pasado a una agricultura permanente, a veces con un año de descanso, donde el sistema radicular arbórea – arbustiva ha sido poco a poco desapareciendo, debido a que los descansos eran insuficientes para la recuperación de dichas especies. Ahora es una agricultura permanente, sin labranza, siembra por espeque pero sin descansos o descansos que no duran más que 1 año, en laderas con pendientes hasta superiores de 100%, con enormes pérdidas de suelo. Hay 36.5 % (346.87 ha) de la superficie total de la cuenca con este sistema productivo. Como cultivo se siembra maíz solo y maíz asociado con frijoles y/o con calabaza y es de subsistencia y muy baja productividad, debido a que la erosión permanente del suelo. En la parte noreste de la cuenca en torno a la comunidad de Las Cruces hubo una conversión productiva de la agricultura permanente hacia praderas para la cría de ganado bovino y vacuno, con una superficie de 44.69 ha, que son 4.7 % de la superficie total.

Y en toda la cuenca se encuentran áreas erosionadas, cárcavas, cicatrices de deslizamientos, todos estos áreas sin cubierta vegetal (D). Son en total 36.61 ha, 3.9 % de la superficie total, las cuales están cubiertas por cárcavas y deslizamientos de tierras.

Existen superficies con acahuals, que son áreas agrícolas abandonadas o en recuperación y descansos prolongadas (PF), donde hay presencia de especies pioneras, como son *Cecropia peltata*, *Heliocarpus appendiculatus*, *Trichospermum mexicanum*, *Baccharis vaccinooides*, entre otros. Estas son 19.4 % de la superficie total (183.74 ha)

La fruticultura (FRU) es únicamente a nivel de traspatio alrededor de los caseríos y consiste en aguacate, cítricos, café y en la parte baja también de plátano, con un total de 2.84 ha, que son 0.3 % de la superficie total. La cuenca es densamente poblado por caseríos aislados y algunos pueblos compactos, como son Las Cruces (parteagua noreste) y El Rosario (parteagua sur). En total la superficie urbana, cubierta por caseríos es de 40.11 ha o 4.2 % de la superficie total.

4.10 Caracterización hidrológica y morfométrica

La caracterización morfométrica de las cuencas es para complementar la información de las propiedades físicas de estas, debido a que influyen en la cantidad y momento en que se produce el escurrimiento superficial del agua de lluvia. Los parámetros morfométricos de las cuencas, proporcionan índices cualitativos que permiten conocer, explicar y evaluar muchos de los procesos que se desarrollan en las cuencas (CNA, CP, 2007).

4.11 Parámetros relacionados al área y longitud de la cuenca

Los parámetros de la longitud de una cuenca son necesarios para predecir el comportamiento de los escurrimientos, caudales y tiempos en que ocurren después de un evento de precipitación. Son las características generales, como el área y perímetro de la cuenca, la longitud y la forma.

La superficie ocupada por una cuenca, influye directamente sobre el volumen total del escurrimiento. Una lluvia uniforme sobre una cuenca grande y otra más pequeña, en igualdad de condiciones podría generar escurrimiento de manera proporcional al área de las mismas. En la **Figura 1** se presenta la influencia del área de la cuenca sobre el escurrimiento superficial.

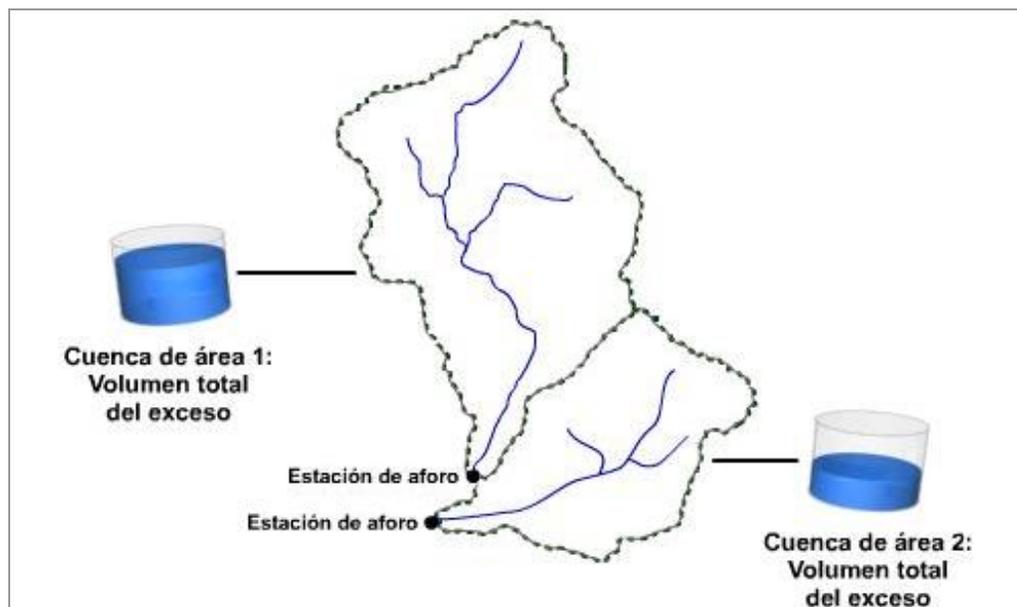


Figura 1. Influencia del área de una cuenca sobre el escurrimiento superficial

(Fuente: CNA, CP, 2007)

Por otro lado, al considerar dos cuencas de forma similar, una más grande que la otra. El escurrimiento que se desplaza desde el punto más lejano aguas arriba de la cuenca de mayor tamaño tiene que recorrer mayor distancia, por lo que tardará más en alcanzar la salida que el caso de la cuenca más pequeña. Lo anterior puede observarse en la **Figura 2**.

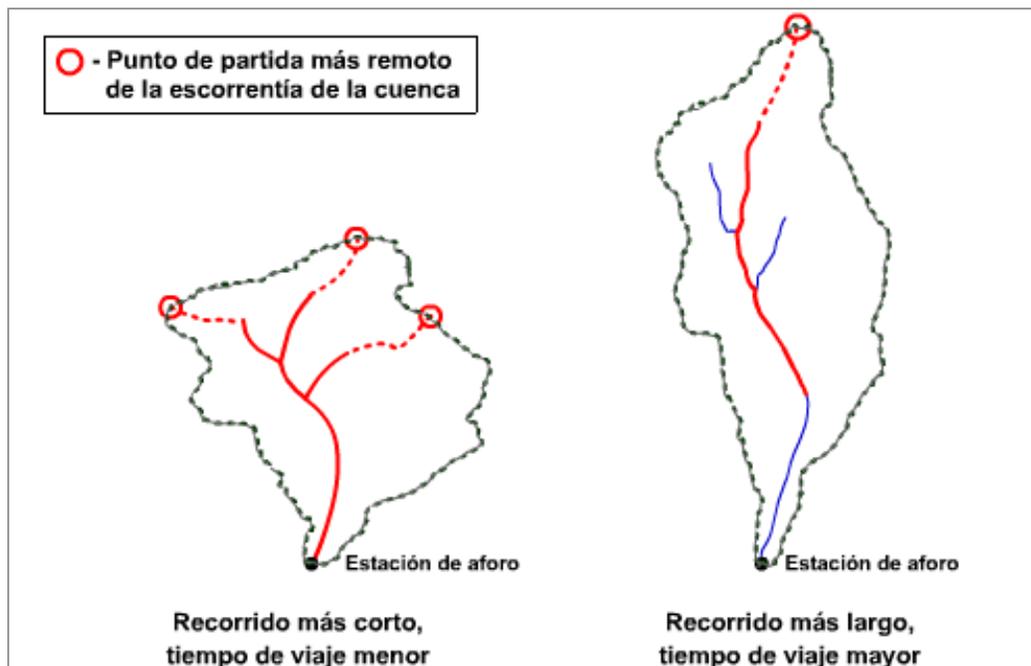


Figura 2. Efecto del tamaño de la cuenca sobre el tiempo de recorrido del escurrimiento superficial
(Fuente: CNA, CP, 2007)

Otro de los parámetros considerados, es la longitud del cauce, la cual depende de las características geomorfológicas de las cuencas. En las zonas planas y con sedimentos aluviales y sin rectificaciones artificiales es más probable encontrar cauces sinuosos, pero también en áreas de montaña con rocas o materiales resistentes (**Figura 3**).

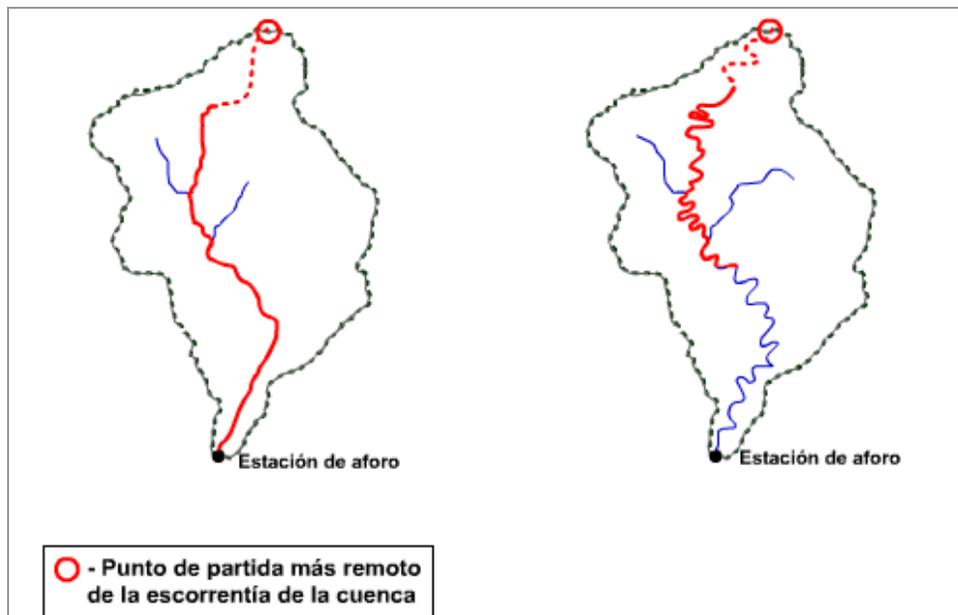


Figura 3. Influencia de la longitud del cauce sobre el tiempo que tarda en llegar a la salida el escurrimiento superficial
(Fuente: CNA, CP, 2007)

En la cuenca BB tenemos los siguientes parámetros:

Área: 949.19 ha
Perímetro: 14.908 km
Anchura: este - oeste: 5.659 km;
norte – sur: 3.149 km
Longitud del cauce principal: 6.867 km
Recorrido máximo: 6.867 km

4.12 Parámetros relacionados a la forma de la cuenca

La forma de la cuenca también tiene impactos sobre el escurrimiento: el tiempo en que ocurre, el tiempo de duración y el mismo caudal. La forma se refiere si la cuenca es alargada o redonda. En una cuenca redonda es más probable que el agua proveniente de varios lugares de la cuenca lleguen al mismo tiempo a la salida; mientras que en una cuenca de forma alargada, el caudal viene menos intenso, pero ocurre durante más tiempo. (**Figura 4**).

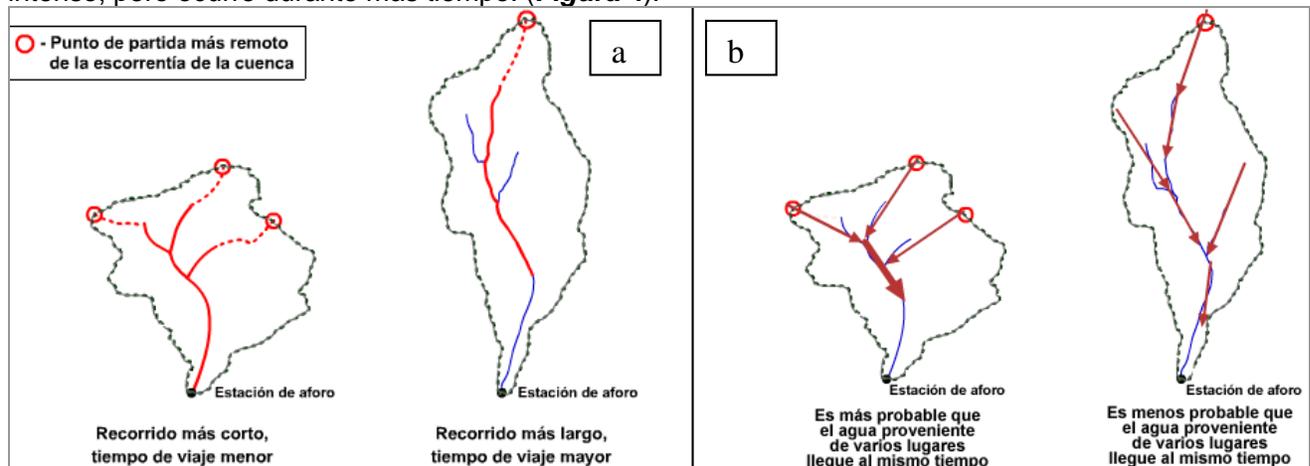


Figura 4. Efecto de la forma de la cuenca sobre el escurrimiento: a) tiempo de recorrido; b) tiempo de acumulación de flujo

(Fuente: CNA, CP; 2007)

Para nuestra cuenca BB se calculó el Coeficiente de Gravelius y el rectángulo equivalente

1) Coeficiente de Gravelius:

$$Cs = P / A \quad \text{ec. 13}$$

Donde:

Cs = Coeficiente de Cravelius (km^{-1})

P = Perímetro (km)

A = superficie de la cuenca (km^2)

$$Cs = 14.908 \text{ km} / 9.492 \text{ km}^2 = \mathbf{1.5706 \text{ km}^{-1}}$$

Nuestra cuenca es ovalada, ligeramente oblongada.

