



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**SISTEMAS DE BIOINGENIERÍA PARA EL CONTROL Y  
APROVECHAMIENTO DE ZONAS DE CÁRCAVAS, EN LA MIXTECA  
OAXAQUEÑA**

VERONICA GUADALUPE LIRA CABALLERO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

2016

La presente tesis titulada: “**Sistemas de bioingeniería para el control y aprovechamiento de zonas de cárcavas, en la Mixteca Oaxaqueña**”, realizada por la alumna **Verónica Guadalupe Lira Caballero**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**HIDROCIENCIAS**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO



DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENES

ASESOR



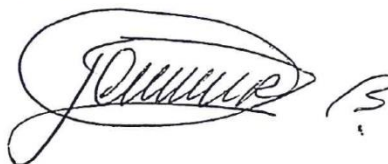
DRA. ANGÉLICA ROMERO MANZANARES

ASESOR



DR. EDMUNDO GARCÍA MOYA

ASESOR



MC. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre 2016.

# **SISTEMAS DE BIOINGENIERÍA PARA EL CONTROL Y APROVECHAMIENTO DE ZONAS DE CÁRCAVAS, EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA**

Verónica Guadalupe Lira Caballero, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2016

## **RESUMEN**

La degradación de los terrenos provocada por la erosión en cárcavas, representa un problema grave que demanda de un plan integrado para su control. Las prácticas de bioingeniería, representan un método eficaz para ir recuperando áreas con cárcavas, al combinar los beneficios de la vegetación con las medidas estructurales. En esta investigación, se implementaron y evaluaron prácticas de bioingeniería para restaurar una zona de cárcavas, en la microcuenca “Santa María Tiltepec”, localizada en el municipio de San Pedro Topiltepec, Oaxaca. Para la restauración, se ubicó, caracterizó, rehabilitó e incrementó la capacidad de almacenamiento de la presa de piedra acomodada construida hace más de 30 años por los pobladores en la cárcava principal del sistema de drenaje. Además, se diseñaron y establecieron ocho barreras vivas aguas arriba de la presa de piedra, sobre la cárcava principal y ramales aledaños. Se calculó la cantidad de sedimentos retenidos por la presa de piedra y por las barreras vivas, con base en levantamientos topográficos previos a la rehabilitación y al establecimiento de las barreras de colorín (*Erythrina americana*); y posterior a la temporada de lluvia. El sedimento retenido en la presa de piedra antes de la rehabilitación fue de 5,987 Mg y después de la rehabilitación fue de 964 Mg y las barreras vivas retuvieron 340 Mg con una retención total de 1,340 Mg para el año de 2015 que representa una degradación específica de 35.27 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La línea base de vegetación asociada a las cárcavas donde se establecieron las prácticas se definió muestreando las especies existentes en el lecho, el talud y la cima de sus secciones transversales de las cárcavas. La caracterización de la vegetación, permitió definir las especies vegetales dominantes en las diferentes posiciones de la cárcava y sus atributos botánicos para dar protección y estabilidad al suelo de las cárcavas.

**Palabras clave:** erosión, recuperación, barreras vivas, repoblación natural.

# **BIOENGINEERING SYSTEMS FOR CONTROL AND USE OF GULLY AREAS, AT THE MIXTECA OAXAQUEÑA**

Verónica Guadalupe Lira Caballero, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2016

## **ABSTRACT**

Land degradation caused by erosion in gullies, represents a serious problem that demands an integrated plan for its control. Bioengineering practices, represent an effective method for recovering gully areas by combining the benefits of vegetation with structural measures. In this research, bioengineering practices were implemented and evaluated to restore a gully zone in the "Santa María Tiltepec" micro-basin, located in the municipio of San Pedro Topiltepec, Oaxaca. The check dam built more than 30 years ago by the people in the main drainage system was located, characterized, rehabilitated and the sediment retained was estimated. In addition, 8 living barriers were designed and established upstream of the check dam, over the main gully and adjacent gullies. The amount of sediment retained by the check dam and the living barriers was calculated based on topographic surveys prior to rehabilitation and the establishment of *Erythrina americana* and after the rainy season. The sediment retained in the check dam prior to rehabilitation was 5.987 Mg and after rehabilitation was 964 Mg and the live barriers retained 340 Mg with a total retention of 1340 Mg by the year 2015 representing a specific degradation of 35.27 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The baseline vegetation associated with the gullies where the practices were established was defined by sampling the existing species in the bed, the slope and the top of its cross sections of the gullies. The characterization of the vegetation allowed to define the dominant plant species in the different positions of the gully and its botanical attributes to give protection and stability to the ground of the gullies.

**Key words:** erosion, reclamation, living barriers, revegetation.



## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por facilitar los medios, para el desarrollo social, intelectual y personal de cada uno de los estudiantes que aquí nos formamos.

Un especial agradecimiento a la World Wildlife Fund (WWF) por el apoyo brindado en la realización de esta investigación.

Dr. Mario R. Martínez Menez, gracias infinitas por apoyarme con paciencia, dedicación, cariño y sabiduría en esta investigación y en mi vida.

Dra. Angélica Romero Manzanares, mi gratitud completa por su apoyo, comprensión y guía.

Dr. Edmundo García Moya, mi más sincero agradecimiento por su apoyo y por su valiosa contribución en el desarrollo de este trabajo.

M.C. José Donald Ríos Berber, por el tiempo y empeño dedicado en la realización de este documento, gracias profe.

M.C. Erasmo Rubio Granados, gracias porque su apoyo y orientación que enriquecieron este trabajo.

Dr. Mario Luna Cavazos, por su orientación en el análisis estadístico de los datos de vegetación.

Dr. Héctor Flores Magdaleno, M.C. Víctor Gordillo e Ing. Moisés Venegas, por su apoyo en la realización del vuelo con el vehículo aéreo no tripulado (VANT) para esta investigación.

A Carlos Palacios, Gloria Rojas, Iralda Pérez, Isabel Villa, Mary Hernández y Roberto López, mi completa gratitud por su apoyo durante la realización de este trabajo.

## DEDICATORIA

Dios...mi guía

Por tu infinita bondad y amor.

Victoria...mi motivo más dulce

Hija, no tengo como agradecerle a Dios por traerte a mi vida, eres mi alegría, mi luz, mi inspiración, mi fortaleza, mi amor.

Mi esposo...el amor de mi vida

Dios me ha dado la dicha de llenar mi vida con tu amor y solo le pido que me permita caminar a tu lado hasta el último de mis días. Carlos, te dedico con todo mi amor este logro que fue posible gracias a tu apoyo, amor y comprensión. Te amo.

Antonio y Alejandra...mi ejemplo de lucha

Papas, les dedico el esfuerzo invertido en este trabajo, solo como una modesta muestra de todo el amor y la gratitud que siento por ustedes. Los amo.

Azulita, Sofi y Abraham...la chispa de mi andar

Mis pequeños sobrinos, gracias por llenar mi vida de alegría y cariño. Son mi adoración.

Antonieta...mi apoyo incondicional

Hermana, en la distancia, en el espacio y en el tiempo, siempre ahí. Como te quiero.

Ale...mi orgullo

Hermanito, quiero expresarte la admiración y el cariño que siento por ti, dedicándote este trabajo

Sanch y Oscar

Mis queridos cuñados, gracias por cuidar con amor de mis hermanos y por apoyarme como mi familia.

Familia Basaldúa Ramírez

Quiero agradecerles por apoyarme y quererme como una integrante más de su familia.

Amigas y amigos,

Gracias por acompañarme y apoyarme

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
2.1. Erosión del suelo.....	5
2.2. Proceso de erosión en cárcavas.....	7
2.2.1. Causas de la formación de cárcavas.....	7
2.2.2. Factores que inciden en la formación y desarrollo de cárcavas.....	7
2.2.3. Clasificación de cárcavas.....	10
2.2.4. Crecimiento de las cárcavas.....	11
2.2.5. Procesos hidráulicos que inciden en la formación de cárcavas.....	12
2.2.6. Consecuencias de la erosión en cárcavas.....	15
2.3. Control de cárcavas.....	16
2.3.1. Estructuras permanentes .....	17
2.3.2. Estructuras temporales .....	19
2.3.3. Bioingeniería.....	21
2.4. Experiencias del control de la erosión en cárcavas.....	35
2.4.1. CONAFOR .....	35
2.4.2. SAGARPA.....	36
2.4.3. CONAGUA.....	37
2.4.4. Experiencias de productores .....	38
2.4.5. Lama bordo .....	38
2.4.6. Control de cárcavas de los productores .....	39
2.5. Evaluación de obras y prácticas para el control de la erosión en cárcavas .....	40
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
3.1. Descripción del área de estudio.....	44
3.1.1. Localización.....	44

3.1.2.	Caracterización del medio biofísico de la microcuenca .....	45
3.2.	Localización y caracterización de las obras de conservación existentes .....	51
3.3.	Caracterización de las cárcavas del área de estudio .....	53
3.3.1.	Perfil Longitudinal de la cárcava que aporta sedimentos a la presa .....	53
3.3.2.	Red de drenaje.....	54
3.4.	Diseño y ubicación de prácticas de bioingeniería. ....	56
3.4.1.	Muestreo de suelo. ....	58
3.5.	Evaluación de las prácticas de bioingeniería.....	61
3.5.1.	Volumen de sedimentos retenidos en la presa de piedra acomodada .....	61
3.5.2.	Estimación de escurrimientos y producción de sedimentos .....	63
3.5.3.	Volumen de sedimentos retenidos en las barreras vivas.....	67
3.1.	Muestreo de vegetación.....	68
3.2.	Identificación de especies.....	71
3.3.	Análisis de datos.....	72
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	72
4.1.	Topografía, cobertura vegetal y manejo de los terrenos de la zona de trabajo .....	73
4.2.	Parámetros morfométricos de la zona de trabajo .....	75
4.3.	Delimitación de área de drenaje de la microcuenca. ....	76
4.4.	Precipitación y predicción de escurrimientos y sedimentos.....	78
4.5.	Retención de sedimentos antes de la rehabilitación de la presa de piedra acomodada ..	83
4.6.	Retención de sedimentos después de la rehabilitación de la presa .....	85
4.7.	Barreras vivas para el control de azolves .....	87
4.8.	Estimación de los sedimentos retenidos en las barreras vivas .....	92
4.9.	Características de los suelos y de los sedimentos retenidos en la zona de estudio .....	95
4.9.1.	Propiedades de los suelos muestreados.....	95
4.9.2.	Propiedades de los sedimentos retenidos en las obras de control de azolves .....	100
4.10.	Línea base de vegetación .....	102
5.	CONCLUSIONES.....	109
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	109
7.	APÉNDICES .....	120

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formas de erosión.....	5
Figura 2. Procesos de erosión del suelo. ....	6
Figura 3. Movimiento en masa de suelos que originan la formación cárcavas. ....	9
Figura 4. Formación de túneles. ....	9
Figura 5. Formas de las secciones transversales de las cárcavas. ....	10
Figura 6. Componentes de una cárcava. ....	11
Figura 7. Procesos de erosión remontante y lateral en las cárcavas.....	12
Figura 8. Crecimiento de cárcavas en los taludes hasta el afloramiento del tepetate y roturación de tepetate.....	16
Figura 9. Crecimiento de cárcavas con drenaje complejo. ....	16
Figura 10. Presas permanentes para el control de azolves.....	18
Figura 11. Presas temporales para el control de azolves. ....	20
Figura 12. Sistema de bioingeniería para la recuperación de cárcavas (CONAFOR, 2007).....	23
Figura 13. Sistema de bioingeniería para la recuperación de cárcavas (WWF, 2015). ....	24
Figura 14. Mecanismos de la vegetación para reducir procesos hidrológicos (a) y de erosión del suelo (b). .....	25
Figura 15. Empalizada. ....	26
Figura 16. Fajinas. ....	26
Figura 17. Geomallas. ....	27
Figura 18. Capas de enramado. ....	28
Figura 19. Empastado de taludes ....	28
Figura 20. Terraza de muro vivo.....	29
Figura 21. Barreras de especies vegetales (a), Barreras vivas con troncos y costales y tierra (b) y Otras barreras vivas (c).....	30
Figura 22. Colorín especie utilizada como barrera viva para el control de la erosión en cárcavas. ....	32
Figura 23. Carrizo especie utilizada como barrera viva para el control de la erosión en cárcavas. ....	33
Figura 24. Uso del zacate Vetiver para el control de la erosión en cárcavas ....	34
Figura 25. Especies utilizadas como barreras vivas en Chiapas, México. ....	35
Figura 26. Presas de piedra acomodada para el control de la erosión en cárcavas ....	36
Figura 27. Proyectos integrales de conservación del suelo y agua ....	37
Figura 28. Acciones de restauración hidrológica (CONAGUA, 2012) ....	38
Figura 29. Sistemas de lama bordo en la zona de Tiltepec, Oaxaca (Fotos 2013). ....	39
Figura 30. Barreras vivas construidas para el control de cárcavas (Fotos 2013). ....	40
Figura 31. Presas filtrantes de gaviones construidas para retener azolves.....	41
Figura 32. Muro de contención (gaviones y tierra) para retener azolves. ....	42
Figura 33. Evaluación de la retención de suelo en el sistema de Lama Bordo ....	43
Figura 34. Localización de la micro-cuenca Santa María Tiltepec, San Pedro Topiltepec, Oaxaca . ....	44
Figura 36. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la zona de estudio ....	47
Figura 37. Presencia de material parental en la zona de estudio.....	49
Figura 38. Presencia de vegetación en las geoformas del área de estudio. ....	50
Figura 39. Sistema de drenaje de la zona de estudio ....	51
Figura 40. Presa de piedra acomoda y sus dimensiones ....	52

Figura 41. Presa de piedra acomodada antes y después. ....	53
Figura 42. Levantamiento del perfil longitudinal de la cárcava principal .....	53
Figura 43. Sistema de drenaje identificado con imágenes de satélite .....	54
Figura 44. Vehículo aéreo no tripulado y GPS de precisión utilizados en el área de estudio .....	55
Figura 45. Ubicación de las presas de ramas a construir como parte del sistema de bioingeniería.....	56
Figura 46. Sección transversal de la cárcava 1 donde se estableció una barrera viva. ....	57
Figura 47. Etapas en la construcción de barreras vivas. ....	57
Figura 48. Muestreo de suelos en cárcavas y áreas de captación de sedimentos de presas.....	59
Figura 49. Conductividad hidráulica estimada con el permeámetro de carga constante .....	60
Figura 50. Esquema para el cálculo de la altura de los sedimentos. ....	62
Figura 51. Estimación del volumen de sedimentos retenidos en la presa de piedra acomodada.....	63
Figura 52. Levantamiento de las secciones transversales de las cárcavas con barreras vivas .....	67
Figura 53. MDE de una cárcava para antes y después de establecer una barrera viva.....	68
Figura 54. Diagrama del modelo para la estimación de escurrimientos y sedimentos en cuencas.....	69
Figura 55. Vista frontal del esquema de muestreo. ....	70
Figura 56. Vista aérea del esquema de muestreo.....	70
Figura 57. Colecta y herborización de especies. ....	71
Figura 58. Topografía y pequeñas terrazas construidas por los productores en parte de la zona de estudio .....	74
Figura 59. Mapa de cobertura del suelo. ....	75
Figura 60. Parámetros morfométricos de la microcuenca de “Santa María Tiltepec”. ....	76
Figura 61. Áreas de influencia de cada barrera viva construida. ....	77
Figura 62. Perfiles longitudinales de las áreas de drenaje de las cárcavas seleccionadas. ....	78
Figura 63. Distribución de la lluvia en el área de estudio.....	79
Figura 64. Características de la lluvia en el área de influencia de la zona de estudio. ....	79
Figura 65. Precipitación, escurrimientos y producción de sedimentos en la microcuenca de Tiltepec. ....	81
Figura 66. Perfil longitudinal de la cárcava principal (De la cortina a la zona de depósito de sedimentos). .....	83
Figura 67. Perfil isométrico de sedimentos retenidos en la presa de Santa María Tiltepec. ....	84
Figura 68. Rehabilitación de la presa de piedra ubicada en la parte baja de la zona de cárcavas en “Santa María Tiltepec”......	86
Figura 69. Ubicación de las barreras vivas y sus secciones transversales .....	88
Figura 70. Barreras vivas antes y después de los eventos de lluvia del 2015. ....	89
Figura 71. Barreras vivas con ancho, longitud y profundidad de azolves retenidos. ....	90
Figura 72. Escalonamiento de las barreras vivas aguas arriba para la estabilización de las cárcavas. ....	91
Figura 73. Barreras vivas que se colapsaron con las avenidas extraordinarias. ....	91
Figura 74. Levantamiento de precisión con curvas de nivel a cada 0.5 m en cárcavas de Tiltepec. ....	92
Figura 75. Perfiles isométricos de antes y después de las cárcavas con barreras vivas .....	93
Figura 76. Frecuencias relativas y acumuladas de la distribución del tamaño de partículas. ....	97
Figura 77. Curvas granulométricas de los suelos de diferentes sitios (a) lecho; b) Talud y c) Cima). ....	98
Figura 78. Diagrama de ordenación del DCA. ....	103
Ver acrónimos para relacionar las especies en el Apéndice B.....	103
Figura 79. Diagrama de ordenación del DCA. ....	104

La clave de los sitios de muestreo es: Cima Derecha (CD), Talud Derecho (TD), Lecho (L), Talud Izquierdo (TI) y Cima Izquierda (CI) y van del sitio 1 al 8 (S1 a S8). .....	104
Figura 80. Dendrograma por cobertura. ....	105
Figura 81. Dendrograma por presencia-ausencia. ....	106

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de obras y prácticas para el control de cárcavas. ....	17
Cuadro 2. Principales especies propagadas como barreras vivas. ....	31
Cuadro 3. Estimación de los volúmenes de azolves retenidos en el área con cárcavas .....	42
Cuadro 4. Análisis de la lluvia máxima en 24 horas en la zona de estudio. ....	46
Cuadro 5. Precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno .....	46
Cuadro 6. Características de los suelos de la región.....	48
Cuadro 7. Escurrimientos máximos estimados (Qp) para diferentes periodos de retorno .....	51
Cuadro 8. Escala Braun-Blanquet a cobertura en por ciento. ....	72
Cuadro 9. Parámetros utilizados en el modelo MUSLE para la microcuenca de Tiltepec. ....	80
Cuadro 10. Variables hidrológicas estimadas en la zona de estudio.....	81
Cuadro 11. Variables hidrológicas diarias generadas con el modelo MUSLE .....	82
Cuadro 12. Volúmenes de sedimento retenidos por la presa de piedra acomodada.....	84
Cuadro 13. Acumulación de sedimentos en la cárcava aguas arriba de la presa. ....	85
Cuadro 14. Volumen de sedimentos retenidos por la presa sobre – elevada. ....	86
Cuadro 15. Sedimentos acumulados a lo largo del perfil longitudinal de la cárcava. ....	87
Cuadro 16. Volumen, peso de sedimentos y degradación específica de los suelos. ....	94
Cuadro 17. Azolves retenidos por la presa y barreras vivas en el 2015.....	95
Cuadro 18. Propiedades de los suelos del área de estudio. ....	96
Cuadro 19. Características de la distribución del tamaño de las partículas de los suelos. ....	98
Cuadro 20. Erosionabilidad de los suelos en el lecho, talud y cima de la zona de estudio. ....	100
Cuadro 21. Características de los sedimentos y suelos cercanos a la presa y barreras.....	101
Cuadro 22. Comparación de medias entre las propiedades de los sedimentos y los suelos. ....	102

## 1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo, es uno de los procesos de degradación de la tierra que disminuye su potencial para ofrecer bienes y servicios a la población y se define como el proceso de remoción, transporte y deposición de partículas del suelo por el agua o el viento (FAO, 1994; Ortiz et al., 1994). En México, según datos de la SEMARNAT (2012), el 11.9% de la superficie del país se encuentra afectada por la erosión hídrica y el 9.5% por la erosión eólica. Bolaños et al. (2016) indican que el 76% del territorio presenta algún grado de erosión hídrica (leve 37.06% y moderado 26.37%).

La erosión hídrica se presenta en forma laminar, en surcos y en cárcavas, siendo esta última la forma más avanzada de erosión y se presenta cuando se desarrollan canales profundos formados por el flujo concentrado que se mueve pendiente abajo lo que favorece su crecimiento lateral, en longitud y en profundidad (Osman, 2013; Blanco y Lal, 2010). Debido a que las cárcavas se encuentran en constante crecimiento, su control se vuelve complejo por lo que es necesario un plan integral para recuperar zonas con cárcavas.

La Mixteca Oaxaqueña, es una región con alta degradación de sus recursos naturales provocada por el sobrepastoreo, la sobreexplotación de sus recursos maderables y el abandono de los sistemas agrícolas tradicionales. En un estudio presentado por Narváez (1991), se estimó que el 39 % de la superficie de la Mixteca (referido a un área de 1,548,597 ha) presentaba erosión moderada, 46 % alta y 13 % muy alta. La erosión alta y muy alta está relacionada con zonas degradadas con cárcavas de diferentes dimensiones que se muestran como paisajes lunares con una alta densidad de drenaje con un acelerado crecimiento, con escasa vegetación y una gran producción de sedimentos.

A nivel local, los terrenos con cárcavas son comunales, han sido abandonados y sometidos al pastoreo lo que no permite el desarrollo de la vegetación para su protección; también se han implementado sistemas tradicionales de control de cárcavas como la construcción de barreras viva con especies nativas y el denominado “Lama bordo”, que consiste en la construcción de bordos de tierra o de piedra en las cárcavas para retención de sedimentos y posteriormente ser aprovechadas para cultivar; sin embargo, se trata de esfuerzos aislados.

El control de cárcavas tradicional realizado por los programas de gobierno considera la construcción de estructuras tanto temporales como permanentes (presas de control de azolves), con altos costos de inversión, de mantenimiento y en algunos casos, al evaluarse su eficiencia en la retención de azolves, se ha observado que el sistema presenta baja efectividad (Villa, 2014).

La combinación de obras estructurales permanentes en la cárcava principal y de barreras vivas en las secciones transversales de las cárcavas afluentes, han probado su eficiencia para el control de cárcavas al reducir la velocidad del flujo y propiciar el depósito de las partículas arrastradas por el escurrimiento. Esta combinación es conocida como un sistema de bioingeniería que utiliza la



vegetación (presas temporales) y presas permanentes con piedra acomodada que han permitido la retención de azolves y el repoblamiento vegetal apoyando la restauración de cárcavas (Reubens et al. 2008 y Desta y Adugna, 2012).

En este trabajo se implementaron y evaluaron prácticas de bioingeniería en la restauración de cárcavas en una microcuenca de la Mixteca Oaxaqueña. En el área de estudio se realizó una caracterización morfométrica utilizando un vehículo aéreo no tripulado (DRON) y un GPS de precisión para obtener un modelo digital de elevaciones 0.26 m por pixel para obtener un mapa topográfico con curvas a nivel de 1 m. La presa de piedra acomodada existente se encontraba totalmente azolvada y con un levantamiento topográfico se obtuvo el volumen de azolves retenido.

La estrategia de restauración, consideró rehabilitar y sobre-elevar la cortina de la presa, además de establecer barreras vivas con *Erythrina americana* (colorín o pipal) en seis cárcavas afluentes a la presa. Se realizaron levantamientos topográficos de las secciones transversales de las cárcavas antes y después de las obras para obtener los volúmenes de azolves retenidos y la degradación específica de las áreas de drenaje de cada barrera y de la presa sobre elevada. Se muestrearon los suelos y sedimentos para determinar los cambios en los contenidos de materia orgánica. Finalmente, se realizó un muestreo de vegetación para definir una línea base de las especies vegetales que se desarrollan en los taludes, lecho y cima y cuáles son sus características para proteger el suelo de los procesos erosivos.

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

La erosión hídrica del suelo es una de las formas más importantes de la degradación de los suelos en el mundo. Se ha estimado que las actividades del hombre han impactado alrededor de 1,094 millones de hectáreas de las cuales, el 43% presentan deforestación y remoción de la vegetación natural, el 29 % tienen sobrepastoreo, en el 24% se realizan prácticas de manejo de terreno agrícola y el 4 % tienen vegetación natural (Walling and Fang, 2003).

En México, la degradación de los suelos afecta el 45.2% del territorio nacional, asociados con las actividades agrícolas (17.5%), deforestación (7.4%), sobrepastoreo (17.5%) y el resto por urbanización y sobreexplotación de la vegetación natural. Como parte de la degradación de los suelos destaca la erosión hídrica, que cubre más de 23 millones hectáreas (SEMANART-CP, 2003) y la erosión en cárcavas que es el proceso más avanzado.

La Mixteca oaxaqueña se caracteriza por sus altos índices de deterioro ambiental provocado por el sobrepastoreo, la sobreexplotación de los recursos forestales, el abandono de las prácticas tradicionales de conservación de suelo y agua, y la migración (Rivas, 2008; Nuñez y Marten, 2013; Martínez, 2006). Actualmente la región sufre de uno de los índices de erosión más altos del planeta y una alta proporción de terrenos no se cultivan; diversos estudios indican que en esta

región alrededor del 95% de la superficie presenta erosión en grados de moderado a severa donde domina la presencia de cárcavas (Contreras *et al.* 2005; Simosa, 1985).

La erosión en cárcavas es uno de los procesos erosivos más complejos y difíciles de controlar ya que se caracteriza por el desarrollo de secciones transversales que cambian irregularmente en el lecho y en los taludes; las cárcavas presentan crecimiento longitudinal, lateral y en profundidad acelerado, producto de la capacidad de remoción y transporte del flujo superficial concentrado en la cárcava y de la inestabilidad de los taludes de las mismas (Poesen *et al.* 1996; Osman, 2013).

El desarrollo y formación de cárcavas es una función del tipo de material parental, del clima, la topografía, la susceptibilidad del suelo a ser removido y transportado por los escurrimientos y la vegetación. Las cárcavas provocan la pérdida de superficie cultivable, incrementan la densidad de drenaje, provocan movimientos en masa de los suelos, deslave de taludes y aportan sedimentos que reducen la capacidad de las obras de almacenamiento aguas abajo y la contaminación de los cuerpos de agua (Poesen, 2003; Valentin *et al.* 2005; Gómez *et al.* 2011).

La dinámica de crecimiento de la cárcava y la irregularidad de las secciones a lo largo de la misma dificulta generalizar las estrategias de control y la aplicación de modelos hidrodinámicos para determinar la capacidad del flujo, definir la resistencia de los materiales del lecho y los taludes; y para predecir el crecimiento y características morfométricas de las cárcavas (Rose *et al.*, 2014).

En el control de cárcavas se han utilizado estructuras permanentes y temporales (presas de control de azolves) o su combinación, con la finalidad reducir la velocidad del flujo y propiciar el depósito de las partículas transportadas por el escurrimiento superficial. La vegetación para proteger al suelo contra la erosión y reducir la capacidad de transporte de los escurrimientos superficiales ha probado su eficiencia para la restauración de cárcavas y su combinación con obras mecánicas es más eficiente, lo que se conoce como sistema de bioingeniería (Reubens *et al.* 2008)

El uso integrado de medidas estructurales y vegetativas para el control eficaz de la erosión en cárcavas, ha sido abordado en diferentes investigaciones. Belay y Bewket (2012), describen el uso de represas de madera y tierra, asociadas a plantaciones de *Sesbania sesban*, *Arundinaria donax* e *Ipomoea carnea*, como un sistema implementado por los mismos productores. Rey y Burylo (2014), midieron en diferentes periodos el volumen retenido en los enramados construidos con *Salix*, encontraron para el primer año entre 0.27 y 1.47 m<sup>3</sup> de sedimentos retenidos por estructura y 0.30 a 2.84 m<sup>3</sup> después de tres años; en la mayoría de las estructuras la supervivencia del *Salix* en el primer año es mayor al 81% y para el final de la evaluación difícilmente alcanzó el 32 %.

Las obras de bioingeniería favorecen el desarrollo de la repoblación vegetal con atributos botánicos para resistir el flujo concentrado que aunados con la acumulación de azolves mejoran

las condiciones para el establecimiento de la vegetación y reducir el crecimiento de las cárcavas (De Baets, *et al.* 2009).

La recuperación de las áreas degradadas con las prácticas de bioingeniería permitirá disminuir el flujo superficial, aumentar la infiltración, aportar materia orgánica, retener partículas del suelo con las raíces y acumular sedimentos que favorecerán la repoblación vegetal como una acción hacia la restauración de los terrenos con cárcavas.

## **1.2. OBJETIVOS**

Los objetivos que se buscaron en esta investigación, se presentan a continuación.

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Implementar y evaluar prácticas de bioingeniería para restaurar y aprovechar zonas de cárcavas

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar la cantidad de azolve retenido por las obras existentes, antes de establecer las prácticas de bioingeniería.
- Proponer, diseñar, establecer y evaluar prácticas de bioingeniería para restaurar y aprovechar la zona de cárcavas.
- Determinar los cambios en los perfiles longitudinales de las cárcavas, en la retención de azolves y en la repoblación vegetal.

## **1.3. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS**

Se planteó la siguiente hipótesis y supuesto para esta investigación

### **HIPOTESIS**

Las obras y prácticas de bioingeniería son eficientes para reducir el crecimiento de cárcavas, retener azolves y propiciar la repoblación de la vegetación natural.

### **SUPUESTOS**

Los métodos de estimación de los volúmenes de sedimentos retenidos por el sistema de bioingeniería son confiables.

La línea base de la vegetación existente en los taludes, lecho y cimas de las cárcavas será la base para conocer la repoblación natural que propicia el sistema de bioingeniería para la restauración de cárcavas.

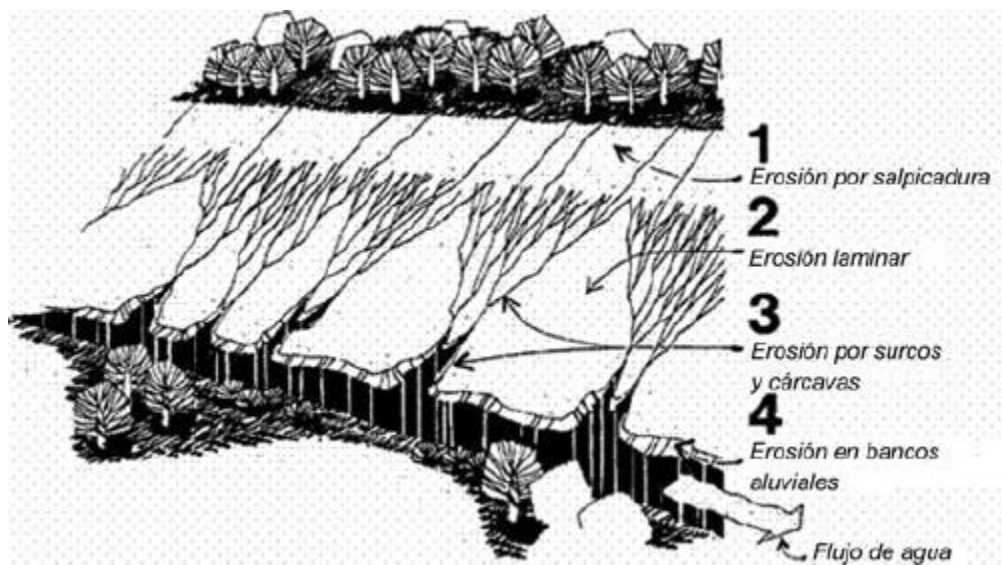
## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

El apartado presenta los procesos de erosión de los suelos, la erosión en cárcavas considerando las causas de su formación, los factores que influyen en su formación, los componentes de una cárcava, la clasificación, el control de cárcavas con estructuras permanentes y temporales, las técnicas de bioingeniería utilizadas para el control de cárcavas y las experiencias de programas de recuperación de cárcavas a nivel nacional e internacional.

### 2.1. Erosión del suelo.

La erosión del suelo es definida como un proceso de remoción, transporte y depósito de materiales del suelo por agentes erosivos (lluvia y escurrimiento) (FAO, 1994) y a pesar de que la erosión es un proceso natural, cuando la erosión se da de manera acelerada y la cantidad de suelo removido es mayor que el que se forma, se produce la degradación de la tierra por erosión.

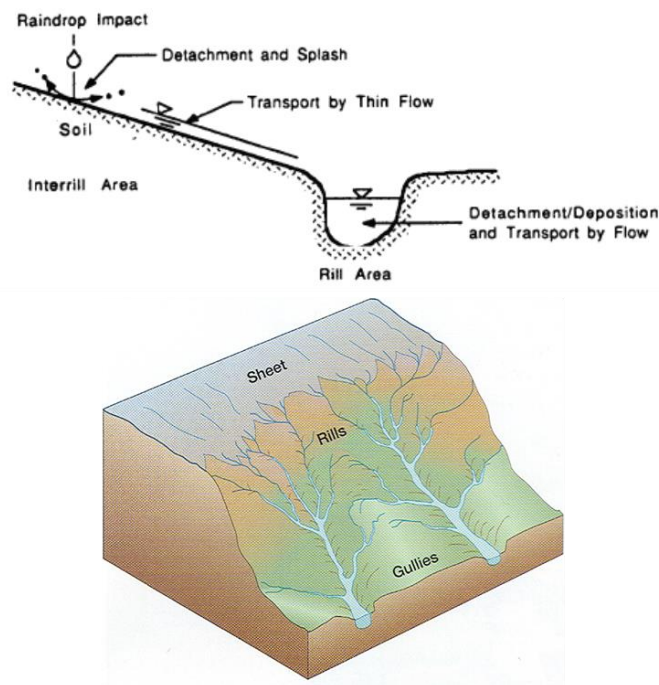
La erosión del suelo considera los procesos de remoción, transporte y depósito de las partículas del suelo por la lluvia y el escurrimiento. El proceso erosivo ocurre de varias formas de acuerdo con el agente que lo origina y se agrupan en: erosión por salpicado, laminar, surcos y en cárcavas, en función de lo avanzado del proceso y de la posición del terreno dentro del paisaje (Figura 1). Los factores que influyen en la remoción, transporte y depósito de partículas de suelo son el tipo, la cantidad e intensidad de precipitación, el relieve, las propiedades de los suelos, la cubierta vegetal y las actividades humanas.



**Figura 1. Formas de erosión.**

Fuente: UNESCO (2009).

La erosión por salpicado es producto del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo que se ve acelerado cuando existe pendiente, ya que la cantidad de suelo salpicado es mayor aguas abajo que aguas arriba. La erosión laminar resulta de la combinación del efecto de la lluvia para remover y transportar el suelo por salpicado y de la capacidad de remoción y transporte de partículas del suelo por el exceso de lluvia (escurrimiento que se presenta cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la infiltración del agua en el suelo); conformando pequeños canalillos que al unirse a lo largo de la pendiente van formando pequeñas láminas de suelo removido que también es conocido como erosión entre surcos (*Interrill erosion*). La erosión en surcos (*Rill erosion*) se manifiesta cuando el flujo superficial de las laderas y suelo erosionado entre surcos se concentra en pequeñas depresiones y forman pequeños surcos donde la capacidad de remoción y transporte de partículas del suelo, por flujo concentrado, son los responsables de la erosión (Nearing *et al.* 2001; Foster y Meyer, 1977; Meyer y Wischmeier, 1969; Lane *et al.*, 1995 y Foster, 1982). Cuando varios surcos se unen o cuando los surcos crecen en ancho y profundidad se presenta la forma más avanzada de la erosión del suelo denominada erosión en cárcavas (Harmon y Doe, 2001; Poessen, J *et al.* 2003) (Figura 2).



**Figura 2. Procesos de erosión del suelo.**

Fuente: Harmon y Doe (2001).

Los procesos de erosión en las cuencas se presentan en laderas (erosión por salpicado, laminar, entresurcos y surcos), en las cárcavas y en las corrientes, los que en conjunto generan la producción de sedimentos o la degradación específica. En las laderas, las partículas de suelo removidas y transportadas por la lluvia y el escurrimiento se mueven como flujo superficial que converge en las pequeñas depresiones donde se concentra el flujo y su capacidad de remoción y

transporte forma surcos. Cuando se incrementa el área de drenaje y los pequeños surcos convergen se incrementa el flujo superficial formando canales más grandes que son denominadas cárcavas (Poesen *et al.*, 2003).

La erosión en cárcavas, es el estado más avanzado de la erosión y se define como el desarrollo de canales profundos formados por el flujo concentrado que se mueve pendiente abajo, favoreciendo el crecimiento lateral, en profundidad y en las partes altas de las cárcavas. Cuando la erosión en canales se profundiza y estos interfieren con el paso de implementos agrícolas, entonces se considera como erosión en cárcavas (Poesen *et al.* 1996; Blanco y Lal, 2010; Osman, 2013).

## **2.2. Proceso de erosión en cárcavas.**

### **2.2.1. Causas de la formación de cárcavas**

El cambio de uso de las tierras es una de las causas importantes en la formación de cárcavas. La vegetación natural es removida para establecer terrenos de cultivo lo que modifica la protección del suelo por la cubierta vegetal contra los agentes erosivos, cambia la rugosidad del terreno y propicia el incremento en los escurrimientos que al concentrarse en pequeñas depresiones van formando las cárcavas. Aunado a esto, el uso de prácticas agrícolas inapropiadas como son: los surcos en dirección a la pendiente y el trazo deficiente de los surcos al contorno, que acumulan el escurrimiento en la parte baja del surco y con el tiempo se rompen iniciando la formación de las cárcavas y; las terrazas mal trazadas donde los escurrimientos son mayores a la capacidad de almacenamiento del sistema, lo que rompe el bordo iniciándose la formación de la cárcava.

El sobrepastoreo provocado por el incremento en carga animal en los agostaderos propicia la compactación del suelo, disminuye la cubierta vegetal, reduce la infiltración del agua, aumenta los escurrimientos, que se concretan en las pequeñas depresiones originadas por el paso del ganado, formando inicialmente pequeños surcos que posteriormente se convierten en cárcavas.

La construcción de carreteras e infraestructura urbana, también propician el desarrollo de cárcavas, ya que favorece la concentración del escurrimiento y cuando este no es canalizado correctamente y llega a zonas sin protección puede iniciarse la formación de cárcavas, por lo que es importante que la construcción de caminos este diseñado con un sistema de drenaje suficiente y con la medidas necesarias para la protección de los taludes a ambos lados de la carretera (Valentin *et al.*, 2005; FAO, 1986).

### **2.2.2. Factores que inciden en la formación y desarrollo de cárcavas.**

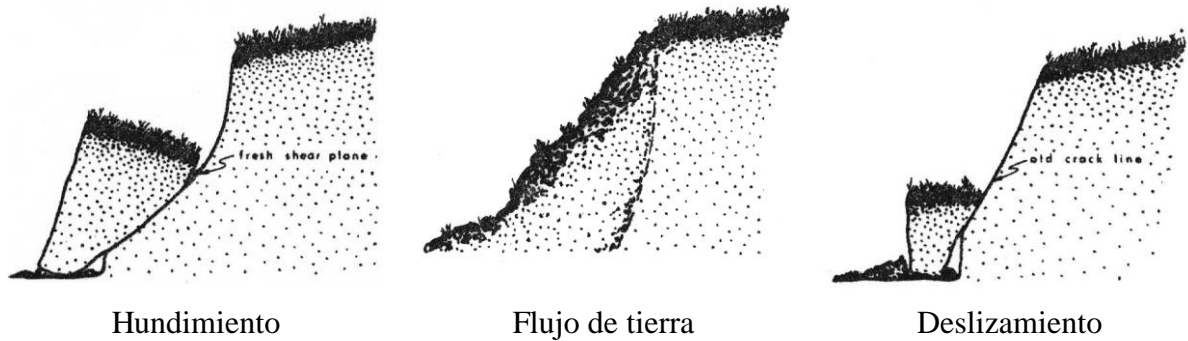
El desarrollo y la formación de cárcavas, se han analizado como procesos en los que intervienen principalmente cuatro factores: el clima, la topografía, las propiedades del suelo y el uso de la tierra.