2) Rectángulo equivalente:

$$ar = \{(Cs) (A)^{0.5}\} \{1 + [1 - (1.12/Cs)^2]^{0.5}\} / 1.12 \quad \text{ec. 14}$$

$$br = \{(Cs) (A)^{0.5}\} \{1 - [1 - (1.12/Cs)^2]^{0.5}\} / 1.12$$

ec. 15

Donde:

ar = Altura del rectángulo equivalente

br = Base del rectángulo equivalente

Cs = coeficiente de Gravelius

A = superficie de la cuenca

Se estimó una altura de (ar) = 7.3494 km.

4.13 Parámetros relacionados a la topografía (relieve y altitud)

Las características de las condiciones topográficas, que incluye relieve, pendientes, forma de pendientes, longitud de pendientes alturas y desniveles, sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas, es muy evidente. Por un lado, a mayor pendiente del terreno corresponderá una menor duración en la concentración de agua escurrida superficialmente, llega más rápido, pero significa también mas volumen de agua porque menos agua puede infiltrar ni evaporar.

Altura media de la cuenca

La altitud media de la cuenca es un indicador para el relieve del terreno. Se obtiene mediante la curva hipsométrica, representado gráficamente por las áreas ocupadas por los diferentes intervalos de elevación. La altitud media corresponde a la mitad de la superficie acumulada en la gráfica. Los valores de altitud media, se presentan en la Tabla 1. La curva hipsométrica es además un indicador de la etapa de desarrollo geológico de la cuenca. Si la altura media es relativamente alta, y la curva es cóncava y disminuye fuerte en la parte baja es geológicamente joven, mientras si la disminución fuerte es al inicio en la parte alto, la altura media es relativamente baja y en la parte baja la curva va disminuyendo cada vez menos, y la forma de la curva es convexa, se trata de una geología madura y estable.

La altura media de la cuenca se calcula de la siguiente manera:

$$Hmc = Vc / A$$

ec. 16

Donde:

Hmc = altura media de la cuenca (m)

Vc = volumen de la cuenca (m³)

A = área de la cuenca (m²)

Tabla 7. Cálculo del volumen y altura media de la cuenca

msnm	Área (km2)	msnm	m	Área (ha)	Área (m2)	Volumen (m3)	Altura media
>1100	9.4919	1115	0	949.19	9491'900	0	h
>1200	9.2948	1200	85	929.48	9294'800	790'058'000	
>1300	8.7458	1300	185	874.58	8745'800	1617'973'000	
>1400	7.8982	1400	285	789.82	7898'200	2250'987'000	
>1500	6.8087	1500	385	680.87	6808'700	2621'349'500	
>1600	5.6877	1600	485	568.77	5687'700	2758'534'500	
>1700	4.5934	1700	585	459.34	4593'400	2687'139'000	
>1800	3.4194	1800	685	341.94	3419'400	2342'289'000	

>1900	2.0736	1900	785	207.36	2073'600	1627'776'000	
>2000	0.9853	2000	885	98.53	985'300	871'990'500	
>2100	0.3244	2100	985	32.44	324'400	319'534'000	
>2200	0.0140	2200	1085	1.4	14'000	15'190'000	
total	0	2225	1110	0	0	0	17'902'820'500
							1886.11558

Se obtiene un volumen de **17'902'820'500 m³** de la cuenca, con una altura media de **1886.116 msnm**.

Tabla 8. Cálculo de las curvas hipsométricas

cálculo curva hipsométrica				total		acumulado
msnm	km2	km2	km2	km2	msnm	km2
1100-1200	0.1974			0.1974	>1100	9.4922
1200-1300	0.5490			0.5490	>1200	9.2948
1300-1400	0.8418	0.0058		0.8476	>1300	8.7458
1400-1500	1.0895			1.0895	>1400	7.8982
1500-1600	1.1210			1.1210	>1500	6.8087
1600-1700	1.0943			1.0943	>1600	5.6877
1700-1800	1.1740			1.1740	>1700	4.5934
1800-1900	1.3458			1.3458	>1800	3.4194
1900-2000	1.0883			1.0883	>1900	2.0736
2000-2100	0.1726	0.4883		0.6609	>2000	0.9853
2100-2200	0.0199	0.2878	0.0027	0.3104	>2100	0.3244
2200-2300	0.0003	0.0018	0.0119	0.0140	>2200	0.0140

(ver plano 03 Topografía, Anexo Cartográfico)

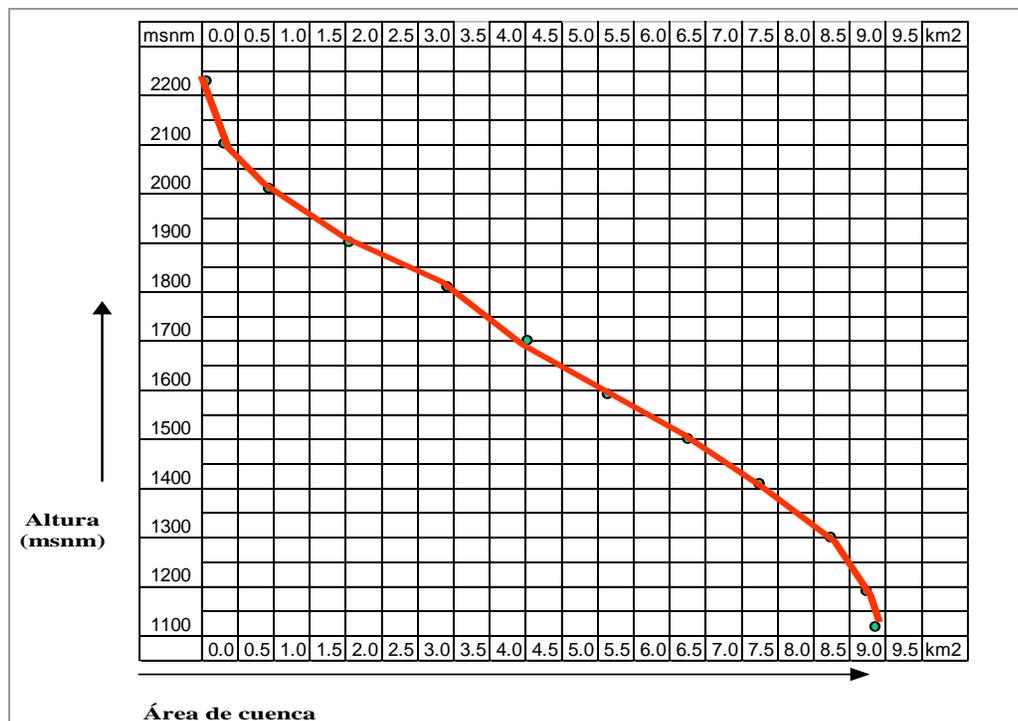


Figura 5. Curva hipsométrica

Si La cuenca (BB) Arroyo frío se trata de una cuenca relativamente joven, geológicamente inmadura, con mucha erosión.

Pendiente media:

La pendiente media de la cuenca es un indicador del relieve y de las pendientes que se van a encontrar allí. Tiene influencias sobre la erosión, el volumen y el tiempo del escurrimiento. Al incrementar la pendiente el escurrimiento ocurre más rápido, en tiempos más reducidas y con mayor volumen. Aumento también la cantidad total escurrido, debido a la disminución de la infiltración y evaporación.

La pendiente media se calcula la siguiente manera:

$$J = 100 \frac{\sum (Li) E}{A} \quad \text{ec. 17}$$

Donde:

J = pendiente media de la cuenca (%)

$\sum (Li)$ = suma de todas las longitudes de las curvas de nivel (km)

E = diferencia de las alturas entre las curvas de nivel (km)

A = superficie de la cuenca (km²)

Para la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío se obtuve las siguientes valores:

$$\sum Li = 341\,757 \text{ m}$$

$$E = 20 \text{ m}$$

$$A = 9\,491\,900 \text{ m}^2$$

$$J = 72.01 \% \text{ (pendiente media)}$$

La pendiente media es de 72.01 %, lo cual es extraordinariamente fuerte. Se trata de una cuenca con pendientes muy escarpadas.

Grupos de pendientes:

Se tiene que convertir las curvas de nivel en un plano de grupos de pendientes. Al seleccionar los grupos se consideraron las fuertes pendientes dominantes en el área, con el siguiente resultado:

Tabla 9. Distribución de los grupos de pendientes

s (%)	Pendiente media	ha	% de superficie	% acumuladas
0 a 10	0.05	10.24	1.08	
10 a 20	0.15	12.60	1.33	
20 a 40	0.30	100.38	10.58	
40 a 80	0.80	279.75	29.47	87.02
> 80	1.00	546.22	57.55	57.55
		949.19	100.00	0

(Ver Plano 04, Pendientes; Anexo Cartográfico)

Se observa que el 57,55 % de la superficie total tiene pendientes superiores al 80%, además 87 % de la superficie total tiene pendientes superiores al 40 %. Únicamente 2,41 % de la superficie total cuenta con pendientes inferiores al 20 %, lo cual ocurre únicamente en la cima de los cerros, cerca del parteaguas.

Pendiente media del cauce:

La pendiente media del cauce principal es el siguiente:

$$j = 100 (H_{\max} - H_{\min}) / L_c \quad \text{ec. 18}$$

Donde:

- j = pendiente media del cauce
- H_{max} = altura máxima del cauce
- H_{min} = altura mínima del cauce
- L_c = longitud del cauce

Para la cuenca BB se obtuvo las siguientes datos:

- H_{max} = 2140 m
- H_{min} = 1115 m
- H_{max} – H_{min} = 1025 m
- L_c = 6867 m
- j = 14.93 %

El cauce principal del Arroyo Agua Fría tiene 14.93 % como pendiente media dentro de la cuenca (BB). Se cálculo también la pendiente media de las subcuencas dentro de la cuenca (BB) con los siguientes resultados:

Tabla 10. Pendientes medias, cauces de las microcuencas internas de la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío

microcuenca	Longitud cauce		Área cuenca km ²	H _{max} km	H _{min} km	dH km	j (pendiente cauce)	
	km	km					m/m	%
bba	3.2630	3.2630	2.3947	2.140	1.430	0.710	0.218	21.76
bbb	2.0670		1.1502	2.210	1.430	0.780	0.377	37.74
bbc	0.5360	0.5360	0.2044	1.430	1.370	0.060	0.112	11.19
bbd	2.9790		2.0073	2.170	1.370	0.800	0.269	26.85
bbe	0.9170	0.9170	0.7799	1.370	1.270	0.100	0.109	10.91
bbf	2.1000		0.9718	2.020	1.270	0.750	0.357	35.71
bbg	2.1510	2.1510	1.9835	1.270	1.115	0.155	0.072	7.21
total	14.0130	6.8670	9.4918					
BB	6.8670		9.4918	2.140	1.115	1.025	0.149	14.93

Coeficiente de la masividad de la cuenca: (Martonne)

Este es un indicador relativo de la altura media de la cuenca: y es un cociente de la altura media de la cuenca entre su superficie. Este coeficiente se calcula de la siguiente manera:

$$tga = H_{mc} / A \quad \text{ec. 19}$$

Donde:

- tga = coeficiente de la masividad
- H_{mc} = altura media de la cuenca (m)
- A = área de la cuenca (m²)

Para nuestra cuenca es:

$$H_{mc} = 1886.116 \text{ m}$$

$$A = 9491'900 \text{ m}^2$$

$$tga = 1.9871 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

El coeficiente de masividad es de $0.000'198'710 \text{ m}^{-1}$

Coeficiente orográfico:

Este parámetro es un indicador sin unidad, es prácticamente el cuadrado de la altura media de la cuenca, entre su superficie. Si es alto, hay una altura media elevado, y es un indicador de una orografía inestable, con muchas pendientes y mucha erosión, una cuenca geológicamente joven.

Se calcula así:

$$CO = Hmc * tga = Hmc^2 / A \quad \text{ec. 20}$$

Donde:

CO = coeficiente orográfico (sin unidad)

Hmc = altura media de la cuenca

tga = coeficiente de la masividad

para nuestra cuenca es: $CO = 0.374'786$

El coeficiente orográfica es 0.375 , un valor muy alto.

4.14 Parámetros relativos a la red hidrográfica

Densidad de drenaje: Este parámetro es un indicador de la rugosidad del relieve, si aumenta la densidad de drenaje, la superficie es más ondulada y tiene más pendientes. Además en cuando sea mayor la densidad de drenaje, más rápido sea evacuado la cuenca. Y más será la erosión y la inestabilidad hidrológica de la misma.

Se calcula de la siguiente manera:

$$D = (\Sigma Lc) / A \quad \text{ec. 21}$$

Donde:

D = densidad de drenaje (km^{-1})

ΣLc = suma de las longitudes de todas las cauces de la cuenca (km)

A = superficie de la cuenca (km^2)

Para la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío se tiene los siguientes valores:

$\Sigma Lc = 82,813 \text{ km}$

$A = 949,19 \text{ km}^2$

$D = 8,1178 \text{ km}^{-1}$

La densidad de la cuenca es de 8.1178 km^{-1}

Así la Constante de Estabilidad de Río sea 0.1232 km . (La Constante de Estabilidad de Río = $1 / D$)

Alejamiento medio: Es un coeficiente que relaciona el curso del agua más largo con con la superficie de la cuenca. Se calcula:

$$a = L / (A)^{0.5} \quad \text{ec. 22}$$

donde:

- a = alejamiento medio (sin unidad)
- L = longitud del cauce más largo (km)
- A = superficie de la cuenca (km²)

Para la cuenca se tiene las siguientes datos:

- L = 6.867 km
- A = 949.19 km²
- a = 2.2289**

Para el cauce principal de la cuenca (BB) el alejamiento es de 2.2289.

Se hizo este cálculo también para todas las microcuencas internas con el siguiente resultado:

Tabla 11. Alejamiento en las microcuencas internas de la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría

	J pendiente cauce	A^{0.5}	a alejamiento
	%	km	
bba	21.759	1.547	2.108587
bbb	37.736	1.072	1.92732
bbc	11.194	0.452	1.185562
bbd	26.855	1.417	2.102637
bbe	10.905	0.883	1.038365
bbf	35.714	0.986	2.130251
bbg	7.206	1.408	1.5273
BB	14.926	3.081	2.228911

Tiempo de concentración:

La morfología de las cuencas determina su funcionamiento desde el punto de vista de los escurrimientos y de la erosión del suelo. Para la determinación del caudal es esencial la estimación del tiempo de concentración (tc), lo cual es el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo más alejado de la cuenca (López Cadenas, et al, 1994). También se puede definir como el tiempo que separa el fin de la precipitación y el fin del escurrimiento directo en un hidrograma.

Se hizo la estimación según Kirpich (López Cadenas et al, p. 49); con la siguiente ecuación:

$$tc = [0.870 (L^3) / (dH)]^{0.385} \quad \text{ec. 23}$$

donde:

- tc = tiempo de concentración (horas)
- L = longitud del cauce principal (km)
- dH = diferencia de nivel entre el punto más elevado y mas bajo del cauce mas alejado (km)

Para la cuenca (BB) total se obtuvo un total de 8.691 horas. Los resultados para cada una de las microcuencas internas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Tiempo de concentración, en horas; según Kirpich para la cuenca BB y 7 microcuencas internas

microcuencas	Superficie (ha9)	(Tc) Tiempo de concentración (horas)
BBA	239.47	4.2384
BBB	115.02	2.4125
BBC	20.45	1.3624
BBD	200.73	3.6439
BBE	77.99	2.0809
BBF	97.18	2.4945
BBG	198.35	4.7058
BB total	949.19	8.6910

Ordenación de Cauces según Horton y Strahler:

También influyen la forma en que estén conectados los canales en una cuenca determinada, en la respuesta de ésta a un evento de precipitación. Se han desarrollado una serie de parámetros que tratan de cuantificar la influencia de la forma del drenaje en la escorrentía superficial directa. El orden de los canales es uno de ellos. Uno de los criterios para determinar el orden de los canales en una cuenca es el definido por el modelo de Horton-Strahler.

Las redes de drenaje pueden ser modeladas o representadas como “árboles”, los cuales están conformados por un conjunto de nodos conectados unos a otros por segmentos de recta de manera que cada nodo tiene solo una ruta hacia la salida. Los nodos que se conectan a un solo segmento son llamados fuentes y los que conectan a más de uno son llamados uniones. Además los segmentos que se conectan a una fuente y a una unión se les denominan tramos exteriores o externos y a aquellos que se conectan a dos uniones se les denomina tramos interiores o internos

Se considera que la cuenca tiene una única salida o punto de desagüe; Los puntos en los que se unen dos segmentos de canal son los nudos internos; Los nudos externos son aquellos a partir de los cuales se origina un segmento de canal (es decir, la cabecera de todos los tributarios de la cuenca). En la ilustración siguiente, se muestra un sencillo ejemplo de ordenación de una red hidrográfica según el criterio de Strahler. La **Figura 6.**, muestra el formato para establecer los órdenes de cauces en una cuenca. Y los valores para cada cuenca, se presentan en la **Tabla 23.**

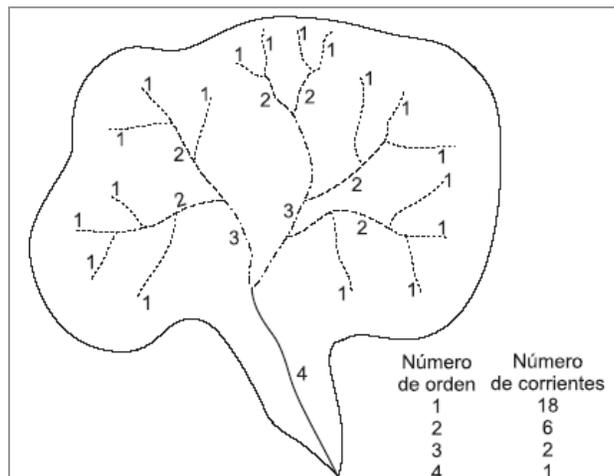


Figura 6. Ordenación de cauces de acuerdo al criterio de Horton - Strahler

En la cuenca existen los siguientes cauces según orden:

Tabla 13. Orden según Horton y Strahler de los cauces en la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío

orden	cantidad	Relación de bifurcación
1	196	2.22
2	88	2.67
3	33	0.91
4	36	0.97
5	37	-

(Ver Plano 05 Hidrología y microcuencas, Anexo Cartográfico)

La relación de la bifurcación es la cantidad de cauces del orden entre la cantidad de cauces del orden superior. Si es muy elevado es un indicador de paralelidad de cauces y pocas confluencias. Si el valor muy bajo es un indicador de muchas confluencias y nudos, también en las cauces de orden superior.

4.14.1 Número de Curva

Número de Curva. Los números de curva presentan el impacto que tiene la cubierta vegetal y el manejo del suelo sobre el escurrimiento proveniente de una tormenta. En nuestra cuenca BB Arroyo Agua Fría se presentan estos valores en la **tabla 24**.

Grupos hidrológicos:

- ⇒ Grupo hidrológico A: ladera sur, con factor $K = 0.0740$
- ⇒ Grupo hidrológico B: ladera norte, con factor $K = 0.0575$
- ⇒ Grupo hidrológico C: noreste, con factor $K = 0.0310$

Tabla 14. Número de curva, según grupo hidrológico del suelo, el uso de suelo 2008, y el uso de suelo recomendado, (condición media / condición húmeda)

Uso de suelo 2008		Grupo hidrológico		
		A: muy permeable	B: permeable	C poco permeable
		Ladera sur $K = 0.0740$	Ladera norte $K = 0.0575$	noreste $K = 0.0310$
A	Agricultura de espeque, alineado	72 / 89	81 / 95	88 / 97
CMT	cementerio	49 / 69	69 / 86	79 / 93
D	suelo desnudo, cárcava, derrumbe	77 / 92	86 / 97	91 / 98
FB	forestal, bosque	36 / 56	60 / 79	70 / 87
FM	Forestal, bosque mesófilo de montaña	15 / 33	44 / 64	54 / 74
FP	forestal, mucho disturbio, acahual	43 / 63	65 / 83	76 / 92
FRU	frutal	43 / 63	65 / 83	76 / 92
P	pastizal, maleza	49 / 69	69 / 86	79 / 93
PF	acaahual incipiente	57 / 77	73 / 89	82 / 95
U	urbano, caserío	98 / 100	98 / 100	98 / 100
Usos de suelo recomendado				
AF	agroforestería	65 / 83	75 / 91	82 / 95
CF	Café bajo árboles	43 / 63	65 / 83	76 / 92
DP	Manejo integral cárcavas	68 / 85	79 / 93	86 / 97
RF	reforestación	36 / 56	60 / 79	70 / 87

4.14.2 Cálculo del Escurrimiento (Q)

La cuenca por su forma, fuerte pendiente media (72 %), y muy poca cubierta vegetativa arbórea, es una cuenca con fuertes escurrimientos, aunque el suelo presenta buena capacidad de infiltración. Casi todo lo que precipita escurre, debido a las pendientes fuertes, y la ausencia de obstáculos físicas, como son la vegetación. La velocidad del flujo es muy fuerte, arrastrando el suelo casi descubierta.

La respuesta de una cuenca a un evento de precipitación se puede calcular de la siguiente forma:

$$Q = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S) \quad \text{ec. 24}$$

Donde:

Q = incremento de escurrimiento, como resultado de la precipitación (mm)

P = precipitación (mm)

S = lámina de agua, diferencia entre precipitación y escurrimiento, se compone de la lámina infiltrada, y de la lámina de precipitación previa (mm)

$$S = P - Q \quad \text{ec. 25}$$

$$S = 254 [(100 / N) - 1]$$

Donde:

N = número de curva (ver Tabla 23. Número de curva)

$$Q (i) = \{(\sum P[j] - 0.2 S)^2 / (\sum (P[j] + 0.8 S))\} - Q [i-1] \quad \text{ec. 26}$$

Donde:

i = intervalo de un tiempo

j = intervalo de tiempo

$\sum P[j]$ = sumatorio de las precipitaciones en unidades de tiempo j, hasta j = i (precipitación acumulado en tiempo [i])

Con la suma de los diferentes eventos que ocurren en un tiempo determinado se obtiene unidades, como son (mm / min), (mm / 30 min), (mm / h); y multiplicando la lámina por unidad de área se obtiene volúmenes, como son (m³/s), (m³/min), (m³/ hr), lo que se conoce como caudales.

4.14.3 Cálculo del escurrimiento máximo por métodos empíricos

Existen innumerables métodos para calcular escurrimientos máximos: (ver López Cadenas et al, 1994):

Método Santi:

$$Q = C \times S^{0.5} \quad \text{para } S < 1000 \text{ km}^2 \quad \text{ec. 27}$$

$$Q = C \times S^{0.667} \quad \text{para } S > 1000 \text{ km}^2 \quad \text{ec. 28}$$

Método Scimeni:

$$q = (600 / (S+10)) + 1 \quad \text{para } S < 1000 \text{ km}^2 \quad \text{ec. 29}$$

Método Pagliaro

$$Q = (2000 / (90+S)) \quad \text{ec. 30}$$

Donde:

Q = escurrimiento máximo (m/seg)

q = escurrimiento máximo unitario ($m^3 \text{ sec}^{-1} \text{ km}^{-2}$)
 S = superficie de cuenca (km^2)
 C = constante ($C = 33$ para $T = 100$ años; $C = 50$ para $T = 500$ años, $C = 66$ para $T = 1000$ años).

Estos métodos y otros más no incluye niveles de precipitación, ni niveles de cobertura de vegetación, pero si requieren de conocimientos del fenómeno en una región geográfica dada. .