- Suelo: La resistencia del suelo a ser erosionado, es uno de los factores que se relacionan estrechamente con la formación y desarrollo de cárcavas. En particular, la presencia de suelos de textura fina, favorece un mayor desarrollo de las cárcavas, ya que forman grietas que hacen que las cárcavas tengan un crecimiento lateral (Fan *et al.*, 2008; Poesen *et al.*, 2003).
- Clima: Las lluvias de alta intensidad en corto tiempo que superan la capacidad de infiltración del agua en el suelo, lo que genera el flujo superficial con una alta capacidad erosiva, asociado a procesos de formación y desarrollo de cárcavas. Los eventos lluviosos extremos se presentan en varias zonas climáticas y son los causantes de modificaciones del relieve de las zonas de laderas y de la formación de cárcavas (Gómez *et al.*, 2011; Poesen *et al.*, 2003).
- Uso de la tierra: Al cambio en la cubierta vegetal se le ha relacionado con el desarrollo de cárcavas en diferentes ambientes y la capacidad de la vegetación para proteger el suelo de la erosión se ha relacionado con factores como densidad, edad, estacionalidad y sanidad (Valentin *et al.*, 2005; Gómez *et al.*, 2011).
- Topografía: Es un factor que influye en la formación de cárcavas debido a que a medida que aumenta el grado y longitud de la pendiente, se incrementan los escurrimientos superficiales y la fuerza cinética del flujo superficial, lo que incrementa el esfuerzo cortante del flujo para remover partículas del suelo. Por lo tanto, las zonas montañosas o con pendiente han sido más propensas a presentar este tipo de erosión (Chaplot, 2013; Morgan, 2003).

Las cárcavas son una etapa avanzada de la erosión en canales, donde el escurrimiento va formando surcos; al aumentar el flujo debido a eventos extremos o a cambios en el uso de la tierra, las dimensiones de los canales aumentan y dan paso a la formación de cárcavas.

Los taludes de las cárcavas están sujetos a la acción erosiva del flujo superficial que aumenta en forma progresiva el ancho de la cárcava o bien, al colapso del material en las paredes, lo que se asocia a una saturación de agua en el suelo, a la acción de la gravedad, al efecto erosivo del flujo sobre la base de las paredes y a las propiedades del material.

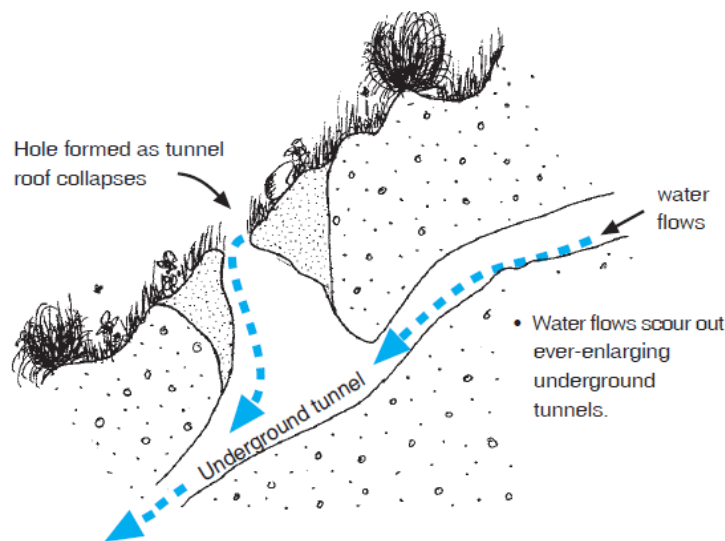
Los movimientos en masa en las márgenes de la cárcava pueden manifestarse como hundimientos (*slumping*), arrastre de suelo (*creeping*), deslizamiento de tierra (*sliding*), flujo de tierra (*earthflow*), deslizamiento de rocas (*rockslides*) y caída de rocas (*rockfall*) (Figura 3). Los movimientos en masa del suelo dejan pequeñas depresiones y material erosionado que queda expuesto a la acción directa del flujo superficial, erosionando las paredes y lecho de la depresión y las secciones transversales de las cárcavas (Sidorchuk, 1999; Bull y Kirkby, 2002; Gómez *et al.* 2011).



**Figura 3. Movimiento en masa de suelos que originan la formación cárcavas.**

Fuente: Victorian Resources Online.. Julio del 2016  
 ([http://vro.agriculture.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/lwm\\_land\\_deg\\_erosion](http://vro.agriculture.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/lwm_land_deg_erosion))

La formación de cárcavas, también se atribuye al desarrollo de túneles originados por el flujo subsuperficial o por la presencia de pequeños roedores (Figura 4). En la superficie del terreno, se forman grietas en las que, al aumentar el gradiente de humedad, se convierten en túneles que están sujetos a la acción de la gravedad y que, al sobrepasar la presión soportada por el suelo, colapsan dejando expuesto el túnel que se convierte en pequeñas secciones transversales por acción del flujo superficial (Carey, 2006; Gómez *et al.*, 2011). Las propiedades del suelo, representan un papel fundamental en el desarrollo de estos túneles, ya que una variación en la permeabilidad del suelo hace que el flujo llegue hasta capas de material no cohesivo, que permite la formación de la cárcava (Hicks y Anthony, 2001).



**Figura 4. Formación de túneles.**

Fuente: Environment Canterbury (2001).



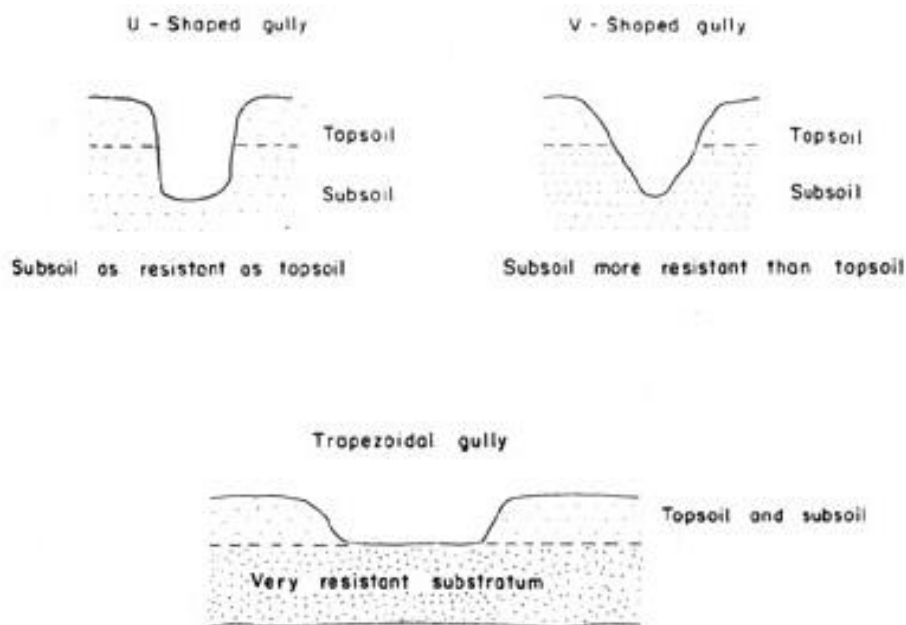
### 2.2.3. Clasificación de cárcavas

Las cárcavas pueden clasificarse en continuas cuando conforman un sistema de drenaje con un canal principal y ramales adyacentes que descargan su flujo en el principal; y, en discontinuas, cuando no se diferencia una unión con el canal principal (FAO, 1986; Agassi 1996).

Las cárcavas pueden clasificarse por varios criterios, por su profundidad y área de drenaje, se clasifican en: pequeñas, si la profundidad es menor que 2.5 m y el área de drenaje menor a 10 ha; medianas, cuando tienen una profundidad de entre 2.5 y 4.5 m y un área de drenaje entre 10 y 50 ha y, grandes, cuando la profundidad es mayor que 4.5 m y el área de drenaje mayor de 20 ha (FAO, 2000).

La forma de la sección transversal las agrupa en:

- Cárcavas en forma de U: Se forman donde tanto el suelo como el subsuelo tienen la misma resistencia al corte producido por el agua y suele presentarse una baja velocidad de flujo.
- Cárcavas en forma de V: Se desarrollan donde el subsuelo es más resistente a la erosión que la superficie del suelo. Esta es la forma más común y, en general el flujo presenta mayor velocidad.
- Cárcavas en forma trapezoidal: Se forman cuando el sustrato más profundo de la cárcava es más resistente que la capa superficial y subsuperficial (FAO, 1986 y Das, 2009) (Figura 5).

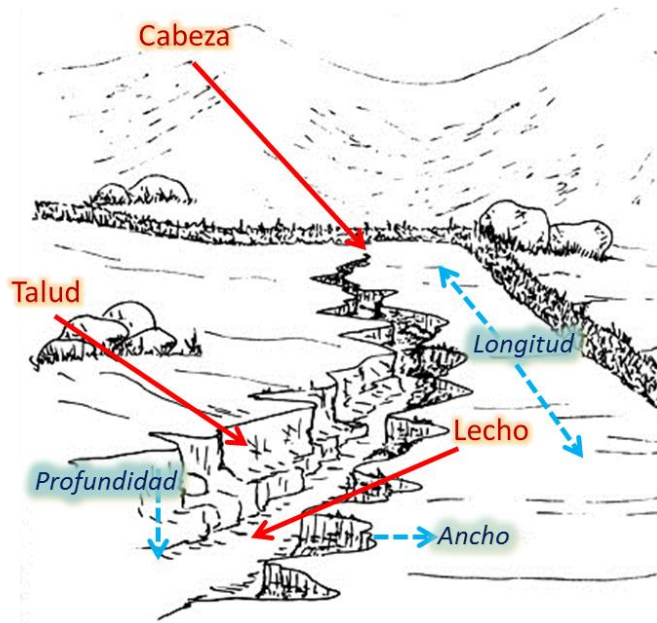


**Figura 5. Formas de las secciones transversales de las cárcavas.**

Fuente: FAO (1986).

#### 2.2.4. Crecimiento de las cárcavas.

Las cárcavas son secciones transversales no uniformes con taludes irregulares que están sometidos a tres tipos de crecimientos: a) lateral, se presenta en los taludes de la cárcava debido al agrietamiento de los suelos de la ladera y las partes cercanas a la cárcava caen por su peso y por efecto del secado y humedecimiento; b) lecho, producto de la remoción de la partículas del lecho de la cárcava por capacidad de transporte del flujo superficial y que en corriente se considera como arrastre de materiales del lecho y; c) la erosión remontante, que se presenta en la parte alta de la cuenca y cuyo crecimiento ocurre por la concentración de los escurrimientos provenientes de la parte alta de la cuenca de captación ; en este caso, por diferencias en elevación entre el terreno y el fondo de la cárcava, se presentan una socavación y un crecimiento paulatino con el tiempo (Figura 6).



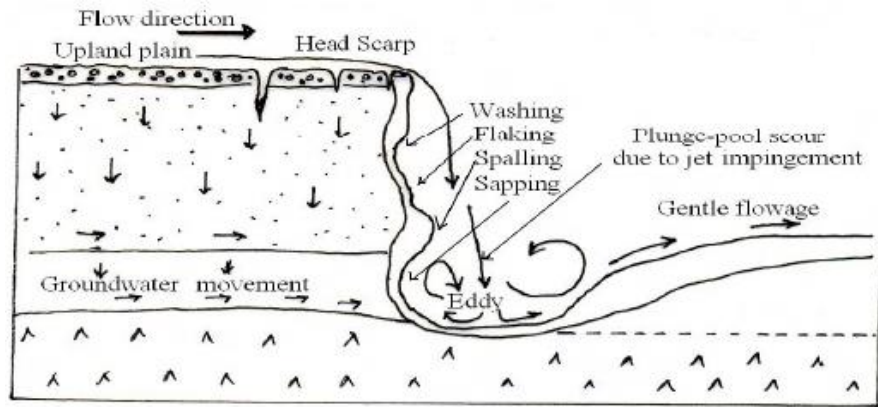
**Figura 6. Componentes de una cárcava.**

Fuente: Adaptado de FAO (1986)

El crecimiento de la cabecera de las cárcavas (erosión remontante) se origina por el desnivel entre el lecho y el fondo de la cárcava, lo que provoca que la energía generada por la caída de agua forme una turbulencia en el lecho de la cárcava, que genera una fosa de socavación. La socavación, compromete la estabilidad de la pared y esta colapsa en bloques de suelo por efecto de la gravedad y provoca el crecimiento aguas arriba de la cárcava (Figura 6 y Figura 7).

Los taludes presentan una situación similar causada por el agrietamiento del suelo, el escurrimiento y los procesos de humedecimiento y secado que causan la formación de bloques de suelos expuestos a la fuerza de gravedad y que por su peso, caigan en el fondo de la cárcava. Este es un crecimiento del ancho de la cárcava que responde a la combinación de la humedad

contenida en el suelo de los taludes, a la gravedad y a la acción del flujo para erosionar la parte inferior de los taludes (Shit y Maiti, 2012) (Figura 7).



**Figura 7. Procesos de erosión remontante y lateral en las cárcavas.**

El desarrollo de las cárcavas es un proceso dinámico en constante crecimiento que es la fase activa de la erosión en cárcavas y depende de la presencia del flujo superficial. Se considera que existe un periodo de estabilidad donde tiene lugar el fenómeno contrario a la erosión, la agradación, dando paso a ciclos de erosión y depósitos de materiales (Rodríguez *et al.*, 2005; Gómez *et al.* 2011). O como lo menciona Sidorchuk (2001), se considera un periodo casi estable donde domina el fenómeno de transporte y depósito de materiales previamente removidos y aunque con menor velocidad, se presenta un ligero aumento en el ancho de las cárcavas.

#### 2.2.5. Procesos hidráulicos que inciden en la formación de cárcavas.

El proceso hidráulico de formación de cárcavas, consiste en la remoción y transporte de las partículas del suelo que se produce cuando el esfuerzo cortante del flujo superficial, es mayor que la resistencia del suelo a ser erosionado. Para estimar el esfuerzo cortante del flujo superficial es importante utilizar la ecuación de continuidad, lo que requiere el cálculo de la descarga total y la descarga unitaria de agua, como se presenta a continuación:

$$Q = vA$$

$$q = \frac{Q}{w}$$

Donde:  $Q$  = Descarga total ( $m^3/s$ ),  $q$  = Descarga unitaria ( $m^2/s$ ),  $v$  = Velocidad del flujo ( $m/s$ ),  $A$  = Área de la sección de la cárcava ( $m^2$ ) y  $w$  = Ancho de la cárcava ( $m$ ).

La velocidad de flujo se puede obtener con la fórmula de Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:  $v$  = Velocidad del flujo (m/s),  $n$  = Coeficiente de rugosidad,  $R$  = Radio hidráulico (m),  $S$  = pendiente (m/m).

Las fuerzas hidrodinámicas del flujo superficial del agua son las que permiten que las partículas más expuestas en el lecho de la cárcava sean removidas. El esfuerzo cortante del flujo ( $\tau$ ) y el poder de la corriente ( $\omega$ ) son los parámetros que más se utilizan para determinar la capacidad del flujo para remoción de las partículas del lecho de la cárcava.

El esfuerzo cortante del flujo es una función del tirante del flujo, la densidad del líquido y la pendiente del fondo de la cárcava y se estima con la siguiente ecuación:

$$\tau = \rho g h S$$

Donde  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) es la densidad del agua,  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) es la aceleración de la gravedad,  $h$  (m) es la profundidad del flujo y  $S$  (m/m) es la pendiente del lecho del cauce o cárcava.

El poder de la corriente es la relación de la disipación del flujo de energía en el lecho del cauce por unidad de área y se estima con la siguiente ecuación:

$$\omega = \tau v = \rho g q S$$

Donde  $\omega$  ( $\text{kg/s}^3$ ) es el poder de la corriente,  $v$  (m/s) es la velocidad promedio del flujo (m/s) y  $q$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) es la descarga del flujo por unidad de ancho.

Ambos parámetros son utilizados para estimar la capacidad de remoción de las partículas del suelo, pero en su aplicación es importante estimar la descarga total y la descarga unitaria en una sección del cauce bien definida (Nearing *et al.*, 1991).

La remoción de suelo en surcos es una función de las fuerzas hidrodinámicas del flujo superficial y de la resistencia de las partículas del suelo a ser removidas. La ecuación más utilizada para estimar la capacidad de remoción del flujo es la diferencia entre el esfuerzo cortante actual y el esfuerzo cortante crítico (se presenta cuando la partícula más expuesta del lecho del cauce se remueve), la cual se presenta a continuación:

$$Drc = K_s (\tau - \tau_c)^b$$

Donde  $\tau_c$  (Pa) es el esfuerzo cortante crítico del suelo,  $K_s$  es la erosionabilidad del suelo a erosionar en surcos,  $b$  es un coeficiente y  $\tau$  es el esfuerzo crítico del flujo el cual cambia con la variación del flujo durante un evento. Cuando el esfuerzo cortante actual es mayor que el esfuerzo cortante crítico del suelo se presenta la remoción de partículas del lecho del cauce.

Flanagan y Nearing (1995) propusieron modelos predictivos para estimar la erosionabilidad del suelo ( $K_s$ ) en surcos y la ecuación de predicción del esfuerzo cortante crítico del suelo ( $\tau_c$ ) como se presenta a continuación:

$$K_s = 0.00197 + 0.030 v_{fs} + 0.03863 e^{-184 \text{ orgmat}}$$

$$\tau_c = 2.67 + 6.5 \text{ clay } 5.8 v_{fs}$$

Dónde:  $v_{fs}$  es la fracción de arena muy fina en la superficie del suelo;  $clay$  es la fracción de arcilla en la superficie del suelo y  $orgmat$  es la fracción de materia orgánica en la superficie del suelo.

Estos modelos se han aplicado a terrenos agrícolas y consideran la capacidad de remoción del suelo en surcos. Sin embargo, la aplicación de modelos hidrodinámicos en cárcavas tienen el problema de la alta variabilidad de la sección transversal de la cárcava a lo largo de su recorrido por los cambios causados por la erosión en taludes y la erosión remontante que cambia después de eventos de lluvia de alta intensidad.

Sidorchuk y Sidorchuk (1998), propusieron un modelo matemático para estimar la resistencia de la superficie a la remoción de partículas, el cual se presenta a continuación:

$$\tau_{cr} = 0.06 \left( \frac{d}{D} \right)^{1/3} [(\rho_s - \rho)gd + 0.62 C_f^n]$$

Donde:  $\tau_{cr}$ = Esfuerzo crítico,  $d$ = Diámetro medio de los agregados del suelo,  $D$ = Profundidad del flujo,  $\rho_s$  = Densidad de los sedimentos,  $\rho$  = Densidad del agua,  $g$ = es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )  $C_f^n$ = Factor de resistencia del suelo.

Prosser y Albernethy (1996), hacen referencia a la una ecuación que establece los umbrales donde se presenta el fenómeno de la erosión por flujo superficial cuando el suelo está saturado y se expresa como sigue:

$$\frac{a}{b} \geq \left( \frac{\tau_c^3 8 v^c}{g^2 k p^3} \right)^{1/(2+c)} \left( \frac{1}{q M^{2/(2+c)}} \right)$$

Donde:  $a$ = Área de aporte ( $m^2$ ),  $b$ = Ancho del contorno por donde drena la cuenca (m),  $\tau_c$ = Esfuerzo crítico,  $v$ = Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ ),  $g$ = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ),  $\rho$  = Densidad del agua ( $kg/m^3$ ),  $q$  = Flujo superficial ( $m^2/s$ ),  $M$  = pendiente (m/m),  $k$  y  $c$  están relacionados con el número de Reynolds.

Se han desarrollado modelos para predecir la erosión en cárcavas, pero desde un enfoque estocástico como GULTEM (The Model to Predict Gully Thermoerosion and Erosion), donde se integran elementos como líneas de flujo (flowline), escurrimiento, cubierta vegetal y algunas propiedades del suelo como cohesión, consolidación y tamaño de agregados. El modelo está basado en la relación entre las fuerzas de remoción del flujo y de resistencia del suelo, y busca relacionar las características hidráulicas del flujo con las propiedades mecánicas del suelo mediante ecuaciones de conservación y deformación (deformation) de masa, para obtener como

resultados: mapas dinámicos del terreno, dimensiones de las cárcavas (ancho y profundidad) y volumen de las cárcavas en diferentes momentos (Sidorchuk, 2001).

Un enfoque más innovador, es la aplicación del modelo GULTEM pero utilizando el concepto de “Erosion Response Units” (ERU), que se han descrito como unidades hidrológicas definidas y fue puesto en práctica por Sidorchuk *et al.* (2003) en la cuenca del río Mbuluzi, en África. En su investigación definieron seis unidades con diferentes procesos erosivos, se generaron los datos geomorfológicos e hidrológicos para alimentar los modelos y se probaron. En el caso específico de las unidades donde se corrió el GULTEM, se demostró que este modelo predice de forma rápida y eficiente las principales características morfológicas de la cárcava (longitud, profundidad y volumen).

Otro enfoque donde se busca la descripción física de la erosión en cárcavas es el propuesto por Rose *et al.* (2014), en donde se parte de una clara diferenciación entre la resistencia del suelo a la remoción por el flujo, entre el material depositado y el material del perfil original, a partir de un DEM obtenido de datos LiDAR, registros de intensidad de lluvia y un parámetro físico que define la resistencia del suelo. La metodología empleada en este estudio permitió predecir la erosión en cárcavas, donde el efecto en cascada y el parámetro de resistencia de la sección de la cárcava, son los elementos que mejor explican la alta tasa de erosión observada en la región de estudio.

#### 2.2.6. Consecuencias de la erosión en cárcavas

La presencia de cárcavas provoca la pérdida de tierras de cultivo e incrementa los costos de producción, porque al fragmentarse el terreno, las labores del cultivo requieren de mayor inversión de trabajo. En relación a las funciones hidrológicas, el drenaje incrementa su densidad y con ello concentra y transporta grandes cantidades de escurrimiento lejos de las tierras de cultivo, lo que disminuye la humedad disponible para la producción vegetal. La erosión en cárcavas aporta más de la mitad de los sedimentos que se producen en una cuenca; estos sedimentos a su vez reducen la capacidad de las obras de almacenamiento aguas abajo y la contaminación de los cuerpos de agua (Poesen *et al.*, 2003; Gómez *et al.* 2011 y Valentin *et al.*, 2005).

El problema que existe con la formación de cárcavas es su crecimiento lateral o erosión en taludes al conformar secciones transversales más amplias con el afloramiento del material parental conocido como tepetate. Cuando continúa el proceso de crecimiento de la cárcava aparece el tepetate, situación que se vuelve crítica cuando en el terreno existen varias cárcavas que al unirse forman áreas degradadas con afloramiento de tepetate, lo que requiere de programa de recuperación y formación de suelos (Figura 8).





**Figura 8. Crecimiento de cárcavas en los taludes hasta el afloramiento del tepetate y roturación de tepetate.**

Existen zonas altamente susceptibles al proceso de formación de cárcavas donde hay un crecimiento lateral en profundidad, lateral o en taludes, que conforman áreas degradadas con sistemas de drenaje de cárcavas de diferentes magnitudes. Estas zonas producen gran cantidad de sedimentos que se depositan en las partes bajas forman zonas de depósito y azolve de las obras de infraestructura existentes (Figura 9).



Cárcavas en drenaje complejo



Depósito de sedimentos en las partes bajas

**Figura 9. Crecimiento de cárcavas con drenaje complejo.**

### 2.3. Control de cárcavas.

La presencia de cárcavas en el territorio nacional es muy variable y compleja, ya que se presentan desde pequeñas cárcavas aisladas en terrenos agrícolas y ganaderos, hasta grandes socavaciones, en conjuntos de cárcavas aislados unos de otros que modifican el paisaje de los terrenos, en cárcavas con crecimiento lateral que han conformado zonas degradadas con afloramiento de material parental y, sistemas de drenaje difusos conformados por cárcavas de diferentes tamaños.

Esta situación provoca que el control de cárcavas sea variable desde el control de la cárcava aislada, un conjunto de cárcavas en un terreno, recuperación de terrenos degradados donde existieron cárcavas o en zonas con drenaje difuso, por lo que, en función del tipo problema a resolver se tienen que aplicar las técnicas adecuadas para reducir y regular los escurrimientos, desviar los escurrimientos aguas arriba de las cárcavas y al final, estabilizarlas (FAO, 1986).

Las acciones para el control de cárcavas se agrupan en estructurales permanentes o temporales y de bioingeniería, donde se combinan las obras estructurales permanentes en sitios estratégicos de las cárcavas con barrera vivas de vegetación arbórea o de zacates ubicados en el lecho de las cárcavas (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Tipos de obras y prácticas para el control de cárcavas.**

Estructurales		Bioingeniería
Permanentes	Temporales	
Presas de piedra acomodada	Presas de ramas	Empalizada
Presas de mampostería	Presas de troncos	Fajinas
Presas de gaviones	Presas de alambre	Geomallas
Presas tierra	Presas de geocostales	Empastado
Presas con llantas		Barreras vivas

### 2.3.1. Estructuras permanentes

Son estructuras rígidas o flexibles que se construyen perpendiculares a la corriente en el lecho de la cárcava y empotradas en los taludes con la finalidad de reducir la velocidad del flujo superficial, crear un almacenamiento temporal o permanente de agua, y captar los sedimentos. Las estructuras permanentes se utilizan en las cárcavas grandes y medianas por su área de drenaje y tamaño (ancho y profundidad), por lo que requieren de un diseño estructural y estructuras vertedoras para evitar el deslizamiento y el volcamiento. Se construyen en forma escalonada para que con los azolves retenidos formen una serie de bancos o playas, a fin de reducir la velocidad del flujo superficial y el crecimiento en el lecho y taludes de las cárcavas hasta lograr su estabilización. Los materiales de construcción pueden ser de mampostería (piedra, arena y cemento), de piedra acomodada, gaviones, llantas llenas de tierras y bordos de tierra (Figura 10).

**Presas de piedra.** Son estructuras que se colocan perpendiculares a la corriente, se construyen con piedra bola o laja; en caso de utilizar piedra se deberá dejar un ángulo de reposo para su estabilidad. Se debe empotrar en el lecho y taludes construyendo una zanja transversal de profundidad variable de acuerdo a la altura de la presa, que se rellena con piedras de tamaño mediano para formar la cimentación y después proceder a colocar las piedras sobre la cimentación hasta lograr la altura elegida, la cual, por regla general no debe ser mayor de 3.00 m. Aguas debajo de la presa se construye un delantal con una profundidad mínima de 20 cm y



longitud mayor de 1.5 veces la altura efectiva de la presa y en la parte central de la estructura se coloca un vertedor para desalojar los excesos de agua (Figura 10a).



a) Presa de piedra acomodada



b) Presa de mampostería



c) Presa de gaviones



d) Presa de llantas



e) Bordo de tierra retención de azolves

**Figura 10. Presas permanentes para el control de azolves.**

**Presa de mampostería.** Son secciones rígidas construidas perpendiculares a la corriente que pueden ser diseñadas como presas de tipo gravedad, en las que todas las fuerzas que intervienen en la estabilidad de la obra son equilibradas por el peso propio de la estructura. El diseño busca que la resultante de las fuerzas actuantes quede dentro del tercio medio de la base de cada sección y con ello evitar que se presenten tensiones. Con las dimensiones obtenidas se estiman

los factores de seguridad al volcamiento y deslizamiento. Estas estructuras se construyen con piedra, arena y cemento; deben tener un vertedor de demasías y un delantal para evitar socavaciones aguas abajo de la estructura y son las que requieren de una mayor inversión por m<sup>3</sup> construido dentro de las estructuras permanentes (Figura 10b).

**Presas de gaviones.** Son estructuras permanentes, flexibles y permeables, construidas perpendiculares a la corriente a base de prismas rectangulares de alambre galvanizado denominados *gaviones*, los cuales se rellenan de piedra con el objeto de formar el cuerpo de la obra que constituye la presa de control. Las presas de gaviones son muy adaptables a diferentes condiciones, funcionan con secciones filtrantes, son resistentes al volcamiento y deslizamiento por su flexibilidad, controlan eficientemente la erosión en cárcavas y para su buen funcionamiento deben ser diseñadas para definir el empotramiento, la base y ancho de la corona de la presa, la pared de la estructura aguas arriba es vertical con talud abajo, con estructura vertedora y con un delantal (Figura 10c).

**Presas de llantas.** Son estructuras conformadas por llantas llenas con tierra dispuestas en forma de tresbolillo juntas con espacios entre ellas que se cubren con tierra, dándole características de impermeabilidad. Estas estructuras se colocan perpendiculares a la corriente, empotradas en el lecho y en los taludes para evitar socavaciones y dejando en la parte central un desnivel para que sirva como vertedor de demasías. El delantal lo conforman hiladas de llantas aguas abajo de la presa para evitar el golpe hidráulico de los sedimentos y la presencia de socavaciones que pongan en riesgo la estructura. El diseño sigue los procedimientos del peso de la estructura y peso del agua y de sedimentos para evitar su volcamiento o deslizamiento (Figura 10d).

**Presas de tierras.** Son bordo de tierra sin compactar que se colocan en la parte baja de las depresiones, son de poca altura no más 60 cm con taludes de 1:2 a 1:3 que permitan captar los escurrimientos y los sedimentos. Estas presas deben contar con una estructura vertedora sobre el material consolidado para desalojar las avenidas extraordinarias y evitar que exista flujo sobre la corona de la obra y así evitar su rompimiento. Estos bordos normalmente se coronan con especies arbóreas y en los taludes de la obra se recomienda sembrar zacates o colocar un zampeado seco. Un bordo de la región Mixteca en la parte baja de un terreno con cárcavas se construyó excavando el material para conformar el bordo de casi 80 cm de altura y más de 2.50 m de base, en una longitud de más de 150 m. Con el volumen excavado se definió un área para captar agua y sedimentos y así conformar una zona de cultivo en el futuro y, posteriormente, a la altura donde llegan los sedimentos construir otro bordo para formar una zona de cultivo y recuperar el terreno con cárcavas (Figura 10e).

### 2.3.2. Estructuras temporales

Las estructuras temporales también denominadas presas de control de azolves temporales se construyen para controlar la erosión en cárcavas pequeñas (menos de 2.5 m de profundidad y con un área de drenaje de menos de 10 ha). Se caracterizan por utilizar materiales con vida útil menor



de cinco años, ser permeables y que al combinarse con ramas o piedras reducen la velocidad de los escurrimientos, propician la acumulación de sedimentos y toda la estructura y vertedor para desalojar los excesos de agua (Figura 11).



a) Presas de ramas



b) Presas de malla de alambre



c) Presas de troncos



d) Presa de geocostales

**Figura 11. Presas temporales para el control de azolves.**

**Presas de ramas.** Este tipo de estructura se utiliza en cárcavas pequeñas y donde hay abundancia de arbustos y ramas. La presa se forma con ramas entrelazadas colocadas transversalmente a la cárcava como un obstáculo para reducir la velocidad del flujo superficial y propiciar el depósito del material acarreado en suspensión. La altura efectiva de estas estructuras no debe exceder de 1.50 metros. Las ramas se colocan en el suelo a una profundidad de 20 a 30 cm con espaciamiento de 30 a 50 cm y empotrado hacia los taludes. Para su formación se deben colocar ramas entrelazadas que sirvan de soporte a la presa, para que sea una presa filtrante y funcione como estructura vertedora (COLPOS, 1991) (Figura 11a).

**Presas de malla de alambre.** Estas estructuras son fáciles de construir y resultan muy eficaces para controlar las cárcavas menores de 60 cm de profundidad y áreas pequeñas de captación. Para su construcción se colocan postes o polines separados de 30 a 50 cm a una profundidad de 10 a 20 cm y posteriormente se coloca y sujeta la malla ciclónica a los postes y se extiende hacia aguas arriba. Una vez formada la presa de alambre, se procede a colocar ramas o piedras aguas

arriba a fin de conformar un terraplén que de mayor firmeza a la estructura (COLPOS, 1991) (Figura 11b).

**Presas de troncos.** Son estructuras que se colocan transversales a la cárcava y están formadas por troncos de diferentes tamaños, separados de 30 a 50 cm y enterrados de 10 a 20 cm en el lecho de la cárcava. Esta hilera de troncos sirve de soporte para colocar troncos transversales clavados y amarrados con alambre hasta conformar una estructura rígida y firme; el resultado es una barrera que reduzca la velocidad del flujo superficial, acumule azolve y evite el crecimiento lateral y en el lecho de la cárcava. Estas presas se recomiendan para cárcavas de menos de 1.50 m de profundidad y donde exista madera para su construcción. Aguas abajo de la presa se construye un delantal con troncos o piedras colocados de forma longitudinal a la corriente, semi-empotrados al lecho, a fin de evitar la socavación (COLPOS, 1991) (Figura 11c).

**Presa de geocostales:** Es una estructura de geocostales (geotextiles rellenos con suelo) que se colocan en forma de barrera o trinchera transversales a la dirección del flujo en la cárcava. Para su construcción se hace una zanja tanto en lecho como en los taludes donde se colocan las primeras hileras de costales para conformar la base de la presa. El suelo extraído de la zanja se puede utilizar para llenar los geocostales. Es recomendable que los geocostales estén hechos de fibra de polipropileno, con malla núm. 70 y cintilla de amarre), de 60 cm de largo, 40 cm de ancho y 25 cm de alto (llenos), con capacidad de aproximadamente 50 kg (CONAFOR, 2007) (Figura 11d).

Estas presas temporales las construyen los productores con sus propios recursos cuando quieren recuperar los terrenos con cárcavas ya que, de no hacerlo, estas siguen creciendo hasta convertir sus terrenos en áreas con cárcavas. Es importante hacer notar que se requiere el trabajo cotidiano y la dedicación, ya que una avenida extraordinaria puede causar daños a las presas y hay que repararlas. Estas presas son de bajo costo y de alta inversión de tiempo y esfuerzo de los productores para proteger sus terrenos.

### 2.3.3. Bioingeniería

La bioingeniería, según Schiechtl, es una disciplina que forma parte de la ingeniería civil y que persigue objetivos técnicos, ecológicos, económicos y de diseño, mediante el uso de materiales vivos solos o en combinación con materiales inertes (Studer y Zeh, 2014).

Para lograr estabilizar el terreno y protegerlo de los agentes erosivos, se emplean diversas técnicas de bioingeniería que pueden agruparse en:

- Técnicas de estabilización: Utilizan determinadas especies leñosas, o partes de ellas, como elementos de construcción, con el fin de estabilizar el suelo hasta 2-2.5 m de profundidad y reducir la erosión.
- Técnicas de recubrimiento: Se basan en la repoblación natural o artificial, y la estabilización superficial del suelo.

- Técnicas mixtas o combinadas: Combinan los materiales vegetales vivos con materiales inertes como piedra, cemento o acero.
- Técnicas complementarias: Funcionan como complemento a las otras técnicas de bioingeniería pero por si solas no estabilizan el terreno (COITAPAC, 1998; Sangalli, 2005).

Especificaciones para la construcción:

- Temporada de siembra: Las especies vegetales deben prepararse como estacas y plantarse antes de la época de lluvias.
- Adaptación de las plantas: Deben seleccionarse materiales vegetales que se adapten fácilmente a las condiciones del sitio. Las especies nativas deben preferirse sobre las exóticas.
- Preparación de las ramas: Se recomienda sumergir en agua las ramas por un mínimo de 24 horas antes de colocarlas. Las ramas deben mantenerse en la sombra hasta el momento de la siembra.
- Preparación de la superficie del terreno: La pendiente del talud debe ser lo suficientemente suave para impedir la erosión durante el periodo de enraizado de las ramas. Generalmente se recomiendan taludes con pendientes inferiores a 2H:1V.
- Colocación del material vegetal: El material debe colocarse inmediatamente después de que se realicen las excavaciones para impedir la desecación del terreno. Se deben cubrir las cepas de vegetación con suelo orgánico o suelo fertilizado y compactar el suelo.
- Protección de la superficie: Debe colocarse sobre la superficie del terreno semillas y acolchado orgánico, en tal forma que se genere una capa protectora de la superficie.
- Inspección y mantenimiento: Las obras de bioingeniería requieren de una inspección y mantenimiento muy estrictos, al menos durante el primer año. Si se llegara a presentar un problema de erosión, este debe corregirse de inmediato.

La estabilización de cárcavas mediante la bioingeniería involucra el uso de medidas estructurales y vegetales en la cabeza de la cárcava, el fondo de la cárcava y los taludes. En la actualidad, existe una gran cantidad de obras y prácticas disponibles para el tratamiento eficaz de las cárcavas; sin embargo, la combinación de ambas medidas resulta un método más eficaz para su control (Desta y Adugna, 2012).

Las medidas estructurales y con vegetación se han utilizado en diferentes partes del país. La CONAFOR (2007), menciona un ejemplo para la protección de taludes de cárcavas grandes utilizando presas de piedra acomodada, maguey y nopal. Por las dimensiones de la cárcava un sistema de recuperación de cárcavas es muy costoso y requiere de largo periodo de tiempo para reducir el crecimiento de los taludes y propiciar la repoblación natural (Figura 12).



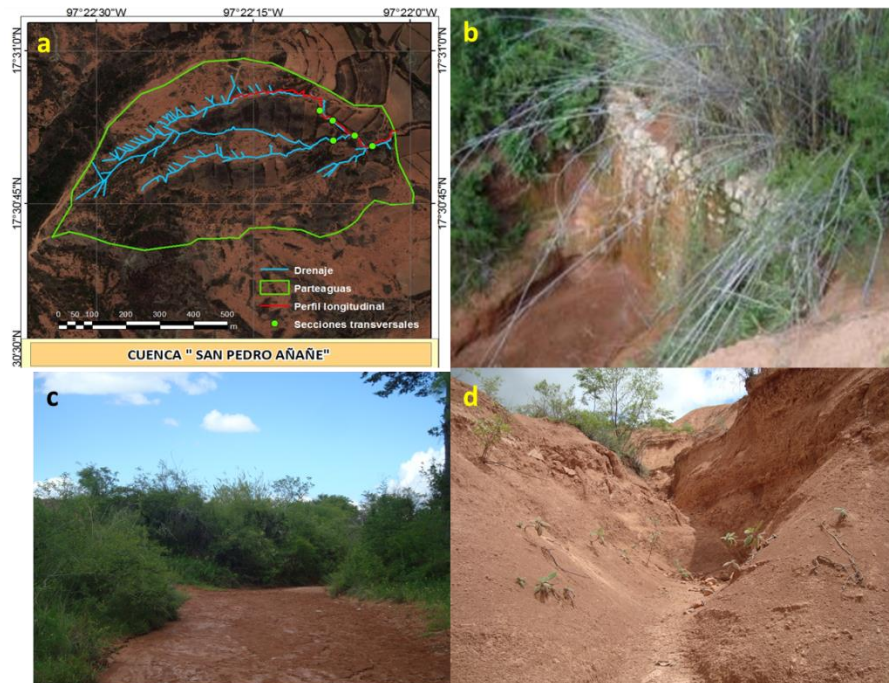
**Figura 12. Sistema de bioingeniería para la recuperación de cárcavas (CONAFOR, 2007).**

Para el control de la erosión en zonas con cárcavas (Figura 13a), un productor de la región de San Pedro Añane construyó una presa de mampostería con sus propios recursos, de más de 3 metros de altura efectiva en la parte baja de la cárcava principal para retener azolves y evitar que la zona de cárcavas siguiera creciendo (Figura 13b). Esta presa formó una playa de sedimentos y propició que en las zonas cercanas a la obra se desarrollara la vegetación natural en los taludes (Figura 13c), así evitó el crecimiento de la erosión. En la parte alta de las zonas aparecen los taludes de las cárcavas sin vegetación y con problemas de crecimiento lateral de los taludes (WWF, 2015).

El estudio mostró que la presa construida aguas abajo permitió captar los sedimentos de un área de 39.48 ha, y llegó a formar una playa de cerca de 300 m de longitud con ancho variables, que permitió captar un acumulado en la vida útil de la presa de 3,955 toneladas de sedimentos capturados a una tasa de erosión de  $100 \text{ Mg ha}^{-1}$  lo que da una idea clara de la gran cantidad de sedimentos que producen estas cárcavas (WWF, 2015).

El uso de la vegetación por sí solo resulta eficaz, ya que la vegetación le proporciona protección al suelo contra la erosión debido a la reducción en la velocidad de los escurrimientos; además, de que se produce biomasa que puede ser aprovechada para diferente propósitos; sin embargo, no en toda el área de cárcavas es factible el establecimiento de vegetación, pues puede haber zonas en donde el suelo se ha perdido completamente por lo que una alternativa para estas zonas es la combinación de la repoblación con obras mecánicas como presas (Reubens *et al.*, 2008).