Método Iskowski

$$Q = m \times \lambda \times P_m \times S \quad \text{ec. 31}$$

Método Mac Math

$$Q = 0.001 \times k \times P_{mm} \times S \exp(0.58 i^{0.42}) \quad \text{ec. 32}$$

$$Q = 0.00133 \times S \times I_{20} \times K \times (J/S)^{0.2} \quad \text{ec. 33}$$

Donde:

Q = escurrimiento máximo (m^3/seg)

q = escurrimiento máximo unitario ($m^3 \text{ sec}^{-1} \text{ km}^{-2}$)

P_m, P_{mm} = precipitación (m), (mm)

I_{20} = intensidad máxima de lluvia en 20 min (mm/h)

S = superficie de cuenca (km^2)

m = coeficiente (entre 1 a 10)

λ = coeficiente morfológico, (entre 0.017 y 0.8)

k = coeficiente ($k = 0.43$ para $T = 50$ años; $k = 0.22$ para $T = 10$ años, $k = 0.11$ para $T = 5$ años)

Método de García Nájera

$$Q_m = a \times p (12.21 S + 5.74) \quad \text{para cuencas entre } 0.4 \text{ y } 2.5 \text{ km}^2 \quad \text{ec. 34}$$

$$Q_m = a \times p \times S^2 \times (42 + 0.525 S) / [(1+S) (1+0.025 S) (0.5+S^{0.5})] \quad \text{ec.35}$$

Para cuencas mayores de 2.5 km^2

Donde:

Q_m = escurrimiento máximo intermedio (m^3/seg)

S = superficie cuenca (km^2)

S_c = superficie con vegetación en buen estado (km^2)

a, p = parámetros, que definen la cobertura vegetativa de la cuenca

$$a = 1 - (3S_c / 4S) \quad \text{ec. 36}$$

$p = 0.75$, para cuencas poco accidentadas, 1.00 para medianamente accidentadas y 1.25 para cuencas muy accidentadas.

Para nuestra cuenca sería:

$$S = 949.19 \text{ km}^2$$

$$S_c = 293.18 \text{ km}^2 \text{ (FB+FM+FP)}$$

$$a = 0.7683$$

$$p = 1.25$$

$$a \times p = 0.9604$$

$$Q_m = 635.476 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El escurrimiento medio máximo (no extraordinario) es de **635.5 m³/seg**, según el Método de García Nájera, un método eficiente para cuencas de alta montaña.

4.14.4 Estimación de la tasa de erosión

La estimación de la erosión se realiza según la presentación de Figueroa et al, 1991; la cual se basa en la Ecuación Universal de Pérdidas de suelos (EUPS). Dicha ecuación es la siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{ec. 1}$$

Donde

- A = promedia anual de pérdida de suelo (t ha⁻¹ año⁻¹)
- R = factor de erosividad de la lluvia (MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹)
- K = factor de erosionabilidad del suelo (t ha hr MJ⁻¹ mm⁻¹ ha⁻¹)
- L = factor de longitud de pendiente (adimensional)
- S = factor de grado de pendiente (adimensional)
- C = factor de cobertura vegetal (o del manejo de los cultivos) (adimensional)
- P = factor de prácticas mecánicas del control de erosión (adimensional)

4.14.5 Factor (R): Erosividad de la lluvia

Las precipitaciones dominantes en la zona son de una combinación de tipo convectivas, orográficas y ciclónicas. Las masas del aire húmeda provenientes del cercano Océano Pacífico tropical tienden a ascender sobre la Sierra Madre Sur de Chiapas, descargando allí su alto contenido de agua en violentas tormentas. Además, frecuentemente circulan paralelamente a la costa Guatemalteca-Chiapaneca ciclones tropicales, que llevan fuertes precipitaciones hacia las zonas costeras y la sierra adyacente, de origen ciclónica.

Debido a las condiciones orográficas especiales, y las condiciones de precipitaciones que varían fuertemente por esta razón, no se puede interpolar datos de precipitación de estaciones climatológicas cercanas, que tienen otras condiciones orográficas. Así se recurrió a las siguientes fuentes de información:

(a): Figueroa, Amante, Cortés, Pimentel, Osuna, Rodríguez, Morales; 1991; Manual de Predicción de Pérdidas de Suelos por Erosión; Colegio de Postgraduados, Montecillos, Edo México, SARH; p. 118: Para los Municipios de Motozintla se estima el Factor R en > 25,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ y para el Municipio Huixtla > 30,000 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹. La cuenca, aun ubicándose al 100 % en el municipio de Motozintla, está en dirección hacia el municipio de Huixtla. Al ubicarse sobre el parteagua, se supone un factor R más elevado.

(b) Cortés Torres, Medina M., Arellano M., Baumeann, Rodríguez M., 2008; La Lluvia y su Potencial Erosivo en la Costa de Chiapas; VI Seminario Internacional de Uso Integral del Agua 6 al 8 de agosto 2008; Jiutepec, Mor. p. 7: A través de mediciones pluviográficas durante los años 2007 y 2008 para la finca Argovia se reportan 38,434 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹

Conclusión: Se usa para toda la microcuenca el factor R de la finca Argovia de **38,434 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹**; por su posición geográfica de estar ubicado sobre la división continental. Es muy probable que el valor del factor R en la microcuenca sea superior todavía, pero para confirmarlo faltan estaciones

climatológicas en esta zona orográfica, para la estimación de la intensidad de la precipitación y así para un cálculo exacto del factor R.

4.14.6 Factor (K) Erosionabilidad del suelo

Para determinar la erosionabilidad del suelo se tomaron muestras de suelo en diferentes puntos de la cuenca y se estimaron la textura y contenido de materia orgánica. Se obtuvieron aproximadamente los siguientes datos para las texturas:

Tabla 15. Texturas y valores de K en los suelos de la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría

zona	A	B	C
% Arcilla	25	40	5
% Limo	25	40	30
% Arena fina	40	10	50
% Arena gruesa	10	10	15
Ind Bouyoucos	3.0	1.5	26.0
Materia orgánica	0.0	0	0.0
ha	610.29	78.82	260.09
factor K (t ha hr ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	0.0575	0.031	0.074

Zona A: ladera norte, alrededor de San Felipe, Barrio Nuevo Chiapas, Villa Flores, Álvaro Obregón y El Mango

Zona B: ladera noreste, región de las pastizales; alrededor de Las Cruces

Zona C: Ladera Sur; región de El Rosario y Plan de Urbina

(ver Plano 07 Suelo y factor K, Anexo Cartográfico)

Para la estimación del valor de K se utilizó el nomograma para evaluar el factor K de la erosionabilidad del suelo (Figueroa et al, p.87).

Conclusiones: Los suelos en toda la región tienen como común denominador la profundidad: son suelos muy profundos, y en la zona productiva agrícola y pecuario casi ausentes de la materia orgánica. Pero se observa una marcada diferencia en la erodabilidad del suelo respecto a la ladera sur y la ladera norte y la parte alta de la cuenca, debido a la cantidad de partículas medias altamente erosionables, que son los limos y arenas finas. Mientras en la parte alta (noreste, zona (B)) dominan las partículas finas (arcillas), en la ladera sur dominan las arenas finas, altamente erosionables y una ausencia de arcillas. Esta diferencia marca también diferencias en la tasa de erosión, y incrementa la vulnerabilidad de la ladera sur, inclusivamente aun estando cubierta por bosques (ver anexo fotográfico). La agricultura no es posible en ninguna zona, independiente de la erosionabilidad, debido a las fuertes pendientes.

4.14.7 Factor (L) (S) Longitud de pendiente y pendiente

El factor (L) Longitud de pendiente es muy variable, y depende de las condiciones orográficas y la densidad de infraestructura de caminos y carreteras.

Primero se estima la longitud media de la pendiente de la cuenca:

La longitud de la pendiente en una cuenca pequeña se puede estimar según Horton como la mitad de la inversa de la densidad de drenaje. (López Cadenas, et al, 1994, p. 190). La ecuación es la siguiente:

$$\lambda = 0.5 (A / \Sigma Lc)$$

ec. 2

Donde

λ = longitud de la pendiente (m)

A = área de cuenca (m²)

Lc = longitud total de cauces

Para la cuenca (BB) Arroyo Agua Frío se tiene los siguientes valores:

$\Sigma Lc = 82,813$ km

A = 949,19 km²

$\lambda = 616$ m

Así la longitud de la pendiente según Horton sería 616 m, lo cual es demasiado largo, debido a que la cuenca es demasiado grande para el método de Horton. Según el método de “contorno – Punto extremo” de Williams y Berndt, se basa en la longitud de los curvas de nivel y en los “puntos extremos” de estas curvas de nivel, donde cruza un cauce. La longitud de la pendiente se calcula de la siguiente forma:

$$\lambda x = (Lcv * LB) / (2n [Lcv^2 - LB^2]^{0.5}) \quad \text{ec. 3}$$

$$\lambda = (\lambda_{25} + \lambda_{50} + \lambda_{75}) / 3 \quad \text{ec. 4}$$

donde:

λx = longitud de la pendiente con la curva de nivel (x)

$\lambda_{25} + \lambda_{50} + \lambda_{75}$ = longitudes de pendientes calculado con las curvas de nivel a 25% 50 % y 75 % de la altura o desnivel total de la cuenca.

Lcv = longitud total de una curva de nivel

LB = longitud del contorno base de la curva de nivel (cortando todas las entradas hacia los puntos extremos de las cauces, como sería la curva de nivel, si no existieran dichas cauces; comunicando en línea recta cada cima)

n = número de “puntos extremos” o de cauces

λ = longitud de la pendiente media

Así se obtuve los siguientes resultados:

Tabla 16. Estimación de la longitud de la pendiente, según Williams y Berndt

Estimación de la longitud de pendiente (λ)				
	25 % de altura	50 % de altura	75 % de altura	total
Altura (msnm) de la curva de nivel	1400	1680	1960	
Lcv = Longitud curva de nivel (m)	7488	8491	5110	
Lcv = Longitud curva de nivel (m)	264		4	
Lcv = Longitud curva de nivel (m)	1		2095	
Lcv = Longitud curva de nivel (m)			57	
Lcv = Longitud curva de nivel total (m)	7753	8491	7266	
LB = Longitud de curva base	5537	6293	5885	
n = Numero de “puntos extremos” o cauces	27	26	40	
λx = Longitud de la pendiente	146.4884	180.261677	125.422556	452.172614
λ = Longitud de la pendiente media				150.724205

(Ver Plano 08 Factor LS, Anexo Cartográfico)

Conclusiones: Se utiliza una longitud de pendiente de 150 m, obtenido a través del método de Williams y Berndt (López Cadenas, p. 191)

El factor de (LS) se estimó según las tablas 4.10, 4.11, 4.12 (p. 92 y 93; Figueroa et al, 1991), para los diferentes usos de suelo, ajustando los valores según las modificaciones de los diferentes usos de suelo real en el campo. En estas tablas ya vienen unidas los factores de L y de S, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$L = (\lambda / 22.1)^m \quad \text{ec. 5}$$

Donde:

L = factor L (adimensional)

λ = longitud de pendiente (m)

m = exponente, tomado de tablas, es en función de la pendiente y del uso de suelos, y presentado en la tabla 4.9., p.91, Figueroa et al.

El factor S se calcula con las siguientes ecuaciones:

Para pendientes inferiores a los 9 %:

$$S = 10.8 \operatorname{sen} \theta + 0.03 \quad \text{ec. 6}$$

para pendientes superiores a los 9 %

$$S = 16.8 \operatorname{sen} \theta - 0.5 \quad \text{ec. 7}$$

Donde:

S = factor S (adimensional)

θ = pendiente (radians)

Para el ajuste de los factores (LS) para los diferentes usos de suelo reales en la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Agricultura, siembra por espeque:

$$LS(ae) = 0.7 LS(a) + 0.3 LS(p) \quad \text{ec.8}$$

Agricultura, forestal (bosque, bosque mesófilo de montaña y bosque alterado):

$$LS(f) = 0.8 LS(p) \quad \text{ec.9}$$

Bosque alterado y frutales

$$LS(fp) = 0.9 LS(p) \quad \text{ec.10}$$

Donde:

LS(ae) = factor LS para agricultura de espeque (se calcula)

LS(a) = factor LS para agricultura convencional (tabla 4.10, Figueroa et al, p. 92)

LS(p) = factor LS para pastizales (tabla 4.11, Figueroa et al, p. 93), dicho valor se usa también para los pastizales de la cuenca

LS(f) = factor LS para bosques y selvas (se calcula)

LS(fp) = factor LS para bosques alterados, sabanas, huertas frutícolas y cafetales (se calcula)

LS(d) = factor LS para suelos desnudos (tabla 4.12, Figueroa et al, p.92), dicho valor se usa para suelos desnudos, cárcavas y deslizamientos.