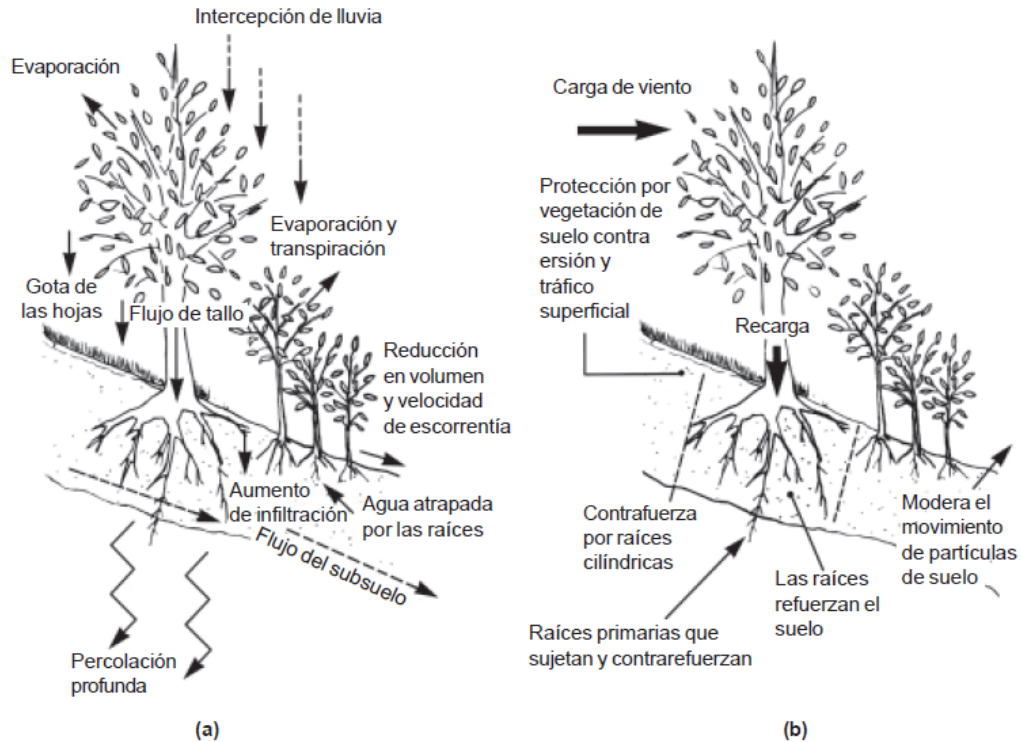




**Figura 13. Sistema de bioingeniería para la recuperación de cárcavas (WWF, 2015).**

El uso de la vegetación para el control de la erosión presenta importantes ventajas, en el aspecto hidrológico, el follaje intercepta la lluvia, reduce su poder erosivo y proporciona humedad a la planta para la evapotranspiración. Los tallos y las hojas, en contacto con el flujo superficial reducen su velocidad y aumentan la infiltración. Y las raíces, por otro lado, penetran en el suelo abren la superficie y favorecen la infiltración; además, el agua que es absorbida por las raíces, disminuye la presión capilar y aumenta la estructura del suelo (Figura 14).

La función mecánica de la vegetación para controlar la erosión radica en la estabilidad que transfiere al suelo en donde se desarrolla. Las raíces retienen las partículas del suelo, aumentan su resistencia a la remoción por el escurrimiento superficial y ofrecen anclaje al penetrar al estrato profundo, también funciona como contrafuerte para evitar el transporte de partículas. Los tallos y las hojas cubren la superficie del suelo, y proporcionan protección contra el flujo.



**Figura 14. Mecanismos de la vegetación para reducir procesos hidrológicos (a) y de erosión del suelo (b).**

Las técnicas de bioingeniería se han utilizado para el control de la erosión en laderas, recuperar zonas con movimiento en masa, protección de taludes en carreteras, corrientes y control de la erosión en los taludes, lecho y en la parte alta de la cárcava (erosión remontante). Las técnicas de bioingeniería se combinan utilizando estructuras rígidas o flexible como presas, troncos, materiales sintéticos, etc., como vegetación ya sean especies arbóreas, arbustivas y herbáceas. A continuación se presenta una breve descripción de algunas técnicas de bioingeniería, que se utilizan para controlar la erosión del suelo.

**Empalizada.** Esta técnica consiste en el establecimiento de una barrera que permita estabilizar el terreno y retener sedimentos. La barrera se construye con estacas vivas, vigas de madera o con una combinación de ambas que se colocan en el terreno a una profundidad de 30 cm. El elemento estructural importante en la empalizada, es el trenzado de ramas vivas; estas se fijan a los postes con alambre y se asegura que los extremos de las ramas queden enterrados para permitir el desarrollo de sus raíces. Las especies utilizadas en esta técnica deben ser flexibles y de fácil enraizamiento (Figura 15). Se recomienda su uso en el control de la erosión en surcos y en cárcavas en forma de V de poca profundidad (COITAPAC, 1998; Lammeranner *et al.*, 2005).





**Figura 15. Empalizada.**

Fuente: <http://documents.worldbank.org/curated/en/411851468287165000/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>

**Fajinas.** Esta técnica consiste en armar manojos o haces de ramas que son colocados de manera horizontal en zanjas de poca profundidad (10-20 cm) que se contraponen a la dirección de la pendiente. La longitud de la fajina se adecua a las condiciones particulares de cada lugar, pues el armado de los manojos considera agrupar varias ramas en donde únicamente debe cuidarse la orientación de las yemas apicales. Las especies empleadas deben ser leñosas de fácil propagación. Las fajinas permiten disipar la energía del agua, reducir la longitud de la pendiente, estabilizar los taludes, retener sedimentos y, con ello, ofrecer condiciones para el desarrollo de la vegetación natural (Figura 16). Se recomienda su uso en el control de erosión en surcos y cárcavas (Li y Eddleman, 2002; Lammeranner *et al.*, 2005; Fay *et al.*, 2012).



**Figura 16. Fajinas.**

Fuente: <http://tevilamarxant2015.blogspot.mx/2015/12/construccion-de-fajinas-en-terrenos.html>

**Geomallas.** Esta técnica conjuga el papel protector de las mallas con los beneficios de la vegetación. Las mallas pueden ser de composición orgánica o inorgánica y son colocadas sobre el terreno, con lo que ofrecen protección inmediata contra la erosión, en espera del establecimiento óptimo de los esquejes, cuando se asocia con capas de vegetación o de las semillas cuando se asocia a hidrosembado (Figura 17). La característica más sobresaliente de la práctica, es que puede ser utilizada en terrenos con mucha pendiente y que favorece una estabilización eficiente. Sin embargo, el costo de los insumos y su implementación es la principal limitante (Li y Eddleman, 2002; Dhital *et al.*, 2013).



**Figura 17. Geomallas.**

Fuente: <http://www.restauracionpaisajistica.com/blog/reparacion-y-estabilizacion-de-carcavas-en-olivares/>

**Enramado.** La técnica consiste en colocar una capa de esquejes de plantas leñosas y después se cubre con la tierra excavada y así sucesivamente, se conforman pequeñas terrazas sucesivas. Se prefieren especies de fácil enraizamiento, con un desarrollado sistema de raíces adventicias y que toleren bien las condiciones de enterramiento. La particularidad en esta práctica es la orientación de las ramas que corresponde con la dirección de la pendiente (Figura 18). Las ventajas de la práctica es que se reduce la velocidad de escurrimiento, la longitud de la pendiente, se favorece la infiltración, se retienen sedimentos y se da mayor estructura al suelo por el sistema de raíces (Li y Eddleman, 2002).



**Figura 18. Capas de enramado.**

Fuente: <http://www.terraerosion.com/projects/T-Pit.htm>

**Empastado de taludes.** Método de estabilización de taludes en cárcavas que se basa en el establecimiento de zacates que protegen, por la densidad del sistema radical y de la capacidad de cobertura vegetal del terreno. El empastado se realizará con especies de rápido enraizamiento, adaptadas a las condiciones climáticas locales. El empastado se efectuará, de preferencia al inicio de la temporada de lluvias y tendrán que considerarse, en su caso, algunos riegos de auxilio para el establecimiento definitivo de los zacates. Los empastados pueden sembrarse directamente plantando estolones o sembrando semillas sobre una capa de suelo orgánico (Figura 19) (COLPOS, 2009).



**Figura 19. Empastado de taludes**

Fuente: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Julio/Documents/Obras%20complementarias%20al%20proyecto%20integral.pdf>

**Terrazas de muro vivo.** Establecimiento de especies vegetales de fácil enraizamiento fundamentalmente perennes, alineadas dentro del bordo o zanja que conforman una terraza. El establecimiento de los muros vivos se hace específicamente en las secciones transversales que



conforman una terraza con especies perennes de rápido enraizamiento, o la siembra de especies arbórea o zacates (vetiver, limón, etc.) que se siembran en hilera y que al crecer forman una barrera viva que detiene el suelo y van formando una terraza. Para pendientes pronunciadas, se recomienda combinar esta práctica con otro tipo de terraza, zanja bordo o estructura de piedra acomodada (Figura 20) (COLPOS, 2009).



**Figura 20. Terraza de muro vivo.**

Fuente: <https://diplomadoavs.files.wordpress.com/2014/07/manual-restauracion3b3n-de-suelos-4.pdf>

**Barreras de especies vegetales y tierra.** Son hileras de troncos vivos que se entierran en el suelo y se colocan transversales en el lecho de la cárcava con una separación de 30 a 50 cm. Entre los troncos se colocan ramas entrelazadas, tierra y piedras para formar un pequeño muro cuyo fin es retener los azolves, dejando un desagüe en las márgenes. Los troncos enterrados retoñan y se convierten en árboles que forman una hilera viva que con los sedimentos retenidos van formando una pequeña playa. Una vez que se han retenido los azolves, se entierran más troncos en ambas márgenes de la barrera inicial para incrementar el área de captación de sedimentos y conformar una playa o terraza más grande que se puede utilizar como área de cultivo. Posteriormente aguas arriba de la barrera y hasta donde llegan los azolves retenidos se construye otra barrera con troncos y ramas para formar una serie de terrazas escalonadas, siendo esta una tecnología regional de la región Mixteca de Oaxaca (Comunicación personal con dueños de predios en 2015) (Figura 21a).

**Barreras vivas con material vegetal, troncos y tierra.** Para el control de la erosión de cárcavas el uso de cualquier material es importante, ya que reduce la velocidad y capacidad de remoción y transporte del flujo superficial. En campo, los productores asocian polines de madera con costales llenos de tierra, y aguas arriba, colocan vegetación para conformar un pequeño muro que evita que la cárcava crezca en ancho y profundidad (Figura 21b).

**Barreras vivas.** Son hileras de plantas establecidas en forma perpendicular a la pendiente, de preferencia siguiendo las curvas a nivel, para reducir la velocidad del escurrimiento, favorecer la infiltración y retener las partículas del suelo arrastradas por el agua (Nuñez, 2001; León, 2009). Las especies que se utilizan son palo Brasil (*Dracaena fragrans*), colorín (*Erythrina americana*), bambú (*Bambusa vulgaris*), entre otras, que al enterrarse en el suelo desarrollan raíces y conforman una barrera viva (Figura 21c).



**Figura 21. Barreras de especies vegetales (a), Barreras vivas con troncos y costales y tierra (b) y Otras barreras vivas (c).**

Fuente: CONAGUA, [http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2496&context=envs\\_facpub](http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2496&context=envs_facpub)

Las especies vegetales utilizadas como barreras vivas, presentan las siguientes características:

- Raíces. Las especies con un sistema radical poco profundo, pero con gran desarrollo horizontal son más recomendables para el control de la erosión. En específico, para dar estabilidad al suelo, se requieren de especies con sistema radical profundo que les permita anclar el suelo.
- Hábito de crecimiento. Se prefiere el establecimiento inicial de especies de porte bajo o bien de porte alto pero asociadas a herbáceas, zacates o arbustos. Debe tenerse en consideración que el material leñoso, además, proporciona ventajas mecánicas y estructurales.
- Tasa de crecimiento. Es preferible utilizar especies de rápido crecimiento que se adapten con facilidad a las condiciones adversas.

- Ciclo de crecimiento. Las especies seleccionadas deben garantizar protección del suelo en la temporada de lluvias. En particular, las especies leñosas ofrecen la ventaja respecto a las demás de producir ramas o troncos para otros usos.
- Propagación. Se consideran deseables las especies que cuentan con esta característica, ya que necesitan menos tiempo para desarrollarse y proporcionar protección al suelo que el requerido por las especies que se reproducen sexualmente (Morgan y Rickson. 2003; Morgan, 2005).

Las especies vegetales que más se han utilizado para la recuperación (árboles, arbustos y zacates) se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Principales especies propagadas como barreras vivas.**

NOMBRE CIENTIFICO	NOMBRE COMUN	VENTAJAS
<i>Azadirachta indica</i>	Neem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al pastoreo</li> <li>• Tolera suelos pobres</li> </ul>
<i>Bambusa vulgaris</i>	Bambú	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al pastoreo y fuego</li> <li>• Tolera inundación</li> </ul>
<i>Calliandra calothyrsus</i>	Cabello de ángel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrolla en suelos pobres</li> <li>• Fija nitrógeno</li> </ul>
<i>Cynodon dactylon</i>	Zacate bermuda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al pastoreo</li> <li>• Tolera suelos pobres e inundaciones.</li> </ul>
<i>Gliricidia sepium</i>	Cocuite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrolla en suelos pobres y fija nitrógeno</li> </ul>
<i>Haematoxylum campechianum</i>	Palo campeche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolera suelos pobres y sequía</li> </ul>
<i>Leucaena leucocephala</i>	Guaje blanco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrolla en suelos pobres y fija nitrógeno</li> </ul>
<i>Panicum maximum</i>	Pasto Guinea	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al pastoreo</li> <li>• Se desarrolla en suelos pobres</li> </ul>
<i>Pennisetum purpureum</i>	Pasto Elefante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al pastoreo</li> </ul>
<i>Psidium guajava</i>	Guayabo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrolla en suelos pobres</li> </ul>
<i>Vetiveria zizanioides</i>	Zacate vetiver	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al pastoreo y al fuego</li> <li>• Tolera condiciones de sequía.</li> </ul>
<i>Arundo donax</i>	Carrizo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolera inundaciones</li> </ul>
<i>Erythrina americana</i>	Colorín	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se desarrolla en suelos pobres</li> <li>• Fija nitrógeno</li> </ul>

Las especies más utilizadas en el control de la erosión en cárcavas son el colorín, el carrizo y el zacate Vetiver y cuyas características se presentan a continuación:

**Colorin.** La especie *Erythrina americana* Mill., conocida comúnmente como “colorín” o “pipal”, es un árbol de 4-5 m de alto, presenta una copa con ramificación abundante y una corteza lisa de coloración parda. Las ramas están armadas de espinas y las hojas son alternas y



trifoliadas, con folíolos en forma ovada-romboidal. El folíolo terminal mide de 9.5 a 16 cm de largo por 8.5 a 14 cm de ancho los folíolos laterales miden de 8 a 14.5 cm de largo por 6 a 10 cm de ancho. Legumbre de hasta 12 cm de largo, constreñida entre las semillas y termina en un largo y estrecho pico curvado. Las semillas son oblongas, de color rojo y de entre 0.7 y 1 cm de largo. Flores acomodadas en espigas terminales, corola de color carmín, ligeramente pubescente y compuesta por un pétalo de 6 cm de largo en forma de hoz y 10 estambres de color blanco (Figura 22), (García *et al.*, 2001; Niembro *et al.*, 2010).

Esta especie es aprovechada en la medicina tradicional para aliviar el dolor de muelas, el insomnio, la fiebre y tiene un efecto sedante. Por otro lado, las flores del colorín, son utilizadas para el consumo humano por su agradable sabor y su rico contenido en proteínas y lípidos. La madera, es aprovechada para la elaboración de artesanías y como ornamental, los árboles de colorín se cultivan en plazas y jardines. El colorín es utilizado para el sombreado de cultivos y como cercos vivos (Brito, 2005).

El género *Erythrina* reviste de gran importancia para recuperar zonas degradadas por su fácil propagación, rápida tasa de crecimiento, baja demanda de nutrimentos y su valor como leguminosa para mejorar la fertilidad del suelo (Ramírez *et al.*, 2003). En Oaxaca, se impulsa el empleo de barreras vivas de *Erythrina americana* como una técnica de conservación de suelo por considerarse una especie que enriquece el suelo (Edouard *et al.*, 2004). Otras especies del genero *Erythrina*, como es el caso de *Erythrina suberosa*, se han recomendado para ser empleadas en el control de la erosión como barreras vivas para reducir la longitud de la pendiente y retener sedimentos (Singh y Haigh, 1995) o como en el caso de proyecto de estabilización de taludes realizado en Nepal, donde se implementaron técnicas de bioingeniería para el control de la erosión entre las que se menciona el uso de algunas especies de *Erythrina*.



**Figura 22. Colorín especie utilizada como barrera viva para el control de la erosión en cárcavas.**

**Carrizo.** El *Arundo donax* L., es un zacate perenne muy alto, parecido al bambú, con culmos de 2 a 6 m de altura, erectos o arqueados, a veces ramificados en la parte distal, gruesos y lignificados hasta de 3 cm de diámetro. Las numerosas hojas miden alrededor de 5 cm de ancho y de 30.5 a 61 cm de largo. Las hojas son similares a las de una planta de maíz, sus orillas son afiladas. La inflorescencia, que aparece a finales del verano es una pluma de 0.3 a 0.6 m de largo, que sobresale de la parte superior del follaje, al inicio es de color púrpura, pero se vuelve gris plateado con el tiempo. Este carrizo gigante se dispersa a través de rizomas gruesos y nudosos. Una vez establecido tiende a formar masas de raíces clonales largos y continuos. Estas masas de raíces pueden alcanzar más de 1 m de grosor (Figura 23) (CONABIO 2012).

Las ventajas de esta especie para ser utilizada como barrera viva es principalmente que se propaga por el enraizamiento de los tallos o establecimiento de los rizomas y por otro lado, que se adapta fácilmente a condiciones adversas de suelo y clima; la humedad, es un factor limitante en su establecimiento, pero posterior a ello, puede desarrollarse sin aporte constante de agua.

El riesgo de establecer esta especie en la rehabilitación de zonas degradadas es que, de no tener control de su expansión, puede desplazar a la vegetación nativa; además de que favorece la propagación de incendios y estos a su vez consolidan el predominio de esta especie que tiene la capacidad de establecerse de inmediato después de un incendio por las reservas almacenadas en los rizomas (CONABIO, 2012; Deltoro *et al.*, 2012).



**Figura 23. Carrizo especie utilizada como barrera viva para el control de la erosión en cárcavas.**

**Zacate Vetiver.** La especie *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash, es nativa de Asia. Es un zacate con tallos de hasta 2 m, comprimidos. Vainas glabras, cercanamente traslapadas; lígula 0.5-1.5 mm; láminas basales hasta 100 cm x 6-8 mm, glabras excepto pelosas en el haz arriba de la lígula.



Panícula hasta 50 cm, cilíndrica; ramas numerosas, hasta 10 cm, ascendentes. Espiguillas purpúreas; glumas 4-5.5 mm, iguales, 3-5-nervias; lema inferior ligeramente más corta que las glumas; lema superior débilmente nervada, diminutamente aristada; anteras 1.8-2.1 mm. La planta crece en grandes macollas a partir de una masa radical muy ramificada y "esponjosa". Se logra desarrollar en condiciones de aridez o inundaciones (Banco Mundial, 1995; Greenfield, 2016).

Se ha documentado su uso amplio como barreras vivas por las características de su sistema radical, que permite fijar el suelo hasta una profundidad de tres metros; al formar una densa cortina subterránea; impide la formación de surcos, cárcavas y túneles (Figura 24) (Banco Mundial, 1995; Ruiz *et al.*, 2001).



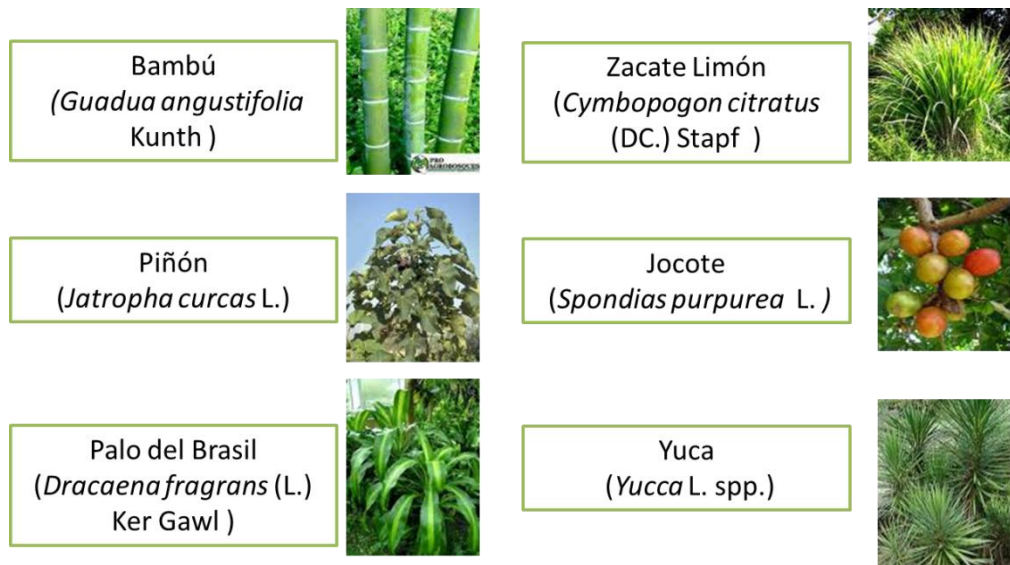
**Figura 24. Uso del zacate Vetiver para el control de la erosión en cárcavas**

Fuente: Vetiver.org y Vetiver Indonesia, <http://www.vetiver.org/ICV4pdfs/DC04.pdf>

Varias investigaciones han documentado el uso de barreras vivas como un método eficaz, para recuperar los sistemas de cárcavas y con ello reducir la producción de sedimentos. En los Alpes del sur de Francia, se probó con éxito el uso del sauce (*Salix* sp.) en el establecimiento de barreras vivas para el control de la erosión en cárcavas (Rey y Burylo, 2014). Se establecieron barreras de *Erythrina arborescen*, en las Montañas Altas de Nepal, para estabilizar cárcavas y se probó que esta especie proporcionar un soporte mecánico inmediato para retener el suelo y una

adaptación satisfactoria a las condiciones ambientales, lo que asegura su permanencia (Lammeranner *et al.*, 2005).

En Chiapas, se han utilizado varias especies vegetales como Bambú, Piñón, Palo del Brasil, Zacate Limón, Jocote y Yuca, en el establecimiento de barreras vivas en laderas y cárcavas, para reducir el flujo superficial y retener azolves (Vivero Chiapas, Comunicación personal) (Figura 25).



**Figura 25. Especies utilizadas como barreras vivas en Chiapas, México.**

#### **2.4. Experiencias del control de la erosión en cárcavas.**

El control de cárcavas en México, lo realizan los programas de gobierno del área forestal (CONAFOR), agricultura (SAGARPA) y restauración hidrológica (CONAGUA), con la participación de los productores utilizando estructuras tanto temporales como permanentes para la recuperación de suelos erosionados de zonas agrícolas, ganaderas y forestales.

##### **2.4.1. CONAFOR**

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), utiliza las presas de control de azolves temporales hechas con malla de alambre, morillos, ramas y geocostales para el control de cárcavas pequeñas y las presas permanentes construidas con piedra acomodada, llantas, mampostería y gaviones, para cárcavas grandes. Para el control de la erosión de la parte alta de la cárcava, se lleva a cabo el cabeceo de cárcavas, con el fin de detener el crecimiento de la cárcava aguas arriba colocando piedra, cemento o material vegetal muerto. Así mismo, ejecutan acciones de estabilización de taludes, como el despalme de las paredes de la cárcava para alcanzar un ángulo de estabilidad que evite deslizamientos y, después, el recubrimiento de los taludes con malla de alambre, piedra

acomodada, troncos, costales rellenos o algún otro material disponible en la zona de trabajo. Los trabajos realizados han logrado recuperar terrenos degradados.

El control de cárcavas utilizando presas de control de azolves temporales considera costos variables, ya que las presas temporales implican menos inversión que las presas permanentes, por los materiales y mano de obra considerada. Para el control se sigue el método de construcción de las presas de cabeza pie y el cabeceo de la cárcava, lo que implica la construcción de varias presas, elevando costos para lograr reducir el crecimiento de las cárcavas (Figura 26).



**Figura 26. Presas de piedra acomodada para el control de la erosión en cárcavas**

(CONAFOR, 2007)

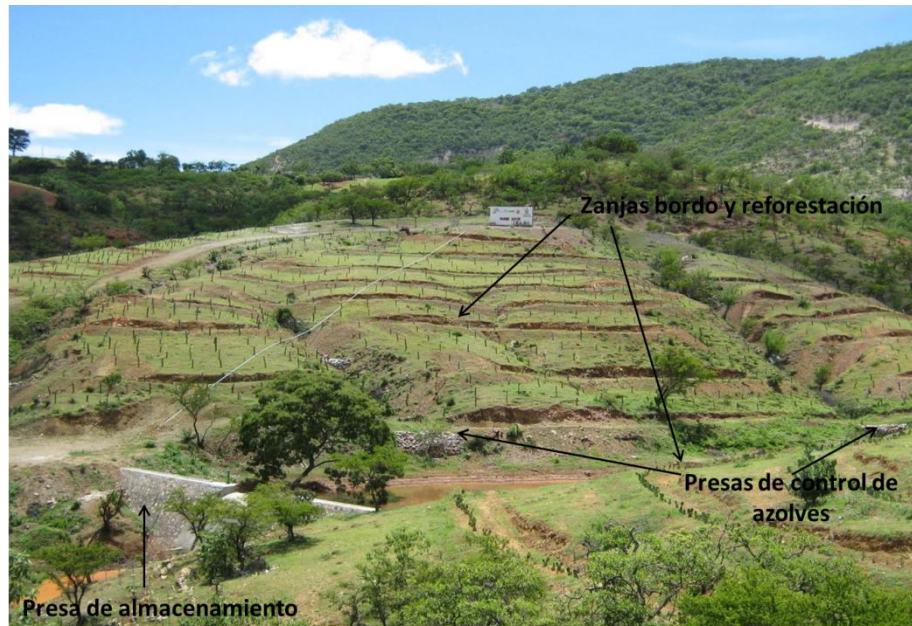
#### 2.4.2. SAGARPA

El Componente de Infraestructura Productiva para el aprovechamiento Sustentable del Suelo y Agua (IPASSA) realiza acciones de control de cárcavas en terrenos agropecuarios y en las partes altas de las obras de almacenamiento de agua. Las primeras se utilizan para evitar el crecimiento de las cárcavas y la recuperación de terrenos considerando el cabeceo de cárcavas y las segundas se construyen para retener los azolves y proteger las obras de infraestructura para el almacenamiento de agua.

Las obras de conservación del suelo y agua como la construcción de una presa de almacenamiento, zanjas bordo, reforestaciones con plantas nativas (cactáceas) y presas de



control de azolves, son acciones que realiza la SAGARPA para proteger el suelo, retener azolves y captar agua para su aprovechamiento en actividades productivas (Figura 27).



**Figura 27. Proyectos integrales de conservación del suelo y agua**

(SAGARPA, 2012)

#### 2.4.3. CONAGUA

La CONAGUA realiza obras de protección de cauces (corrientes y cauces) como parte de la restauración hidrológica ambiental, con el propósito de reducir la velocidad del flujo superficial y controlar las avenidas para reducir los escurrimientos máximos que pueden producir inundaciones en las partes bajas de las cuencas. Para ello, construyen presas filtrantes con especies vegetales, geocostales, piedra acomodada, gaviones y mampostería en los cauces principales y en las cárcavas, prácticas de manejo del suelo y vegetación en las laderas (Figura 28).



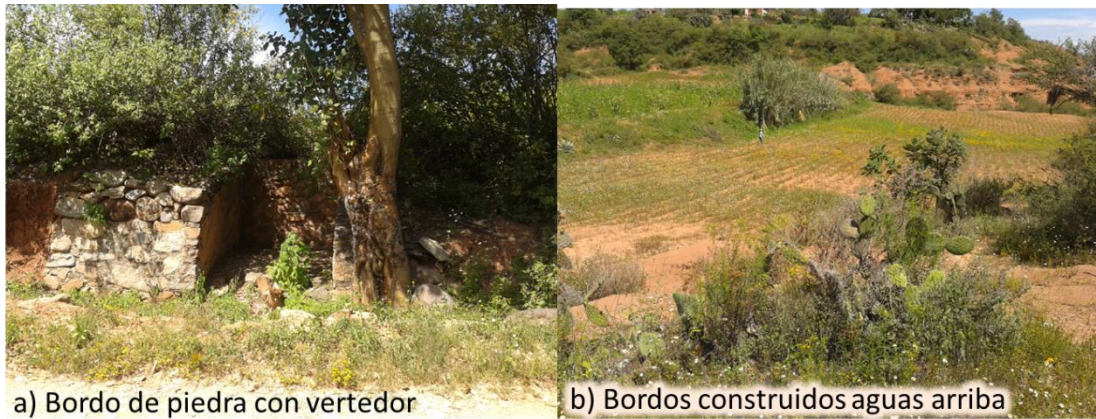
**Figura 28. Acciones de restauración hidrológica (CONAGUA, 2012)**

#### 2.4.4. Experiencias de productores

Los productores de la región Mixteca de Oaxaca realizan obras y prácticas de conservación del suelo en terrenos degradados, con la finalidad de recuperar suelo para reincorporarlos a la producción de alimentos o con el propósito de reducir el crecimiento de las cárcavas.

#### 2.4.5. Lama bordo

El sistema lama bordo o jolla, es una práctica de conservación que se remonta a la época prehispánica y consiste en la construcción de bordos en las barrancas o cañadas de los cerros o en las cárcavas que permite retener el suelo que es arrastrado por los escurrimientos y conservar la humedad para formar playas o terrazas y así establecer cultivos. La construcción se inicia con un bordo de piedra y tierra con su estructura vertedora (Figuras 29a) y posteriormente se construyen bordos de tierra con especies vegetales (carrizo, pipal, etc.) para conformar la terraza (Figura 29b). Para el buen funcionamiento del sistema de terrazas (Conocidos por los mixtecos como “Coo”) requiere de mantenimiento permanente para tener terrenos de cultivos con buen potencial.



**Figura 29. Sistemas de lama bordo en la zona de Tiltepec, Oaxaca (Fotos 2013).**

#### 2.4.6. Control de cárcavas de los productores

El uso de barreras vivas para el control de cárcavas se encontró en la zona de estudio, como una técnica tradicional, donde el Sr. Adrián García Lara, originario de la comunidad de Santa María Tiltepec hace uso de especies tanto arbustivas (chamizo negro) como arbóreas (pipal o colorín) para el establecimiento de las barreras. La técnica consiste en plantar hileras de colorín a una distancia de un metro entre plantas y una hilera aguas arriba de chamizo negro (*Baccharis heterophylla*).

La construcción se realiza en etapas: conformación de la barrera viva, ramas de colorín y de otras especies nativas; revisión del funcionamiento de la estructura después de cada avenida y reparación de daños si fuera el caso; hacerlo año con año para ampliar la longitud de la barrera y colocar piedras y tierras para reforzar la estructura, procurando dejar una salida, debidamente protegida con ramas y piedras para el desagüe de las avenidas (Figura 30).







**Figura 30. Barreras vivas construidas para el control de cárcavas (Fotos 2013).**

### **2.5. Evaluación de obras y prácticas para el control de la erosión en cárcavas**

Villa (2014) evaluó la eficiencia de las presas filtrantes de gaviones construidas en el cauce de la comunidad San Francisco Esperilla en la región Tehuacán-Sierra Negra, Puebla, para retener los azolves y proteger la presa de almacenamiento de agua construida aguas abajo. Se construyeron siete presas de gaviones con el criterio cabeza - pie para retener azolves y se encontró que la presa ubicada en la parte alta (PPV7) con una capacidad de retención de suelo de  $108 \text{ m}^3$ , alcanzó una eficiencia del 100%, ya que el volumen de azolves almacenado fue  $108 \text{ m}^3$ ; las presas construidas aguas abajo fueron disminuyendo su eficiencia para captar azolve ya que la presa (PPV1) de la parte más baja hasta del sistema tuvo una eficiencia del 27.5% para captar sedimentos (Figura 31 ).



Presa	Eficiencia Técnica (%)
PPV 1	27.5
PPV 2	14.9
PPV 3	47.8
PPV 4	29.1
PPV 5	54.5
PPV 6	54.2
PPV 7	100.0

**Figura 31. Presas filtrantes de gaviones construidas para retener azolves**

Para lograr el objetivo de retener los azolves antes de que lleguen a la presa de almacenamiento se podrían haber construido presas en forma escalonada, empezando con la presa de la parte baja y cuando esta se llene con azolves, construir otra presa aguas arriba para aprovechar las avenidas con su carga de sedimentos y así sucesivamente hasta estabilizar la cárcava. Esto significaría que las obras deberían construirse en varios años.

Oropeza *et al.* (1990) evaluaron el impacto de un muro para el control de azolves (gaviones y tierra compactada) construido en la parte baja del área de aportación para retener azolves y estabilizar el crecimiento de las cárcavas en una zona de cárcavas de 14 ha en el río Texcoco. En los años de 1982 y 1983 se realizaron los levantamientos topográficos para que con la curva de áreas y capacidades y utilizando el método área-incremento, se estimó que se habían retenido 3,750 m<sup>3</sup> de sedimentos<sup>1</sup> formando una pequeña terraza de cultivo (Figura 32 y Cuadro 3)

<sup>1</sup> Considerando una densidad aparente de 1.6 t m<sup>-3</sup> el peso de azolves retenidos fue de 6 mil toneladas que dan una degradación específica de 214 t ha<sup>-1</sup>





**Figura 32. Muro de contención (gaviones y tierra) para retener azolves.**

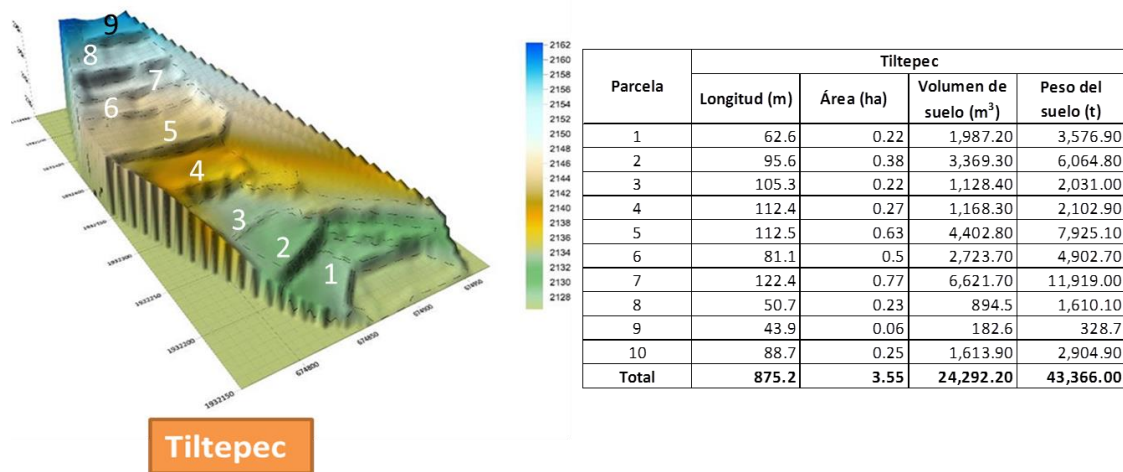
Fuente: Oropeza, *et al* (1990)

Es importante destacar que la función del muro construido aguas abajo fue retener azolves, formar terrazas y evitar el crecimiento de las cárcavas. Después se planteó a los dueños de los terrenos que se construyeran otros bordos en las tres cárcavas principales que conforman el sistema, pero se negaron. Después de 30 años, la terraza que se formó se cultiva anualmente y la parte alta de la zona de cárcavas se encuentra estable, con vegetación y sin crecimiento de las cárcavas (Visita de campo, 2016)

**Cuadro 3. Estimación de los volúmenes de azolves retenidos en el área con cárcavas**

Elevaciones	Areas	Capacidades	Areas	Volumen	Areas	Volumnes
			Corregidas	Corregido	Diferenciales	Diferenciales
(m)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )
2,699.50	2.53	1.27	2.53	1.27	-	-
2,700.00	65.70	34.22	65.70	34.22	-	-
2,750.50	350.72	209.58	350.72	209.58	-	-
2,701.00	871.28	645.22	871.28	645.22	-	-
2,701.50	1,612.99	1,471.71	1,612.99	1,451.71	-	-
2,702.00	2,092.63	2,498.03	2,092.63	2,498.03	-	-
2,702.50	2,496.63	3,746.34	940.37	2,339.41	1,556.26	1,406.93
2,703.00	3,006.41	5,249.55	940.37	2,809.60	2,066.04	2,439.95
2,703.50	3,441.62	6,920.36	940.37	3,279.78	2,501.25	3,640.58
2,704.00	4,128.31	8,948.51	940.37	3,749.97	3,187.94	5,234.54

WWF (2015) evaluó la eficiencia de los sistemas lama bordo para retener azolves en la cuenca de Tiltepec de la región Mixteca y encontró que en un área de drenaje de 3.5 ha se logró acumular un volumen de 43,366 toneladas de sedimento, lo que indica que se han retenido en promedio 12,390 t ha<sup>-1</sup> (Figura 33).



**Figura 33. Evaluación de la retención de suelo en el sistema de Lama Bordo**

Este sistema de lama-bordo fue construido por los productores hace muchos años (información de los productores) con mano de obra y sin apoyo de programas de gobierno. A pesar de estos esfuerzos, más del 50% de las terrazas están abandonadas, se siembra solo el 20% de las parcelas año con año, no se les da mantenimiento, se han destruido algunos bordos, no existe una buena nivelación de las terrazas y destaca que solo a dos terrazas se les ha dado mantenimiento (Entrevista con productores, 2015).

Muñiz (2015) evaluó la eficiencia de las presas filtrantes de morillos en el Parque Nacional del Cofre de Perote, Veracruz para retener azolves en tres cárcavas. El número de presas por cárcavas varió de 7 a 13, los volúmenes promedio de madera en trozas variaron de 49.72 a 60.98 m<sup>3</sup> y los volúmenes promedio de azolves retenidos fluctuaron de 138 a 318 m<sup>3</sup>, lo cual indica que han cumplido con su objetivo. Destaca que para las cárcavas C1, C2 y C3 se obtuvo una relación de 2.27, 6.41 y 3.37 entre el volumen de suelo retenido y el volumen de madera utilizado respectivamente.

La recuperación de cárcavas, involucra el uso de medidas estructurales y vegetales adecuadas en la cabeza, en el fondo y en los taludes de la cárcava (Desta y Adugna, 2012); entre los casos de éxito destacados donde se ha aplicado este enfoque biofísico en zonas degradadas, se encuentran tres tratamientos usados en los condados de Tillman y McClain en Oklahoma, EE.UU., donde se combinan pequeñas presas de gaviones, plantación de árboles, geotextiles y llantas (OFS, 2009).

Un caso de éxito de estabilización de cárcavas ha sido documentado en Dogu'a, Etiopia, donde se combinó la vegetación natural con presas de contención en zonas excluidas del pastoreo y pisoteo del ganado (Reubens *et al.*, 2008). La cárcava Tejares localizada en El Cairo Valle, Colombia, también es un estudio de caso en donde se estabilizó el área degradada con

tecnologías de bioingeniería que principalmente incorporaron barreras vivas, sistemas de drenaje con filtros vivos y siembras de especies vegetales nativas (Rivera, 2012).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

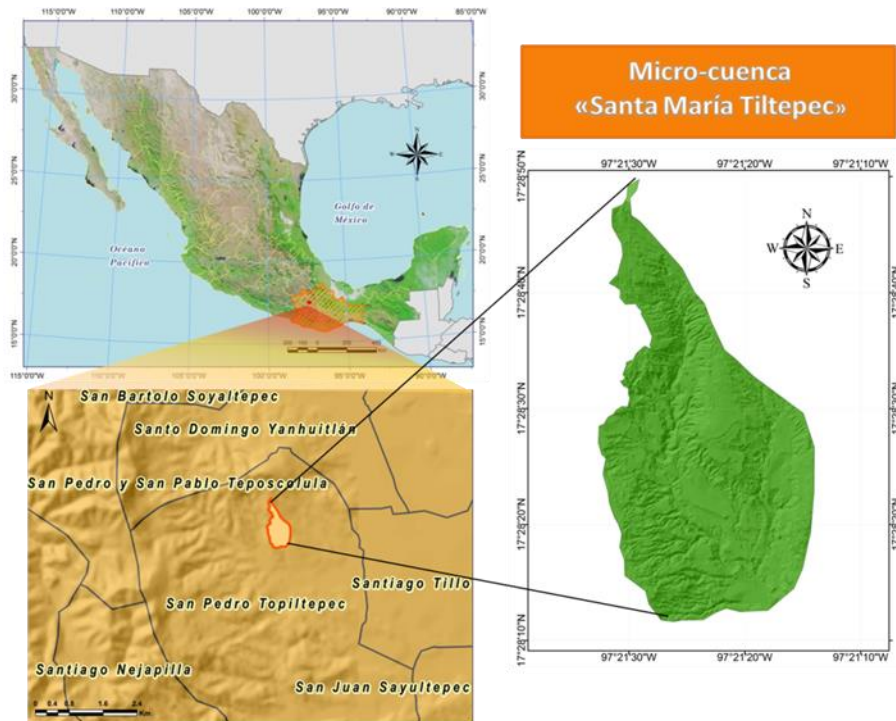
En este apartado se caracterizó el medio biofísico de la microcuenca objeto de estudio; se describieron los procedimientos para caracterizar las cárcavas y las obras de conservación existentes; se definió el diseño y ubicación de las prácticas de bioingeniería; y se establecieron los métodos para evaluar las prácticas y caracterizar la vegetación.