Como resultado se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 17. Estimación del factor (LS) para la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría

pendiente %		LS (longitud de pendiente 150 m)					
grupo	media	LS(p) 150m	LS(a) 150m	LS(d) 150m	LS(ae)	LS(f)	LS(fp)
0a10	5	0.830	1.230	1.700	1.110	0.664	0.747
10a20	15	4.335	6.025	6.565	5.518	3.468	3.902
20a40	30	11.070	15.260	19.790	14.003	8.856	9.963
40-80	60	23.470	31.840	40.050	29.329	18.776	21.123
>80	100	34.690	46.570	57.710	43.006	27.752	31.221
Fuente: Figueroa et al, 1991		p.93,t.4.11	p. 92, t.4.10	p.93,t.4.12			

Como resultado se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 18. Áreas con los diversos factores LS

LS	ha
urbano	40.11
0 - 1	5.69
1 - 2	3.68
2 - 5	3.21
5 - 10	45.60
10 - 15	49.64
15 - 20	8.57
20 - 30	268.37
30 - 40	323.17
40 - 60	201.15
total	949.19

(Ver plano 08 Factor LS, Anexo Cartográfico)

4.14.8 Factor (C) (P): Cubierta vegetal y práctica de Conservación del suelo

El factor (P) Prácticas de Conservación del suelo, siempre es 1; debido a que no existe ninguna práctica física de conservación de suelo, como son terrazas, surcos y fajas a curva de nivel. El factor (C) es el siguiente:

Tabla 19. Uso de suelo y el factor (C) en la cuenca (BB) Arroyo Frío

BB Cuenca Arroyo Agua Fría				factor C	Fuente: Figueroa et al, 1991
uso suelo	ha	%			
A Agricultura	346.71	36.5	0.3100	p.143, T.A 6	
CMT cementerio	1.15	0.1	0.0275	p.108, T.4.17	
D suelo desnudo, cárcava, derrumbe	36.61	3.9	1.0000	p.107, T.4.16	
FB forestal, bosque	18.20	1.9	0.0005	p.108, T.4.18	
FM Forestal, bosque mesófilo de montaña	12.59	1.3	0.0001	p.108, T.4.18	
FP forestal, mucho disturbio, acahual	262.39	27.7	0.0030	p.108, T.4.18	
FRU frutal	2.84	0.3	0.0120	p 108, T.4.17	
P pastizal, maleza	44.69	4.7	0.0130	p 108, T.4.17	
PF acahual incipiente	183.74	19.4	0.0090	p 108, T.4.17	
U urbano, caserío	40.02	4.2	0.0806		
total	948.94	100.0			

(Ver plano 09 Factor C, Anexo Cartográfico)

En la agricultura se estimó para maíz bajo las siguientes condiciones: Clima tropical húmedo, productividad baja, cobertura vegetativa de 30 %, 90 días ciclo del cultivo, labranza con cultivadora C(a) = 0.3100 (Figuroa et al, p. 143, T. A6).

En lo forestal se distinguen 4 niveles de cubierta vegetal:

(FB): bosque simple de coníferas (pino y pino – encino) con cierto nivel de disturbio, con más de 75 % de cubierta por el follaje de los árboles: Se da el valor medio entre los rangos indicados en la tabla 4.18 (p. 108), que son C(fb) = 0.0005.

(FM): que es la selva original, un bosque mesófilo de montaña de alta densidad, bien estratificado, de bajos niveles de disturbio, lleno de bejucos, epifitas, orquídeas: se asigna el valor C(fm) = 0.0001 de la misma tabla.

(FP): Un bosque muy alterado, sobreexplotado, quemado, o usado como cafetal. A veces tiene abundancia de cárcavas. Los árboles son aislados; Allí se asigna C(fp) = 0.0030, de la misma tabla.

(PF) En el caso del acahual incipiente o bosque muy alterada y deforestado (PF), se considera el nivel más bajo mencionado en la tabla, con una cubierta por el follaje de los árboles de 20 %, que es C(pf) = 0.0090.

Los frutales se valoran como un pastizal con árboles, según la tabla 4.17 (p.108), con cubierta arbórea de 50 % y cubierta vegetal de pasto de 80 %, que son C(fru) = 0.0120. Si son pastizales puros (P), con 80 % cubierta vegetal, son C(p) = 0.0130. En el caso del factor C de las zonas urbanas (U), no se calcula, ya que abarca las casas construidas, sin huertos, ni patios. Por esto en este ejemplo no se calcula la tasa de erosión para estas.

4.15 Erosión total

Al multiplicar los diferentes factores arriba mencionadas se obtiene la erosión. Esto se lleva al cabo por medio de la siguiente manera:

Se cartografía los diferentes factores. Se sobreponen los diferentes polígonos respectivos a los diversos factores y se multiplican estos valores para cada polígono resultante, obteniendo así un plano de la tasa de erosión. Para fines de presentación se forman grupos de tasa de erosión, asignando a cada polígono su grupo. Los resultados de la erosión con el uso de suelo actual es el siguiente:

Tabla 20. Tasas de erosión (en t ha⁻¹ año⁻¹) respectivas para el uso de suelo 2008

Erosión	uso suelo 2008
t / ha año	ha
urbano	40.11
0 a 10	18.24
10 a 25	15.84
25 a 50	15.69
50 a 100	32.06
100 a 200	217.47
200 a 500	9.63
500 a 1'000	55.74
1'000 a 2'000	141.79
2'000 a 5'000	30.29
5'000 a 10'000	42.37

10'000 a 30'000	293.56
30'000 a 200'000	36.40

(Ver Plano 10, Erosión con el uso de suelo 2008, Anexo Cartográfico)

Al estimar la cantidad total de erosión se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 21. Tasa de erosión por hectárea y tasa de erosión total, situación actual 2008

erosión t / ha año	Erosión media T/ha año	superficie (ha)	Erosión total 1000 t/año
urbano	0	40.11	0
0 a 10	5	18.24	0.091
10 a 25	17.5	15.84	0.277
25 a 50	37.5	15.69	0.588
50 a 100	75	32.06	2.405
100 a 200	150	217.47	32.621
200 a 500	350	9.63	3.371
500 a 1000	750	55.74	41.805
1000 a 2000	1500	141.79	212.685
2000 a 5000	3500	30.29	106.015
5000 a 10'000	7500	42.37	317.775
10'000 a 30'000	20'000	293.56	5871.2
30'000 a 200'000	115'000	36.4	4186
total		949.19	10'774.832

4.16 Estimación de la producción de azolves

Se puede estimar la producción y transporte de azolves (caudal sólido): a través de la tasa de erosión y el tamaño de la cuenca, según Robinson 1979 (citado in: Becerra M., 1999; p. 186); con el factor de la proporción del desplazamiento de sedimentos.

La cuenca tiene 949.19 ha, que son 9.4919 km²., lo que corresponde a un factor de proporción de desplazamiento de sedimento de 24 % aproximadamente. Lo cual significa los siguientes resultados:

Tabla 14. Producción de Azolves (en 1000 t/ha)

Microcuenca	superficie (ha)	Proporción de desplazamiento de sedimento. (Fuente: Robinson, 1979)	Erosión media 1000 t/año	azolves 1000 t/año	Azolves medias diarias t / día
BB	949.19	24 %	10'777.832	2'585.960	7084.8

El problema de los azolves es que no ocurren diario, sino se concentran en unos pocos días de mayor intensidad de precipitación, provocando fenómenos catastróficos.

4.17 Identificación de acciones de Restauración Hidrológico Forestal para el control de la erosión y del caudal:

4.17.1 El uso de suelo recomendado

La única forma, donde el hombre puede invertir para el control de la erosión es a través de la modificación del factor C: (cobertura vegetativa) y factor P (prácticas mecánicas de control de la erosión). Obras, que modificarían el factor P, como surcado a curva de nivel, terrazas y plantaciones a curva de nivel, en estas laderas con estos niveles de precipitación tienen muy poca efectividad.

Para un efectivo control de la erosión se recomienda un cambio de uso de suelo, incrementando por un lado los niveles de la cubierta vegetativa (disminuyendo sustantivamente el factor C), en especial en las pendientes mayores, que abarca la mayoría de la superficie de la cuenca. No es posible la agricultura en estos terrenos, salvo algunas áreas menores en las inmediaciones de las casas y las cimas de los cerros, debido a la pendiente. El uso de suelo se cambiará según las siguientes condiciones:

Tabla 22. Cambio de uso de suelo recomendado para la cuenca (BB) Arroyo Agua Fría

Cambio de uso de suelo recomendado						
uso de suelo 2008		ha	pend	cambio de uso recomendado		
						ha
A	agricultura espeque	346.87	0-20 %	AF	cultivo en callejones	9.10
			20-40%	CF	café bajo árboles o fruticultura	37.80
			> 40 %	RF	reforestación y enacahualamiento	299.97
CMT	cementerio	1.15	todo	CMT	queda como tal	1.15
P	pastizal	44.69	0-40 %	P	queda como tal	8.82
			> 40 %	RF	reforestación y enacahualamiento	35.87
PF	matorral, agrícola en descanso, recuperación forestal	183.74	0-20%	AF	cultivo en callejones	2.01
			20-40 %	CF	café bajo árboles o fruticultura	3.50
			> 40 %	RF	reforestación y enacahualamiento	178.23
FP	bosque alterada, disturbios	262.39	todo	FB	enacahualamiento	262.39
FB	bosque (pino, pino- encino, encino)	18.20	todo	FB	queda como tal	18.20
FM	selva mesófilo de montaña	12.59	todo	FM	queda como tal	12.59
D	suelo desnudo, cárcavas y deslizamientos	36.61	todo	DP	manejo integral de cárcavas y deslizamientos:	36.61
fru	frutales	2.84	todo	fru	queda como tal	2.84
U	urbano	40.11	todo	U	queda como tal	40.11
	Total:	949.19				949.19

En total el uso de suelo recomendado sería el siguiente:

Tabla 23. Uso de suelo recomendado de la cuenca BB Arroyo Agua Frío

	uso suelo recomendado	ha	%
AF	Agroforestería, cultivos de callejones	11.11	1.2
	Únicamente en pendientes inferiores a los 20 %		
CF	Café bajo árboles	41.30	4.4
	Únicamente en pendientes inferiores a los 40 %		
CMT	Cementerio (ya existe)	1.15	0.1
DP	Mamado integral de cárcavas y deslizamiento de tierras	36.61	3.9
FB	Bosque (incluye bosque actualmente degradado)	280.59	29.6
FM	Bosque mesófilo de montaña	12.59	1.3

FRU	Fruticultura (ya existe)	2.84	0.3
P	Pastizales (únicamente en pendientes inferiores a los 40 %)	8.82	0.9
RF	Reforestación con plantaciones de muros vivos; todas las áreas con uso no forestal superiores a los 40 %	514.07	54.2
U	Urbano (ya existe)	40.11	4.2
	Total	949.19	100.0

(Ver Plano 11, uso de suelo recomendado, Anexo Cartográfico).

Allí se puede ver, que destacan los 514 ha con reforestación, que son 54.2 % de la superficie total. Esto se debe a la enorme superficie de agricultura y ganadería en laderas extremas, que son de muy baja productividad e insostenibles, son áreas productoras de azolves, que finalmente son de muy alto costo para toda la sociedad en su conjunto, si no se lleva este cambio de uso de suelo recomendado.

En seguida se describen los diversas prácticas recomendadas, y donde se les aplican:

4.17.2 Agroforestería: Cultivo de callejones

Para las áreas agrícolas y pecuarias actuales con pendientes inferiores a los 20 % , lo que corresponde a 11.11 ha, únicamente 1.2 % de la superficie total; se recomienda aplicar un sistema agroforestal productiva en forma permanente, sin necesidad de descansos: Franjas a curva de nivel de 5 m de anchura agrícolas intensivas, donde se produce preferentemente maíz con calabaza y frijol o haba en forma asociada o hortalizas de todo tipo, pero en rotación para autoconsumo familiar.

Estas franjas agrícolas sean intercalado con otra franja forestal, a curva de nivel de 1 m de anchura con árboles leguminosas podables, como son *Erythrina sp.*, plantadas a alta densidad (25 cm entre cada árbol en línea a curva de nivel). Las líneas no deben tener exactamente curva de nivel, sino una pendiente óptima, idéntica a las pendientes óptimas de las unidades de riego por surco, para que el agua no se acumula, sino fluye lentamente a lo largo del obstáculo. Dicha pendiente óptima se ubica entre los 0.2 a 0.3 %, según la textura o velocidad de infiltración.