#### 3.1. Descripción del área de estudio.

##### 3.1.1. Localización.

La microcuenca Santa María Tiltepec, se ubica entre los  $17^{\circ}28'49.72''$  y  $17^{\circ}28'10.40''$  Norte y  $97^{\circ}21'30.20''$  y  $97^{\circ}21'14.02''$  Oeste, en el municipio de San Pedro Topiltepec, en la parte noroeste del Estado de Oaxaca (Figura 34).

La extensión de la microcuenca objeto de estudio es de 37.06 ha y como se ha hecho mención, la zona representa un especial interés por el evidente deterioro de los recursos naturales que presenta la mayor parte de su territorio.



**Figura 34. Localización de la micro-cuenca Santa María Tiltepec, San Pedro Topiltepec, Oaxaca .**

### 3.1.2. Caracterización del medio biofísico de la microcuenca

#### 3.1.2.1. Clima

El clima de la región donde se localiza la microcuenca es C(w<sub>1</sub>) (García y CONABIO,1998), que corresponde al grupo de climas templados subhúmedo, con una temperatura media anual de entre 12 y 18°C, y una temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, con un régimen de lluvias de verano y escasa precipitación en el resto del año. El grado de humedad presenta una relación precipitación-temperatura (P/T) que varía de 43.2 y 55. El porcentaje de lluvia invernal varía entre 5% y 10.2% del total anual y la precipitación del mes más seco es menor a 40 mm.

Los datos de temperatura media mensual, precipitación media mensual, evaporación y la evapotranspiración fueron obtenidos de la estación meteorológica de San Mateo Etlatongo (SMN 20265) localizada entre las coordenadas 17° 25´ 00´´ Norte, 97° 16´ 58´´ Oeste a una altura de 2,033 msnm (SMN, 2010). La precipitación media anual de la zona es de 661 mm, con variaciones de 300 y 800 mm y la temperatura media es menor a 22° C y en ninguno de los meses desciende más allá de los 10° C, sugiere un verano fresco (Figura 35).

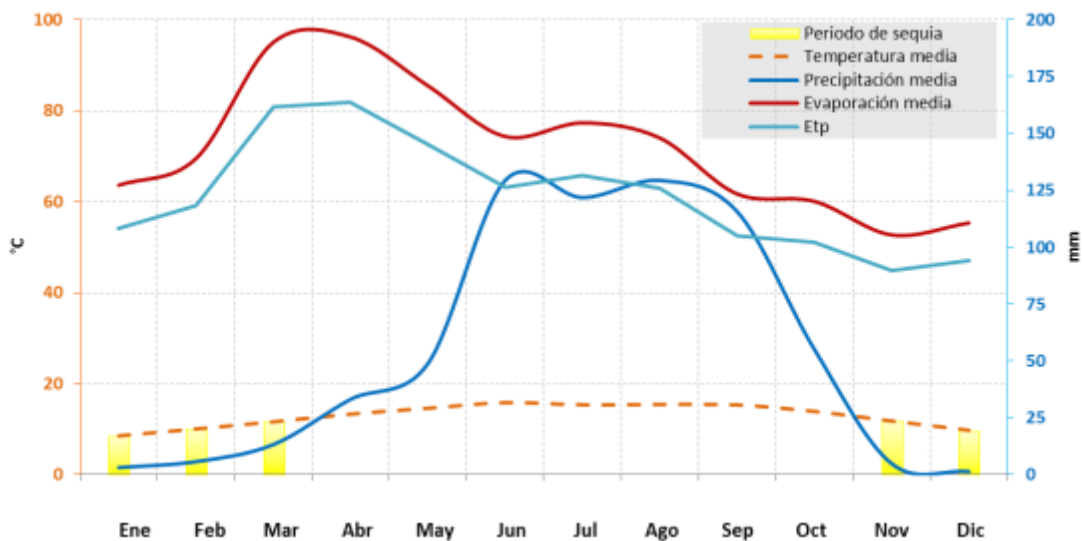


Figura 35. Precipitación, temperatura, evapotranspiración de la zona de estudio.

La zona presenta un periodo de sequía de cinco meses (periodo de invierno) y en los meses húmedos la precipitación está por encima de la línea de temperatura. Cabe mencionar que la relación de precipitación temperatura es de  $P=2T$  (Precipitación es el doble que la temperatura), como lo indica el índice de Gaussen (Figura 35). Es importante señalar que la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación, por lo que se presenta déficit de humedad en el ciclo de desarrollo del cultivo, el cual se incrementa con la presencia de la canícula tan bien marcado en el mes de agosto en la región, lo que pone en riesgo la producción de los cultivos.

El factor clima es importante en la región, ya que la erosión de los suelos se ve acelerada por la presencia de eventos de gran intensidad que provocan escurrimientos con una alta capacidad de remoción y transporte de las partículas del suelo.

La lluvia que se menciona en la zona es de baja intensidad en la mayor parte de los eventos, sin embargo, se presentan de cinco a ocho eventos de alta intensidad en el año, razón por la cual, se hizo un análisis de la lluvia máxima en 24 horas y se encontró de 33 a 102 mm en 24 horas en 11 años (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Análisis de la lluvia máxima en 24 horas en la zona de estudio.**

Año	PPmax 24h (mm)	Año	PP (mm)	m	Prob. de excedencia	Pr (años)	PP esperada (mm)
2001	102.5	2001	102.5	1	0.09	11.00	102.5
2002	88.5	2002	88.5	2	0.18	5.50	88.5
2003	33.0	2009	80.0	3	0.27	3.67	80.0
2004	44.0	2007	62.0	4	0.36	2.75	62.0
2005	44.0	2008	54.0	5	0.45	2.20	54.0
2006	52.0	2006	52.0	6	0.55	1.83	52.0
2007	62.0	2004	44.0	7	0.64	1.57	44.0
2008	54.0	2005	44.0	8	0.73	1.38	44.0
2009	80.0	2010	38.0	9	0.82	1.22	38.0
2010	38.0	2003	33.0	10	0.91	1.10	33.0

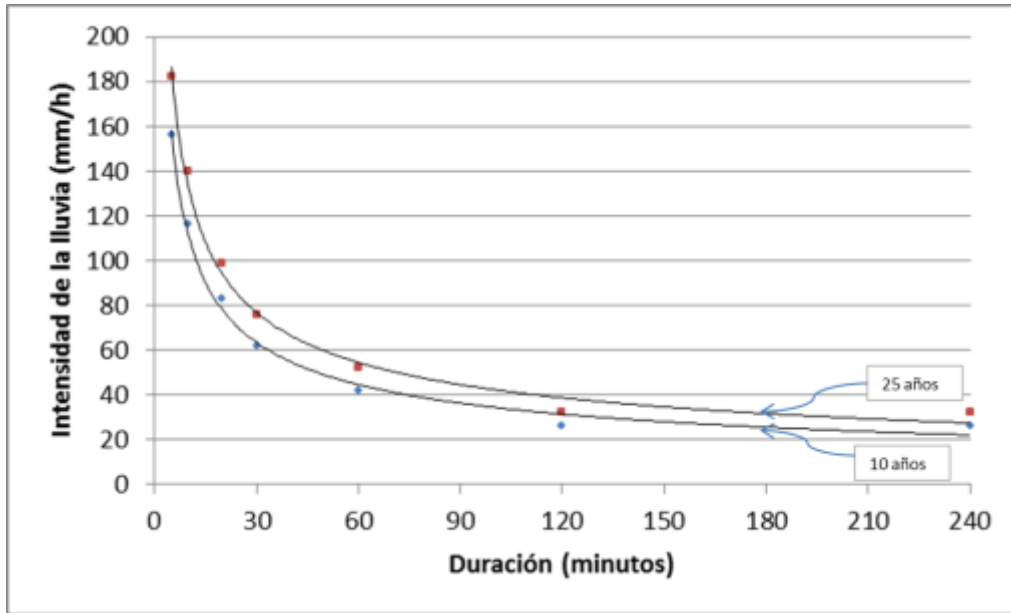
Fuente: Elaboración propia con datos diarios de la estación 20265 (SMN, 2015).

Con la información del Cuadro 4 se obtuvo la precipitación máxima en 24 horas de 100 mm para un periodo de retorno de 10 años. El método Gumbel para valores extremos de precipitación fue utilizado, tomando en cuenta, los periodos de retorno obtenidos con los datos observados y ajustándoles a la función probabilística de Gumbel. Con este procedimiento se encontraron las lluvias máximas en 24 horas para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno**

Pr (años)	Factor	PP esperada (mm)
10	1.00	102.70
25	1.25	125.90
50	1.50	143.10

La precipitación en la zona a pesar de ser errática presenta lluvias de alta intensidad y corta duración, por lo que se obtuvo información de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia reportadas por SCT (2016), lo que muestra la variación de la intensidad de la lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno (Figura 36).



**Figura 36. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la zona de estudio**

Es importante señalar que las lluvias de poca duración (menos de 30 minutos) son de alta intensidad mayores de  $60 \text{ mm h}^{-1}$  para los dos periodos de retorno (10 y 25 años), lo que sugiere que los escurrimientos máximos instantáneos de las avenidas extraordinarias serán muy altos y con una gran capacidad de remoción y transporte de sedimentos.

#### 3.1.2.2. Suelos

En la microcuenca, según datos del INEGI (2007), la unidad de suelo dominante es Phaeozem Calcárico Endoléptico. Estos suelos se caracterizan por presentar una capa superficial oscura y rica en materia orgánica, con alta saturación de bases y aunque son aptos para el uso agrícola; también son muy susceptibles a la erosión hídrica y eólica; en particular, estos suelos presentan cementaciones entre los 50 y 100 cm de profundidad.

Los terrenos de la región fueron sometidos a la deforestación, el sobrepastoreo y el manejo agrícola, situación que propicio que disminuyera la cobertura del suelo y su capacidad para proteger a los suelos de la erosión, razón por la cual, los suelos se han erosionado, han perdido las capas superficiales y aparecen los horizontes C. Los suelos de la zona de estudio fueron muestreados en tres sitios y se encontró que la textura varía de franco arenoso a franco, los contenidos de materia orgánica son muy bajos, el pH es ligeramente alcalino, la densidad aparente de los suelos es mayor de  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$ , la capacidad de retención del agua en el suelo es baja y la conductividad hidráulica de los suelos fluctúa de baja a media (Cuadro 6).

## Cuadro 6. Características de los suelos de la región

Sitio	Prof (cm)	% Arena	% Arcilla	% Limo	Clase Textural	% MO	pH	Dap	PMP	CC	% Sat	Cond Hid (cm h <sup>-1</sup> )
								(g/cm <sup>3</sup> )				
1	0 - 9	43	18	39	Franco	0.5	7.9	1.4	14	25	39	0.76
	9 - 100	31	22	47	Franco	0.1	8.0	1.9	16	27	41	1.37
2	0 - 35	32	20	48	Franco	0.1	8.1	1.7	10	17	31	0.84
	> 35	53	16	31	Franco Arenoso	0.1	8.1	1.4	15	21	37	2.32
3	> 30	10	50	40	Arcilloso Limoso	0.9	7.9	1.8	19	30	51	0.64

MO = Materia orgánica; Dap = Densidad aparente; PMP = Porcentaje de marchitamiento permanente; CC = Capacidad de campo; Sat = Porcentaje de saturación; Con Hid = Conductividad hidráulica

Fuente: Datos del proyecto “Módulos demostrativos para el monitoreo de los servicios ecosistémicos en la Mixteca de Oaxaca”. WWF. Octubre del 2015.

La erosionabilidad los suelos de la región estimada con el método de Wischmeier *et al.* (1971) varía de 0.05 a 0.06, es considerada como alta, lo cual indica la baja resistencia o alta susceptibilidad de los suelos a la remoción y transporte por la lluvia y el escurrimiento. La agresividad de la lluvia y la poca resistencia del suelo a los procesos erosivos convierten a esta zona como de gran riesgo erosivo.

### 3.1.2.3. Geología

Las rocas presentes en la microcuenca, corresponden a las ígneas extrusivas, específicamente del tipo de las andesitas, un tipo de roca volcánica. En la mayor parte de la microcuenca, las rocas presentes son sedimentarias, de tipo Limolita-Arenisca; las limolitas, están constituidas por material que es arrastrado a la cuenca de sedimentación de fuentes lejanas y las areniscas, están formadas por fragmentos del tamaño de la arena y minerales como el cuarzo y los feldespatos (INEGI, 1988).

La falta de vegetación en los terrenos, ha propiciado que los procesos erosivos, como fue señalado previamente, provoquen la erosión laminar y en cárcavas dejando ver en los cortes de las cárcavas, la presencia de capas de material consolidado en capas del tipo sinclinal y anticlinal que conforman un drenaje difuso (Figura 37).

Es importante hacer notar que la presencia de estas capas protege al suelo contra el crecimiento de cárcavas, sin embargo, con los cambios de los contenidos de humedad de estos materiales, causados por los procesos de secado y humedecimiento originados por la presencia de lluvia y escurrimientos, se genera menos resistencia al proceso erosivo hasta que colapsan y ocurre la erosión en masa en los taludes de las cárcavas (Figura 37A). En el lomo de la cárcava se aprecia la presencia de una capa de material resistente a la erosión que al fracturarse y romperse propicia la producción de sedimentos (Figura 37B).





**Figura 37. Presencia de material parental en la zona de estudio**

#### 3.1.2.4. Tipo de vegetación

INEGI (2011), reportó como un pastizal inducido, el tipo de vegetación en la zona y se caracteriza por la dominancia de especies gramíneas y se establece como consecuencia del desmonte de la vegetación clímax. En altitudes menores a los 3 mil msnm, como es el caso de la microcuenca Tiltepec, los pastizales inducidos son derivados de bosques de pino y encino, que fueron sometidos al sobrepastoreo, tala, incendios y el establecimiento de zonas de cultivo. Los géneros que se mencionan para este tipo de vegetación son *Andropogon*, *Aristida*, *Bouteloua*, *Bromus*, *Deschampsia*, *Hilaria*, *Muhlenbergia*, *Stipa*, *Trachypogon* y *Trisetum*. En la zona prevalecen pequeñas áreas planas o playas que algunas de ellas se utilizan ocasionalmente para la agricultura y en la mayor parte de ellas, se ha comenzado a establecer la vegetación natural con la presencia de zacates y plantas herbáceas que se utilizan para el pastoreo de borregos. Prevalecen las zonas desprovistas de vegetación como son lechos y taludes de las cárcavas.

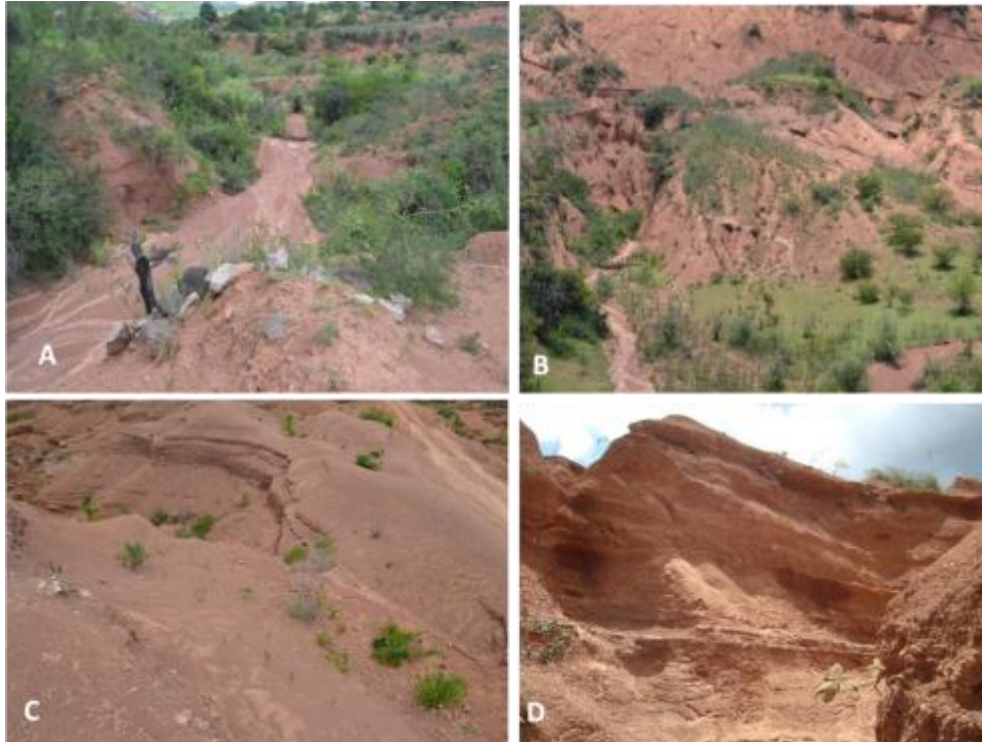
En las cárcavas donde se han ido formando terraplenes con la acumulación de sedimentos, se observa que en el lecho y en los taludes, se han desarrollado especies herbáceas, arbustivas y arbóreas (Figura 38A). En el estrato herbáceo se observan especies como popotillo (*Gymnosperma glutinosum*), chamizo (*Baccharis salicifolia*), chamizo negro (*Baccharis heterophylla*) y jarilla (*Dodonaea viscosa*); en el estrato arbustivo se identifican especies del género *Dalea* y algunas otras como el tlaxistle (*Amelanchier denticulata*), el garabato (*Mimosa lacerata*), espino clavo (*Acacia farnesiana*) y yunuyaca (*Eysenhardtia polystachya*). En el estrato arbóreo, prevalecen especies como Junipero (*Juniperus flaccida*) y el cazahuate (*Ipomoea murucoides*).

En las pequeñas terrazas o playas, que habitualmente se siembran y ahora se encuentran en descanso, se han desarrollado zacates, plantas herbáceas y matorrales que están sometidas al pastoreo y que por la falta de medidas preventivas de la erosión están pasando a formar parte del sistema de drenaje por el crecimiento de la erosión remontante de las cárcavas aledañas. En estas áreas prevalecen los géneros: *Andropogon*, *Aristida*, *Bouteloua*, *Bromus*, *Bothriochloa*,



*Muhlenbergia e Hilaria*, además de otras especies como la hierba del zorrillo (*Croton dioicus*), el Popotillo (*Gymnosperma glutinosum*) y el cazahuate (*Ipomoea murucoides*) (Figura 38B).

Las zonas sin vegetación se presentan en el lecho, las cimas y taludes de las cárcavas que han estado sometidas a la erosión o que, por el pastoreo y sobre-consumo, desaparecen la mayoría de las especies pioneras (herbáceas y zacates) por lo que solo quedan algunas especies arbustivas como la ortiga o Chichicaste (*Wigandia urens*) y la jarilla (*Dodonaea viscosa*) (Figura 38C y 38D).