Estos árboles se podan antes de iniciarse la temporada de la siembra y se aplica el material de la poda fina sobre la franja agrícola para la formación de una capa de suelos orgánicas. El material grueso de ramas y estacas mayores se usa para seguir plantando árboles en línea o se acuestan encima de la línea plantada para reforzar la barrera arbórea. Una vez establecida la línea de árboles y prendida las estacas se puede reforzar dicha línea con la plantación en línea a 0.5 m con el pasto *Veteveria zizanioides* cuestras arriba de la línea de árboles.

Para e establecimiento de este sistema se inicia con el establecimiento de las líneas a 0.3 % (casi a curva de nivel), después de aplica donde se va a establecer la franja forestal un surco, en el cual se plantan el pasto *Veteveria zizanioides* y debajo del cual se estableces las estacas retoñables de *Erythrina sp.* La franja agrícola mide 5 m y la franja forestal 1 m, juntos son 6 m, es decir que la franja forestal mide $1/6 = 0.167$ veces del área total, o 16 líneas de 100 m de longitud / ha = 1600 m lineales / ha, lo que son un total de 17,776 m lineales para los 11.11 ha de la cuenca.

El costo para el establecimiento del sistema agroforestal es aproximadamente de 3000 pesos / ha, que son para los 11.11 ha una cantidad de 33,330 pesos totales.

4.17.3 *Café con árboles y / o fruticultura.*

En las áreas agrícolas y pecuarias de con pendientes entre 20 a 40 % se recomienda el establecimiento de huertos frutícolas (aguacate, durazno, cítricos) o el establecimiento de cafetales con especies arbóreas de media sombra, como son debajo de la cota 1800 msnm *Inga sp.* (*Inga lauriana*, *I. sapinioides*, *I. micheliana*, *I. rodrigueziana*, *I. spuria*, y otros), y arriba de dicho área *Erythrina spp.* A todos los árboles se establecen terrazas de media luna, reforzadas con *Psychotria tricótoma* (palo de agua), y cubiertas por maleza que soporta la media sombra. En la cercanía del parteagua norte y oriente, arriba de los 1900 msnm se establecen además cortinas rompevientos a cada 50 m a curva de nivel con *Cupressus lindley*, para proteger la plantación de los vientos fuertes que azotan dicho área. En total son 41.30 ha con esta práctica, que son 4.4 % de la superficie total de la cuenca.

El costo del establecimiento del cafetal es de 9000 \$ / ha. El costo para reconvertir las 41.30 ha es de 371,700 \$ totales

4.17.4 *Reforestación, incluyendo plantación de muros vivos:*

En todas las áreas agrícolas y pecuarias con pendientes superiores a los 40 % se lleva al cabo la reforestación, que son 514.07 ha o 54.02 % de la superficie total de la cuenca, más que la mitad. Esta reforestación se lleva al cabo en dos fases:

Primera fase: Protección del suelo y Formación de una capa de suelo orgánico

En esta etapa la meta principal es obtener la protección del suelo y la formación de un suelo orgánico para que a partir de estas condiciones se pueda recuperar el bosque original mesófilo de montaña. En esta fase se permite un encahualamiento inducido, sembrando malezas y arbustos de rápido crecimiento, como son *Cecropia peltata*, *Heliocarpus appendiculatus*, *Trichospermum mexicanum*, *Baccharis vaccinooides*, inclusivamente debajo de la cota 1800 msnm el capulín *Muntingia calabura* para que rápidamente el suelo cuenta con una cubierta vegetativa, se protege y se vaya formando una capa de suelo orgánico. Simultáneamente se plantan especies de rápido crecimiento como muros vivos, y otros de rápido crecimiento que pueden formar un posterior bosque. Se pueden plantar estacas de especies retoñables, como son *Erythrina sp.*, para la parte alta y *Inga sp.* para la parte media y baja de la cuenca. Como muro vivo a curva de nivel se puede establecer *Psychotria tricótoma*, *Yucca sp.*, también *Agave sp.* (maguey).

Este matorral secundario sirve como plantación nodriza para las especies del bosque mesófilo de montaña.

Segunda fase: Una vez establecido un acahual (matorral secundario) en este se plantan especies arbóreas nativas del bosque mesófilo de montaña, combinadas de rápido y de lento crecimiento, como son *Clethra sp.*, *Quercus sp.*, *Liquidambar sp.*, *Chiranthodendron pentadactylon* y otros.

Para la zona de bosques de pino (parte baja de la ladera sur) se plantan los pinos nativos del área, que son *Pinus oocarpa*, *Pinus chiapanensis* y *Pinus michoacana*. Dichas especies, además de *Cupressus lindley* se pueden plantar sobre todo en las inmediaciones de la división continental, por los fuertes vientos que suelen pasar por allí.

La reforestación cuesta unos 8000 \$/ha aproximadamente. Para poder llevar al cabo la rehabilitación forestales de las superficies de la cuenca, que lo requieren (los 514.07 ha) se requieren 4,112,560 \$ totales.

4.17.5 Manejo integral de áreas desprovistas de vegetación, como son cárcavas y áreas con deslizamientos

Este sistema se aplica a todas las superficies desprovistas de vegetación, independiente de su pendiente. Pueden ser cárcavas, deslizamientos de tierras, tanto en corte como en el área de acumulación del material deslizado.

Se trata de una combinación de obras civiles, como son el establecimiento de gaviones, terrazas, encauzamientos, revestimientos, empedradas, construcción de represas filtrantes, fijación de mallas de diversos materiales sobre la superficie; todo esto combinado con técnicas de reestablecimientos de una cubierta vegetativa como son las diversas técnicas de empastamiento, hidrosiembra, enacahualamiento inducidas, colocación de estacas retoñables, plantaciones de especies nodrizas y reforestaciones. Según el problema se aplica un conjunto de técnicas para retener el avance del deslizamiento, para retener el crecimiento de la cárcava o para fijar el material deslizado.

4.17.6 Manejo integral de cárcavas

Casi todos los cauces del área son cárcavas. Allí se establecen represas de gaviones con altura del caudal máximo de un retorno de 10 años, con un espaciado de pie- cabeza, considerando una pendiente de 3 % entre el pie de la represa superior a la cabeza de la represa inferior. Se combina con empastamientos y el reestablecimiento de un bosque de galería en las laderas laterales desnudas, y sobre el relleno depositado en dichas represas, mediante la colocación de estacas de *Salix sp.*, *Ficus sp.*, y *Psychotria tricótoma*, además de y de racimos de *Phragmites sp.*, y *Bambusa vulgaris*.

Las represas de gavión y también de piedras acomodadas se pueden colocar únicamente en tramos con pendientes inferior a los 20 % para la estabilidad de la misma. Si la pendiente del tramo del cauce es superior, no se puede hacer nada. Se tiene que recibir todo el flujo que pasa por la sección empinado en forma indomado hasta que llegue a una super-represa, la cual será colocado en el primer tramo con una pendiente inferior a los 20 %. Tiene que ser diseñado para resistir fuerzas superiores, ancha, y más elevado que el nivel de agua de un retorno de 10 años, para rellenar un área suficiente de azolves ; estar anclado y empotrado superior a los demás represas que cuentan con vecinos superiores a distancia pie- cabeza.

La cabeza de las cárcavas requieren un manejo especial, que incluye en forma simultáneamente las siguientes tareas:

1. Suavización del talud combinado con el empastamiento del mismo: Se corta la parte más alta de la cabeza de la cárcava, acomodando dicho material como relleno al fondo de la misma
2. Reforzamiento ingenieril del piso de la cárcava: construcción y acomodamiento de gaviones en la base de la cárcava, para detener los azolves que se siguen desprendiendo de la cabeza
3. Reforzamiento vegetativa de la cima de la cárcava: Reforestación de al menos una franja de 50 m desde la cima de la corte con especies arbóreas de rápido crecimiento y raíces pivoteantes: se puede usar *Cupressus lindley* (arriba de 2000 msnm), *Pinus michoacana* (arriba de 1800 msnm), *Inga sp.* (debajo de 1800 msnm), *Muntingia sp.* (debajo de 1800 msnm), y otros.

4. Reforzamiento vegetativa de la ladera de la cárcava: del área de corte, como del área de relleno: Se aplicara en forma alterna los sistemas
 - ⇒ estacas retoñables + pasto *Vetiveria zizanooides* + malla;
 - ⇒ estacas retoñables + pasto *Cynodon sp.* + malla;
 - ⇒ estacas retoñables + *Mucuna sp.* + malla.

Las estacas retoñables son: *Erythrina sp.*, en la parte baja también *Gliricidia sp.* (debajo de 1500 msnm), *Baccharis sp.*, *Psychotria trichostoma*, y *Yucca sp.*. Se aplican a 1 m de distancia entre si, en línea a curva de nivel y 4 m entre líneas; la colocación es en un ángulo de 45°.

5. Reforzamiento vegetativo del fondo de la cárcava: el fondo de la cárcava es muy inestable y se piensa que pronto se llenará de nuevo de azolves o se sigue profundizando con el flujo de agua, por esto se establecen allí las represas de gaviones arriba mencionadas para que se rellenan de azolves, dejando una pendiente entre gavión a gavión de 3 %, donde el agua puede escurrir lentamente. Una vez lleno los gaviones se pueden estabilizar estos rellenos con material vegetativas, como son *Cynodon dactylon* (pasto estrella, donde no haya flujo permanente), la colocación de estacas y racimos de *Phragmites sp.* (carrizo), *Bambusa vulgaris* (babmoo), y *Salix sp.* (sauce).
6. Reforzamiento vegetativo de los gaviones: Los gaviones en este sitio pronto se llenarán con azolves, por lo tanto se recomienda dejar dentro de ellos estacas delgadas de especies retoñables, como son *Salix sp.*, y *Ficus sp.* preferentemente de diferentes especies, que soportan inundaciones. . Importante es que la punta de las estacas salen hacia afuera, y que no sean cubiertas de azolves pronto

4.17.7 Manejo del área de corte de los deslizamientos

Debido a las fuertes pendientes combinado con un uso de suelo totalmente inadecuado, toda la cuenca está llena de cortes por deslizamiento de taludes. Y si no se lleva al cabo el cambio de uso de suelo arriba mencionado, esas deslizamientos van a aumentar.

Los manejos de estas áreas es el siguiente:

Al inicio del deslizamiento se encuentra una condición parecida al inicio de una cárcava (Cabeza de cárcava) y así los tratamientos son similares. La ladera es vertical o casi vertical, muy inestable, la cárcava tiende a crecer; se caen más bloques del material sólido que yace encima de un material más blando y erosivo, deslizándose encima de ellos.

El tratamiento es el siguiente:

1. Manejo integral de cárcavas bajo condiciones de disturbio vegetativo, el cual Incluye:
 - 1.1 Suavización de la pendiente de la cabeza del deslizamiento
 - 1.2 Reforzamiento vegetativa de la cima de la cárcava: Reforestación de al menos una franja de 50 m desde la cima de la corte con especies arbóreas de rápido crecimiento y raíces pivoteantes: se puede usar *Cupressus lindley* (arriba de 2000 msnm), *Pinus michoacana* (arriba de 1800 msnm), *Inga sp.* (debajo de 1800 msnm), *Muntingia sp.* (debajo de 1800 msnm), y otros.
 - 1.3 Reforzamiento vegetativo y anclaje de la ladera de la cárcava: Incluye la introducción de pivotes profundos en la pared cortada y la colocación de una malla, la cual se clava con clavos metálicos de 5 m de longitud y estacas retoñables de *Erythrina sp.*, *Gliricidia sepium* (debajo de

1500 msnm), *Salix sp.*, *Baccharis sp.* y otros colocadas en forma inclinada a 45°. Se aplicara en forma alterna los sistemas

- ⇒ estacas retoñables + *Vetiveria zizanoides* + malla;
- ⇒ estacas retoñables + *Cynodon sp.* + malla;
- ⇒ estacas retoñables + *Mucuna sp.* + malla. Las estacas se aplican a 1 m de distancia entre si, en línea a curva de nivel, con 4 m distancia entre curvas; la inserción se hace en un ángulo de 45° (100%).

4.17.8 Manejo del área de relleno

En la cuenca se ubican los áreas de relleno en la cercanía de los cauces, donde disminuye la pendiente de los cauces inicia el depósito del relleno: primero piedras mayores, después piedras menores, después grava y gravilla; al final arenas . Arcilla se deposita únicamente en aguas estancadas. En la cuenca existe un depósito mayor al lado sur del cauce principal, justamente arriba del puente Wana de la carretera principal, proveniente del deslizamiento que se ubica encima de dicho del depósito sobre la ladera sur. Todas las demás materiales provenientes de los deslizamientos están llevados cuenca abajo hacia la parte baja del Río Huixtla.

Este depósito también se encuentra sin vegetación aparente y es fácil arrastrable por los corrientes que se encuentran en su alrededor. Requiere de un urgente recubrimiento vegetativo y rehabilitación forestal, ya que es altamente erosiva. La orilla norte es abrazado permanentemente por el cauce principal.

En todo el área el recubrimiento vegetativo puede ocurrir mediante las siguientes actividades simultáneas:

- ⇒ colocación y anclaje de malla fijadora en todas las pendientes superiores a los 40 %.
- ⇒ siembra de pastos nativos rústicos, o pasto estrella (*Cynodon sp.*), o nescafé (*Mucuna sp.*)
- ⇒ siembra de especies pioneras, como son *Muntingia sp.*
- ⇒ plantación de estacas retoñables a distancia de 1 m en línea a curva de nivel y 5 m entre las líneas, con 45 ° de inclinación.

Si se van a colocar represas de gaviones en el cauce principal a lo largo de dicho relleno, se tiene que tener cuidado de no empotrar las gaviones en dicho material, ya que es muy inestable y no haya garantía de duración de dicha obra. Si se puede y se debe poner gaviones en el área, pero se tiene que empotrar hacia el material original. En está zona, donde el arrollo y el depósito se rozan por la misma inestabilidad no se recomienda hacer inversiones mayores, simplemente colocar bien las represas de gaviones, las cuales se van a llenar poco a poco de dicho material, formando una base controlado de flujo.

Como general se estima un costo para la rehabilitación de las áreas degradadas con las diferentes técnicas en 22, 000 \$/ha aproximadamente. Para rehabilitar las 36.61 ha de deslizamientos diversos el costo es de 805,420 \$ totales.

En el siguiente cuadro se resume la intervención en las superficies degradadas con su costo aproximado

Tabla 24. Actividades recomendadas, con sus superficies y costos asociadas

	uso recomendada	acción	área		costo \$/ha	costo total \$
			ha	%		
AF	agroforestería	establecer agroforestería	11.11	1.2	3,000	33,330
CF	cafetales	establecer cafetañes	41.30	4.4	9,000	371,700
CMT	cementerio	sin intervención	1.15	0.1		
DP	áreas degradadas	manejo integral áreas degradadas	36.61	3.9	22,000	805,420
FB	bosque existente	sin intervención	280.59	29.6		
FM	bosque mesófilo existente	sin intervención	12.59	1.3		
FRU	fruticultura existente	sin intervención	2.84	0.3		
P	pastizales	sin intervención	8.82	0.9		
RF	reforestación	reforestación, rehabilitación forestal	514.07	54.2	8,000	4,112,560
U	urbano	sin intervención	40.11	4.2		
		total	949.19	100.0		

4.18 Cambios de la erosión y producción de azolves que salen de la cuenca, con la propuesta de cambio de uso de suelo

Con las propuestas arriba mencionadas, aplicadas en el campo, se modifica el factor C y LS de tal manera, que haya una disminución enorme de la tasa de erosión. Los resultados de las diferencias se presentan en el Plano 12, Anexo cartográfico y en la siguiente tabla:

Tabla 25. Resultados de las tasas de erosión con el uso actual de suelo (2008), el uso recomendado y las diferencias

erosión t / ha año	media	superficie (ha)			volumen total (en 1000 t / año)		
		uso suelo 2008	uso rec	diferencia	uso de suelo 2008	uso rec	diferencia
urbano	0	40.11	40.11	0.00	0.000	0.000	0.000
0 a 10	5	18.24	21.41	3.17	0.091	0.107	0.016
10 a 25	17.5	15.84	15.82	-0.02	0.277	0.277	0.000
25 a 50	37.5	15.69	15.82	0.13	0.588	0.593	0.005
50 a 100	75	32.06	115.13	83.07	2.405	8.635	6.230
100 a 200	150	217.47	418.71	201.24	32.621	62.807	30.186
200 a 500	350	9.63	274.39	264.76	3.371	96.037	92.666
500 a 1000	750	55.74	8.39	-47.35	41.805	6.293	-35.513
1000 a 2000	1500	141.79	2.89	-138.90	212.685	4.335	-208.350
2000 a 5000	3500	30.29	6.28	-24.01	106.015	21.980	-84.035
5000 a 10'000	7500	42.37	18.82	-23.55	317.775	141.150	-176.625
10'000 a 30'000	20'000	293.56	11.42	-282.14	5871.200	228.400	-5642.800
30'000 a 200'000	115'000	36.40	0	-36.40	4186.000	0.000	-4186.000
total		949.19	949.19	0.00	10'774.832	570.612	-10'204.220

Ver Plano 12, Erosión con el uso de suelo recomendado, Anexo Cartográfico)

Se puede observar que hay una disminución de superficies con tasas de erosión extremas, superiores a los 500 t / ha año. Al multiplicar la masa erosionada con las superficies respectivas tenemos como resultado la erosión total, la cual es 10.774 millones de toneladas / año para toda la microcuenca bajo las condiciones actuales, mientras que con el cambio de uso de suelo sugerido la erosión esperado se

va a reducir por 10.204 millones de toneladas a aproximadamente 0.571 millones toneladas / año, lo cual es un resultado enorme, que significa una **reducción de 94.7 % de la erosión actual**.

Tabla 18. Resultados con los azolves esperados con y sin manejo:

icrocuenca	superficie ha	PD	erosión media 1000 t/año		azolves		Relación sin manejo/ con manejo	
					1000 t/año		erosión	azolves
			actual	con manejo	actual	con manejo		
BB	949.19	0.24	10774.832	570.61	2585.9597	136.9464	18.9	18.9

PD = proporción del desplazamiento de sedimento; Fuente: Robinson, 1979; in: Becerra Moreno, 1999, p. 186

La tasa de erosión, como la producción de azolves es 18.9 veces superior con la situación actual, que como sería con manejo de la cuenca.

4.19 Obras en cauces

Casi todos los cauces del área son cárcavas. Allí se establecen represas de gaviones con altura del caudal máximo de un retorno de 10 años, con un espaciamiento de pie- cabeza, considerando una pendiente de 3 % entre el pie de la represa superior a la cabeza de la represa inferior.

Estas gaviones se colocan en todas las pendientes. Al rellenar dichas represas con azolves quedan trechos entre represa y represa con pendientes de 3 %, donde el agua puede fluir lentamente. Ya no hay más profundización del cauce. Enfrente de cada represa hay un delantal empedrado que recibe el impacto de la caída, el resto del flujo va sobre una pendiente de 3 %, con un fondo de relleno de azolves.

Las represas de gavión y también de piedras acomodadas se pueden colocar únicamente en tramos con pendientes inferior a los 20 % para la estabilidad de la misma. Si la pendiente del tramo del cauce es superior, no se puede hacer nada. Se tiene que recibir todo el flujo que pasa por la sección empinado en forma indomado hasta que llegue a una super-represa, la cual será colocado en el primer tramo con una pendiente inferior a los 20 %. Tiene que ser diseñado para resistir fuerzas superiores, ancha, y más elevado que el nivel de agua de un retorno de 10 años, para rellenar un área suficiente de azolves ; estar anclado y empotrado superior a los demás represas que cuentan con vecinos superiores a distancia pie- cabeza.

Si el cauce es semipermanente y se seca durante la temporada seca, se puede y se debe empastarlo, además colocar en sus orillas estacas de especies de bosque de galería, como son *Salix sp.*, *Ficus sp.*, y racimos de *Phragmites* (carrizo) y *Bambusa sp.* (bamboo).

Si el cauce es permanente durante todo el año (el cauce principal), se establecen sobre la orilla en la zona de transición entre el flujo permanente y el deposito seco en tiempos de estiaje *Typhus sp* (tule), *Phragmites sp.* (carrizo), *Bambusa sp.* (bamboo) y *Salix sp.*; para la estabilización del material depositado.

En las mismas represas, una vez rellenos de azolves, se colocan estacas de *Salix sp.* y los demás especies mencionadas arroba para su estabilización.

Se puede calcular la distancia y la cantidad de obras transversales que se requiere:

$$d = H / (jc - 0.03) \quad \text{ec. 11}$$

$$C = Lc / d \quad \text{ec. 12}$$

donde:

d = distancia entre obra transversal, con la posición pié cabeza + 3 % pendiente en el cauce azolvado (m)

H = altura de la obra transversal

jc = pendiente del cauce entre las obras transversales (m/m)

C = cantidades de obras transversales (sin unidad)

Lc = longitud del cauce

Casi todas las laterales llevan pendientes superiores a los 20 %, con excepción de la parte más bajo de la microcuenca BBD, lo que son 250 m más abajo. Los que si se pueden construir son en las últimas 250 m del cauce BBD y en la mayor parte (81.3 %) del cauce principal.

Tabla 26. La necesidad de obras transversales: distancia (d) y cantidad de obras (C) por cada microcuenca interna, con su superficie, longitud de cauces (Lc), longitud de cauces con pendientes inferiores a los 20 %, las pendientes medias de estos tramos (j20%), suponiendo una altura de obras de 3m, 4m y de 5 m.

mc	superficie	Longitud de cauce	Pendiente de cauce	Desnivel de cauce	Lc en pendientes inferiores a 20 %	Pendientes medias inferiores a 20 %	Desnivel en pendientes medias inferiores a 20 %	Dist. entre obras Altura 5m	Cantidad Obras altura 5m	Dist. Entre obras Altura 4m	Cantidad obras altura 4m	Dist. Entre obras Altura 3m	Cantidad obras altura 3m
mc	S	Lc	jc	h1	Lc<20%	Jc<20%	h<20%						
	ha	m	m/m	m	m	m/m	m						
bba	239.47	3263	0.2176	710.03	2722	0.177	481.794	34.0	80	27.2	100	20.4	133
bbb	115.02	2067	0.3774	780.09	0	0	0						
bbc	20.45	536	0.1119	59.98	536	0.1119	59.9784	61.1	9	48.8	11	36.6	15
bbd	200.73	2979	0.2685	799.86	250	0.187	46.75	31.8	8	25.5	10	19.1	13
bbe	77.99	917	0.1091	100.04	917	0.1091	100.0447	63.2	15	50.6	18	37.9	24
bbf	97.18	2100	0.3571	749.91	0	0	0						
bbg	198.35	2151	0.0721	155.09	2151	0.0721	155.0871	118.8	18	95.0	23	71.3	30
BB	949.19	Suma: 14013							111		139		215
		6867	0.1493	1025.24									

Simbología:

mc = nombre de microcuenca interna

S = superficie de microcuenca (ha)

Lc = longitud del cauce principal de cada microcuenca (m)

Lc<20% = longitud del conjunto de tramos con pendientes inferiores a los 20 %

jc = pendiente media de cada cauce principal (m/m)

j<20% = pendiente media del tramo con pendientes inferiores a los 20 %. (m/m)

d = distancia entre obras transversales (m)

C-D = cantidad de obras transversales

H = altura de la obra transversal

Se requieren un total de 111 obras transversales de 5 m de altura, o 205 obras de 4 m de altura, o 347 obras de 3 m de altura. O una mezcla de todos.

4.20 Selección de obras

Como ya se puede observar en cauces con pendientes superiores a los 20 % por la misma inestabilidad del terreno no se debe construir ninguna obra.

Se seleccionaron las siguientes obras (ver plano 14: Obras transversales para control de avenidas):

Tabla 20. Obras seleccionadas para el control de avenidas en el cauce principal, y sus costos respectivas, considerando un costo unitario para gaviones de 2700 \$/m³ y 3600 \$/m³ de concreto reforzado; y un precio unitario de 75 000 \$ / dique- peine

Microcuencas / obras	3p	3dci	4gv	4dci	5gv	5dc	5dci	8dc	total
bba	35	2	7	3	1	3	2		53
bbb							1		1
bbc			5			2		1	8
bbd							1		1
bbe		1	10			3			14
bbf							1		1
bbg		2	10		10	3		1	26
total	35	5	32	3	11	11	5	2	104
costo unitario (1000 \$/repr)	75	4033.764	835.38	10075.27	1118.88	11431.17	15802.24	44933.62	
costo total (1000 \$)	2625	20168.82	26732	30225.81	12307.7	125742.9	79011.2	89867.24	386680.78

3p = "Dique – Peine" un dique de concreto reforzado, de 5 m de altura, con un gran vertedor de 4 m de altura y una anchura de 4/5 del cauce en su base. En el vertedor están colocadas varillas de acero galvanizado, que salen 3 m del nivel de la base del vertedor, formando así una represa filtrante que retiene escombros de grueso calibre. Esta represa se coloca en las cauces con pendientes mayores, cerca de los 20 %

3dci = dique de concreto reforzado, más amplia para resistir embates de fuertes flujos de agua y escombros; con agujeros, que lo hacen filtrable para el agua, pero retiene todo tipo de azolves, tiene 3 m de altura, sin vertedor. Esta represa se coloca donde se tiene que resistir fuerzas de flujos de agua y azolves, después de un tramo de un cauce con pendientes mayores, donde no se puede colocar estructuras

4gv = represa filtrante de gavión, de 4 m de altura. Esta represa se coloca en

4dci = dique de concreto reforzado, con agujeros, que permiten la filtración del agua, con mayor anchura para resistir empates de flujos extremos. Esta represa se coloca donde se tiene que resistir fuerzas de flujos de agua y azolves, después de un tramo de un cauce con pendientes mayores, donde no se puede colocar estructuras

5gv = represa filtrante de gavión, de 5 m de altura

5dc = dique de concreto reforzado, con agujeros, que permiten la filtración del agua, de 5 m de altura

5dci = dique de concreto reforzado, con agujeros, que permiten la filtración del agua, de 5 m de altura, con mayor anchura para resistir empates de flujos extremos. Esta represa se coloca donde se

tiene que resistir fuerzas de flujos de agua y azolves, después de un tramo de un cauce con pendientes mayores, donde no se puede colocar estructuras

8dc = dique de concreto reforzado, con agujeros, que permiten la filtración del agua, de 8 m de altura
Cálculo de volúmenes y costos de represas:

Tabla 27. Estimación aproximadamente de volúmenes de represas y sus costos unitarios

(3dci) Dique concreto, ancho, 3 m altura				800.35				
base	A ancho	10.00	arriba	A ancho	15.00	5. cuerpo	A ancho	0.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.00
	L largo	6.50		L largo	2.00		L largo	0.00
	volumen	65.00		volumen	30.00		volumen	0.00
delantal	A ancho	10.00	abajo	A ancho	12.00	vertedor	A ancho	3.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.50
	L largo	4.00		L largo	6.50		L largo	2.10
	volumen	40.00		volumen	78.00		volumen	3.15
detrás	A ancho	10.00	media	V media	54.00	Volumen calculado		800.35
	H alto	1.00		H alto	3.00	Volumen real		1120.49
	L largo	1.00		L media	4.25	Viajes requeridas		160.07
	volumen	10.00		volumen	688.50	Costo unitario (\$/m3)		3600
						Costo total (1000 \$ / represa)		4033.764

(4gv) Gavión de 4 m de altura				221.00				
espolón	A ancho	10.00	1. cuerpo	A ancho	16.00	5. cuerpo	A ancho	0.00
	H alto	0.50		H alto	1.00		H alto	0.00
	L largo	0.50		L largo	1.00		L largo	0.00
	volumen	2.50		volumen	16.00		volumen	0.00
platea	A ancho	10.00	2. cuerpo	A ancho	15.00	vertedor	A ancho	3.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.50
	L largo	5.00		L largo	2.00		L largo	1.00
	volumen	50.00		volumen	30.00		volumen	1.50
lengüeta	A ancho	10.00	3. cuerpo	A ancho	14.00	Volumen calculado		221.00
	H alto	1.00		H alto	1.00	Volumen real		309.4
	L largo	3.00		L largo	3.00	Viajes requeridas		44.2
	volumen	30.00		volumen	42.00	Costo unitario (\$/m3)		2700
			4. cuerpo	A ancho	13.00	Costo total (1000 \$ / represa)		835.38
				H alto	1.00			
				L largo	4.00			
				volumen	52.00			

(4dc) Dique de concreto, 4 m de altura				1395.59				
base	A ancho	10.00	arriba	A ancho	16.00	5. cuerpo	A ancho	0.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.00
	L largo	8.00		L largo	2.00		L largo	0.00
	volumen	80.00		volumen	32.00		volumen	0.00
delantal	A ancho	10.00	abajo	A ancho	12.00	vertedor	A ancho	3.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.70
	L largo	3.00		L largo	8.00		L largo	2.10
	volumen	30.00		volumen	96.00		volumen	4.41
						Volumen calculado		1395.59
detrás	A ancho	10.00	media	V media	64.00	Volumen real		1953.826
	H alto	1.00		H alto	4.00	Viajes requeridas		279.118
	L largo	1.00		L media	5.00	Costo unitario (\$/m3)		3600
	volumen	10.00		volumen	1280.00	Costo total (1000 \$ / represa)		7033.7736

(4dci) Dique concreto, ancha, 4 m altura				1995.49				
base	A ancho	10.00	arriba	A ancho	16.00	5. cuerpo	A ancho	0.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.00
	L largo	9.00		L largo	3.00		L largo	0.00
	volumen	90.00		volumen	48.00		volumen	0.00
delantal	A ancho	10.00	abajo	A ancho	12.00	vertedor	A ancho	3.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.70
	L largo	3.00		L largo	9.00		L largo	3.10
	volumen	30.00		volumen	108.00		volumen	6.51
						Volumen calculado		1995.49
detrás	A ancho	10.00	media	V media	78.00	Volumen real		2793.686
	H alto	1.00		H alto	4.00	Viajes requeridas		399.098
	L largo	1.00		L media	6.00	Costo unitario (\$/m3)		3600
	volumen	10.00		volumen	1872.00	Costo total (1000 \$ / represa)		10057.2696

(5gv) gavión de 5 m de altura				296.00				
espolón	A ancho	10.00	1. cuerpo	A ancho	17.00	5. cuerpo	A ancho	13.00
	H alto	0.50		H alto	1.00		H alto	1.00
	L largo	0.50		L largo	1.00		L largo	5.00
	volumen	2.50		volumen	17.00		volumen	65.00
platea	A ancho	10.00	2. cuerpo	A ancho	16.00	vertedor	A ancho	3.00
	H alto	1.00		H alto	1.00		H alto	0.50
	L largo	5.00		L largo	2.00		L largo	1.00
	volumen	50.00		volumen	32.00		volumen	1.50
						Volumen calculado		296.00
lengüeta	A ancho	10.00	3. cuerpo	A ancho	15.00	Volumen real		414.4
	H alto	1.00		H alto	1.00	Viajes requeridas		59.2
	L largo	3.00		L largo	3.00	Costo unitario (\$/m3)		2700
	volumen	30.00		volumen	45.00	Costo total (1000 \$ / represa)		1118.88
			4. cuerpo	A ancho	14.00			
				H alto	1.00			
				L largo	4.00			

				volumen	56.00				
--	--	--	--	---------	-------	--	--	--	--

(5dc) Dique de concreto, 5 m de altura				2268.09							
base	A	ancho	10.00	arriba	A	ancho	17.00	5. cuerpo	A	ancho	0.00
	H	alto	1.00		H	alto	1.00		H	alto	0.00
	L	largo	9.50		L	largo	2.00		L	largo	0.00
		volumen	95.00			volumen	34.00			volumen	0.00
delantal	A	ancho	10.00	abajo	A	ancho	12.00	vertedor	A	ancho	3.00
	H	alto	1.00		H	alto	1.00		H	alto	0.70
	L	largo	4.00		L	largo	9.50		L	largo	2.10
		volumen	40.00			volumen	114.00			volumen	4.41
								Volumen calculado			2268.09
detrás	A	ancho	10.00	media	V	media	74.00	Volumen real			3175.326
	H	alto	1.00		H	alto	5.00	Viajes requeridas			453.618
	L	largo	1.00		L	media	5.75	Costo unitario (\$/m3)			3600
		volumen	10.00			volumen	2127.50	Costo total (1000 \$ / represa)			11431.1736

(5dci) Dique concreto, ancho, 5 m altura				3135.37							
base	A	ancho	10.00	arriba	A	ancho	17.00	5. cuerpo	A	ancho	0.00
	H	alto	1.00		H	alto	1.00		H	alto	0.00
	L	largo	10.50		L	largo	3.00		L	largo	0.00
		volumen	105.00			volumen	51.00			volumen	0.00
delantal	A	ancho	10.00	abajo	A	ancho	12.00	vertedor	A	ancho	3.00
	H	alto	1.00		H	alto	1.00		H	alto	0.70
	L	largo	4.00		L	largo	10.50		L	largo	3.10
		volumen	40.00			volumen	126.00			volumen	6.51
								Volumen calculado			3135.37
detrás	A	ancho	10.00	media	V	media	88.50	Volumen real			4389.511
	H	alto	1.00		H	alto	5.00	Viajes requeridas			627.073
	L	largo	1.00		L	media	6.75	Costo unitario (\$/m3)			3600
		volumen	10.00			volumen	2986.88	Costo total (1000 \$ / represa)			15802.2396

(8dc) Dique de concreto, 8 m de altura				8915.40							
base	A	ancho	10.00	arriba	A	ancho	20.00	5. cuerpo	A	ancho	0.00
	H	alto	1.50		H	alto	1.00		H	alto	0.00
	L	largo	15.00		L	largo	3.00		L	largo	0.00
		volumen	225.00			volumen	60.00			volumen	0.00
delantal	A	ancho	10.00	abajo	A	ancho	12.00	vertedor	A	ancho	3.00
	H	alto	1.00		H	alto	1.00		H	alto	1.00
	L	largo	5.00		L	largo	15.00		L	largo	3.20
		volumen	50.00			volumen	180.00			volumen	9.60
								Volumen calculado			8915.40
detrás	A	ancho	10.00	media	V	media	120.00	Volumen real			12481.56
	H	alto	1.00		H	alto	8.00	Viajes requeridas			1783.08
	L	largo	1.00		L	media	9.00	Costo unitario (\$/m3)			3600
		volumen	10.00			volumen	8640.00	Costo total (1000 \$ / represa)			44933.616

Falta todavía atender los cauces secundarios laterales de la cuenca. Por el alto costo que esto implica se está atendiendo únicamente las partes más bajas del cauce principal. El costo de las obras transversales que se presentan en el Plano 14 “obras transversales para el control de avenidas” es de 368.7 millones de pesos.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La cuenca BB Arroyo Agua Fría es una microcuenca en la cuenca alta del río Huixtla, Costa de Chiapas. Es una fuerte productora de azolves para la cuenca. Y casi no tiene capacidad de detener la lluvia precipitada, por la falta de superficies mayores arbóreas. Es una de las cuencas que causan los impactos catastróficas de avalanchas de lodo e inundaciones cuencas abajo.

Allí se tiene que intervenir, primero rehabilitar la cubierta vegetal arbórea y detener la erosión con muros vivos y reforestación. Al mismo tiempo se tiene que construir obras de gaviones para encauzar el flujo y detener el crecimiento del cauce.

Puede ser una cuenca para un proyecto piloto de rehabilitación de cuencas degradadas con impactos catastróficas cuencas abajo.

6 BIBLIOGRAFÍA

Becerra Moreno, 1999; Escorrentía, Erosión y Conservación de Suelos; Univ. Autónoma de Chapingo, 1999.

CNA, CP, 2007; Caracterización y Diagnóstico de Microcuencas de la region XIII, Valle de México, Zona sureste (Texcoco); Contrato No. OCAVM – GOA-MEX-07-403-RF-CC; Memoria. Colegio Postgraduados Montecillos; Edo. Mex; 2007

Córtes T., Medina M., Arellano M., Baumann, Rodríguez M., 2008; La Lluvia y su potencial erosivo en la Costa de Chiapas; IV Seminario Internacional de Uso Integral del Agua

Figueroa S., Amante O., Cortes T., Pimentel L., Osuna C., Rodríguez O., Morales F., 1991; Manual de Predicción de Pérdidas de suelos por Erosión; Colegio de Postgraduados; Montecillo, Chapingo; Edo Mex; 1991; SARH

López Cadenas, Fernández T., Gómez M., Segura G., Almansa L., Alonso F., Baratech T., Bartolomé N., Cocero A., Delgado S., Del Pozo M., Gonzalez R., Montalvo M., Nicolás R., Rabade B., Tejera G., Tejero G., Torrente P., Tourné W., 1994; Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión; Coed TRAGSA, TRAGSATEC; ed Mundi- Prensa, Madrid 1994

Robinson; 1979; Sediment yield as function of upstream erosion: in: Universal Soil Loss Equation; Past present and Future. SSSA Spetial Publication num. 8. USA, pags, 7-16