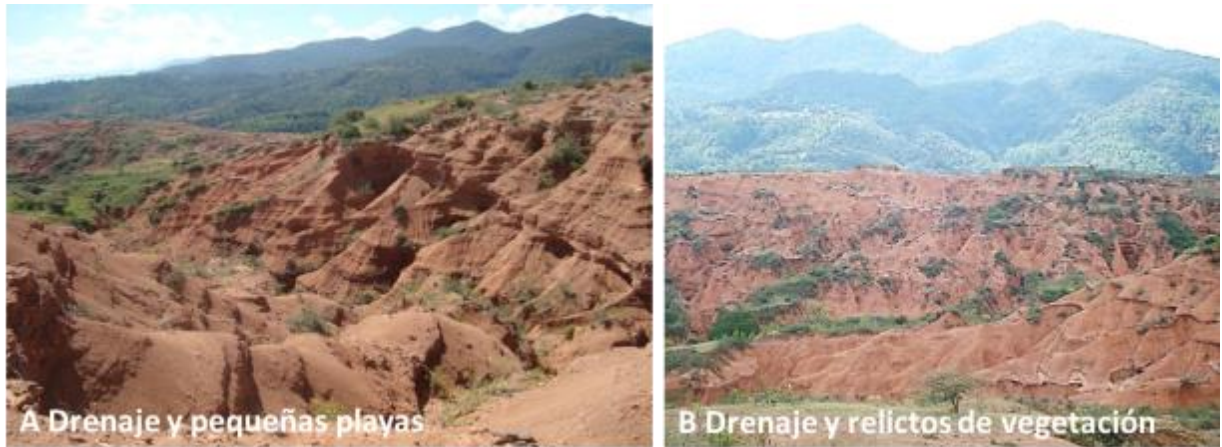


**Figura 38. Presencia de vegetación en las geofomas del área de estudio.**

#### 3.1.2.5. Hidrografía

En la microcuenca objeto de estudio, se forma una red de drenaje compleja. El área aporta los escurrimientos al Río Chiquito que confluye con el Río Grande y descargan en el Río Verde; dicha red de drenaje forma parte de la Región Hidrológica llamada “Costa Chica-Río Verde”.

La red de drenaje se conforma por cárcavas en constante crecimiento y por pequeñas playas o terrazas que se utilizaban para la agricultura, así como pequeñas áreas con vegetación característica de los pastizales, quedando ausentes las especies forestales que fueron utilizadas para el abastecimiento de leña y que no se muestran en la zona de estudio (Figura 39A y 39B).



**Figura 39. Sistema de drenaje de la zona de estudio**

El crecimiento acelerado de las cárcavas en la zona, es producto de la pendiente del terreno, la falta de cubierta vegetal, la presencia de suelo desnudo en las cimas y taludes de las cárcavas que provocan el desprendimiento de bloques de suelo de los taludes y erosión y transporte de sedimentos provenientes de las cimas.

La presencia de lluvias de alta intensidad y corta duración en esta pequeña área de drenaje provocan avenidas extraordinarias, especialmente el escurrimiento máximo instantáneo que fue estimado utilizando la lluvia máxima en 24 horas y el método racional modificado<sup>2</sup> (Cuadro 7).

**Cuadro 7. Escurrecimientos máximos estimados ( $Q_p$ ) para diferentes periodos de retorno**

Pr (años)	PP esperada (mm)	Factor C	$Q_p$ ( $m^3 s^{-1}$ )
10	102.7	0.5	5.29
25	125.9	0.5	6.48
50	143.1	0.5	7.37

Es importante tomar en cuenta para el área de drenaje de solo 37.06 ha, los escurrimientos máximos para diferentes periodos de retorno varían de 5.29 a 7.37  $m^3 s^{-1}$ , lo que anticipa que al considerar los sedimentos en suspensión, el flujo tendrá una alta capacidad de remoción y transporte.

### **3.2. Localización y caracterización de las obras de conservación existentes**

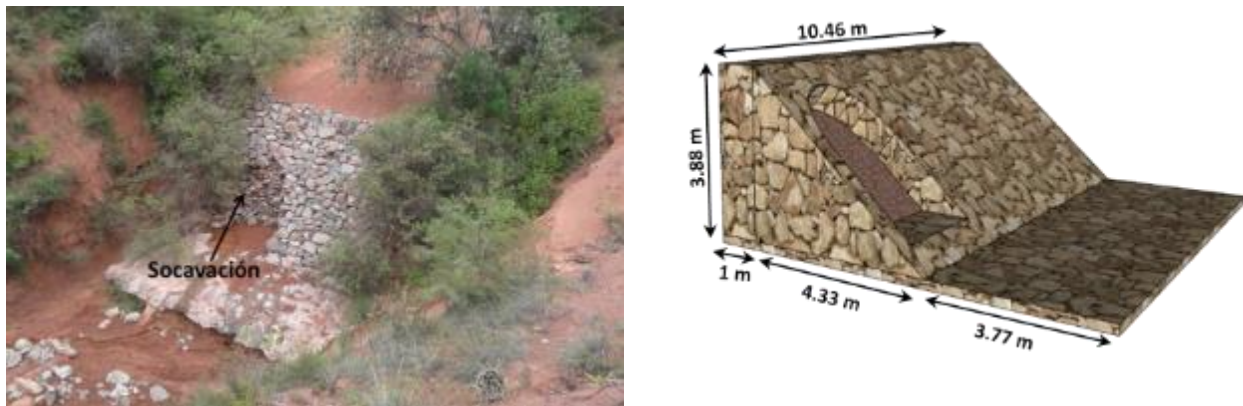
La presa de piedra acomodada que es la infraestructura hidráulica principal en el sistema de bioingeniería propuesto para el control de las zonas degradadas, se ubicó mediante un navegador

---

<sup>2</sup>  $Q_p = CLA/360$ ; donde:  $Q_p$ = Escurrecimiento máximo ( $m^3 s^{-1}$ ); C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional); L = lluvia máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno; A = Área de drenaje (ha) y 360 es un factor de ajuste de unidades. El valor de C estimado fue de 0.5 y se asumió que la lluvia se presentó en una hora en lugar de 24 horas.

GPS (Global Positioning System) y está localizada en las coordenadas de  $-97^{\circ} 21' 72.72''$  Oeste,  $17^{\circ} 28' 12.69''$  Norte y a 2,185 msnm. La presa de piedra acomodada con su socavación se muestra en la Figuras 40A.

La presa de piedra acomodada estuvo diseñada con una cortina de 3.88 m de altura, una corona de 1 m, un ancho de 10.46 m, y un talud de 1.12:1, tiene un volumen de obra de  $128.44 \text{ m}^3$ ; un colchón de amortiguamiento de mampostería de 3.77 m de largo, 10.46 m de largo y una profundidad de 40 cm con un volumen de obra de  $15.77 \text{ m}^3$ . La cortina de la presa tenía una socavación de 2.35 m de ancho, 2.9 m de alto y 1.65 m de profundidad con volumen de  $11.24 \text{ m}^3$  y el colchón de amortiguamiento se estaba socavando aguas debajo de la presa (Figura 40B).



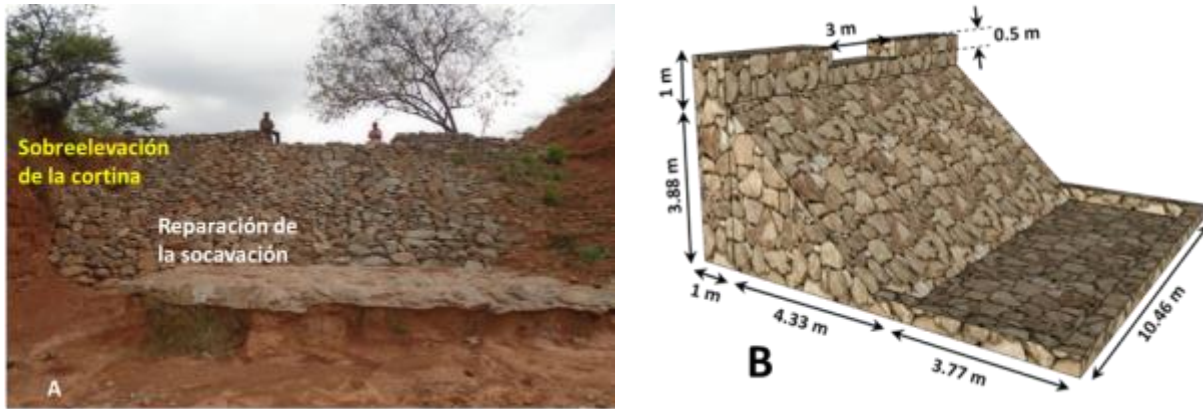
**Figura 40. Presa de piedra acomodada y sus dimensiones**

La cortina de la presa de piedra acomodada se sobre elevó un metro de altura y en la parte central se construyó un vertedor de 3 m de largo por 1 m de ancho y por 0.5 m de altura<sup>3</sup>. El volumen de la sobreelevación de la cortina fue de  $9.08 \text{ m}^3$ , de los cuales  $1.5 \text{ m}^3$  correspondió al vertedor y los  $7.58 \text{ m}^3$  restantes al resto de la cortina (Figuras 41A y 41B). Esta sobreelevación fue posible ya que la presa de piedra construida por los productores es estable al deslizamiento y volcamiento y permitirá incrementar su capacidad para retener azolves y la playa o terrazas de sedimentos retenidos.

---

<sup>3</sup> La sobreelevación y la reparación de la cortina fue realizada por los productores y los materiales fueron proporcionados por la WWF a través de Fundación Comunitaria Oaxaca.





**Figura 41. Presa de piedra acomodada antes y después.**

La socavación que ponía en riesgo la cortina, fue reparada y solo quedo pendiente la reparación del colchón de amortiguamiento para evitar la socavación aguas debajo de la presa y que se ponga en riesgo su estabilidad (Figura 41 A)

### 3.3. Caracterización de las cárcavas del área de estudio

#### 3.3.1. Perfil Longitudinal de la cárcava que aporta sedimentos a la presa

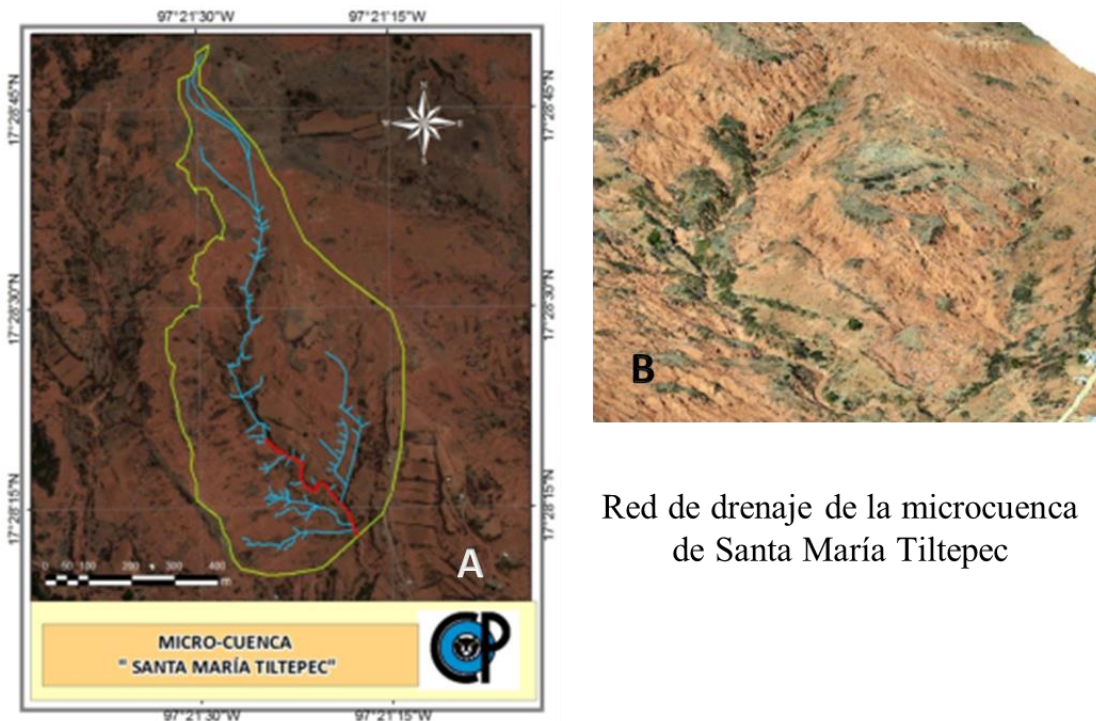
El perfil longitudinal de la cárcava principal, se levantó a partir de la presa de piedra acomodada utilizando cinta y nivel de manguera cada 10 metros. El desnivel se registró cada 10 m y se midió el ancho de sedimentos retenidos por la presa. La zona de depósito de sedimentos tuvo una longitud de 397 metros (Figura 42).



**Figura 42. Levantamiento del perfil longitudinal de la cárcava principal**

### 3.3.2. Red de drenaje

La red de drenaje conformada por las cárcavas en la zona de estudio se obtuvo utilizando una imagen de satélite por Google Earth del 23 de marzo del 2012 y con recorridos de campo. Se identificó una cárcava principal y tres cárcavas afluentes (Figura 43A), así como una red de cárcavas complejas que descargan sus escurrimientos y sedimentos a las cárcavas principales identificadas (Figura 43B).



**Figura 43. Sistema de drenaje identificado con imágenes de satélite**

El sistema de drenaje conformado por un conjunto de cárcavas de diferentes dimensiones fue identificado utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para obtener un Modelo Digital de Elevación (MDE) de alta resolución (Figuras 44A y 44B). En el vuelo<sup>4</sup>, se obtuvieron un total de 557 imágenes tomadas a una altura de 208.53 m con lo que se generó un ortomosaico y un Modelo Digital de Elevaciones del área de cárcavas con una precisión de 0.264 metros/pixel.

Como parte del proceso, se realizó un control terrestre con 8 puntos de control levantados en el terreno mediante un GPS diferencial modelo Promark 2 de alta precisión (Figura 44C), lo que permitió obtener coordenadas y altitudes para georreferenciar las ortofotos obtenidas. Las imágenes y los puntos de control se procesaron utilizando el software Agisoft PhotoScan. El

---

<sup>4</sup> El recorrido con el vehículo aéreo no tripulado (VANT), fue realizado con el apoyo del Dr. Héctor Flores Magdaleno, M.C. Víctor Gordillo e Ing. Moisés Venegas

MDE generado, permitió obtener curvas a nivel cada metro con lo que fue posible definir el sistema de drenaje (cárcavas) a detalle de la microcuenca.



**Figura 44. Vehículo aéreo no tripulado y GPS de precisión utilizados en el área de estudio**

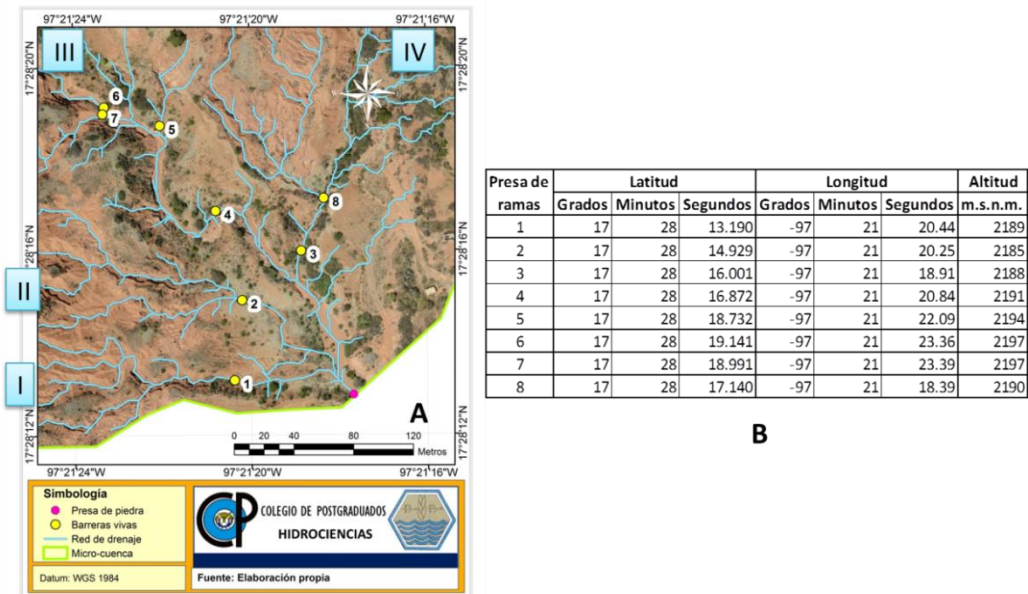
- Parteaguas: Para definir la línea que separa un sistema fluvial de otro, que une los puntos de mayor cota topográfica, y que permitió delimitar la micro-cuenca objeto de estudio. En principio, se trazó el parteaguas mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en una imagen obtenida de Google Earth del 23 de marzo del 2012; posteriormente, en recorridos de campo, se ajustó la delimitación realizada con ayuda de un navegador GPS (Global Positioning System) y finalmente, se obtuvo el parteaguas definitivo con un reajuste efectuado con las curvas a nivel obtenidas con el MDE de alta resolución.
- Área de la micro-cuenca: La superficie total de la microcuenca se obtuvo una vez fue definido el parteaguas en el SIG.
- Orden de corrientes: El método para determinar el orden de las corrientes en la microcuenca de estudio fue el propuesto por Strahler (1952). Con este criterio, se consideraron cárcavas de orden uno, aquellas que no tienen afluentes; cárcavas de orden dos, aquellas que se forman donde confluyen dos cárcavas de primer orden; cárcavas de 3 orden, corresponde a las cárcavas que se forman cuando se unen cárcavas de segundo orden y así sucesivamente hasta llegar al orden seis de las cárcavas.
- Longitud total de cárcavas: Se determinó la longitud de cada una de las corrientes utilizando el SIG y así se obtuvo la longitud total de las cárcavas en el área de estudio.
- Densidad de drenaje: Este parámetro expresa la longitud de cárcavas por unidad de área. En este caso, con la red de cárcavas obtenida con el MDE de alta resolución, se obtuvo la longitud total de las cárcavas en el SIG y se dividió entre el área de la microcuenca.
- Densidad hidrográfica: Se estimó con la relación entre el número de corrientes y el área de drenaje. El número de cárcavas definidas con el MDE de alta resolución fue identificado utilizando el SIG y ese número fue dividido entre el área de drenaje para obtener la densidad hidrográfica.
- Relación de bifurcación ( $R_b$ ). Se determinó utilizando el número de cárcavas de diferentes órdenes. El  $R_b$  entre órdenes se estimó dividiendo el número de corrientes de un orden determinado y número de corrientes del orden inmediato superior. El  $R_b$  del área de drenaje se calculó como el promedio de  $R_b$  entre órdenes.



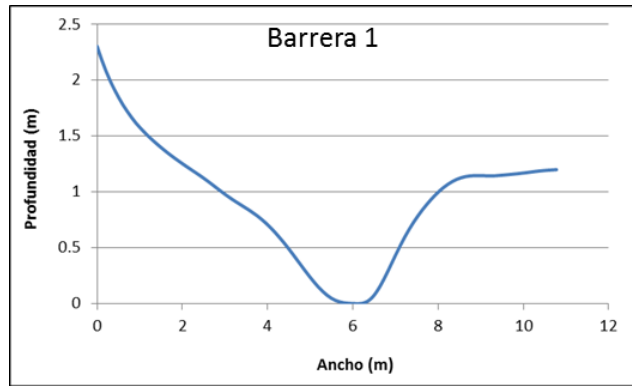
### 3.4. Diseño y ubicación de prácticas de bioingeniería.

Como parte del sistema de bioingeniería para recuperar las áreas degradadas por cárcavas agua arriba de la presa de piedra acomodada (Figura 45A), se acordó con los productores (autoridades comunitarias), el establecimiento de las presas de ramas en las cuatro cárcavas principales. En la cárcava I se propuso la construcción de la Presa de ramas no. 1, en la cárcava II se proyectó la presa no. 2, para la cárcava III (principal) se propuso la construcción de 4 presas de ramas (4, 5, 6 y 7) y para la cárcava IV se proyectó la construcción de las presas 3 y 8 (Figura 45A). Utilizando un GPS Garmin (modelo eTrex 30) se obtuvieron las coordenadas geográficas (longitud, latitud y altitud) de las secciones transversales donde se iban a establecer las presas de ramas para la retención de sedimentos y la recuperación de las cárcavas, con el crecimiento de la vegetación natural una vez estabilizadas las mismas (Figura 45B).

Las secciones transversales donde se construyó cada una de las presas se levantaron con cuerda, estacas, nivel y cinta. Se colocaron las estacas y se amarró una cuerda a nivel, a diferentes distancias se midió la profundidad hasta conformar las secciones transversales que se muestran en la Figura 46.

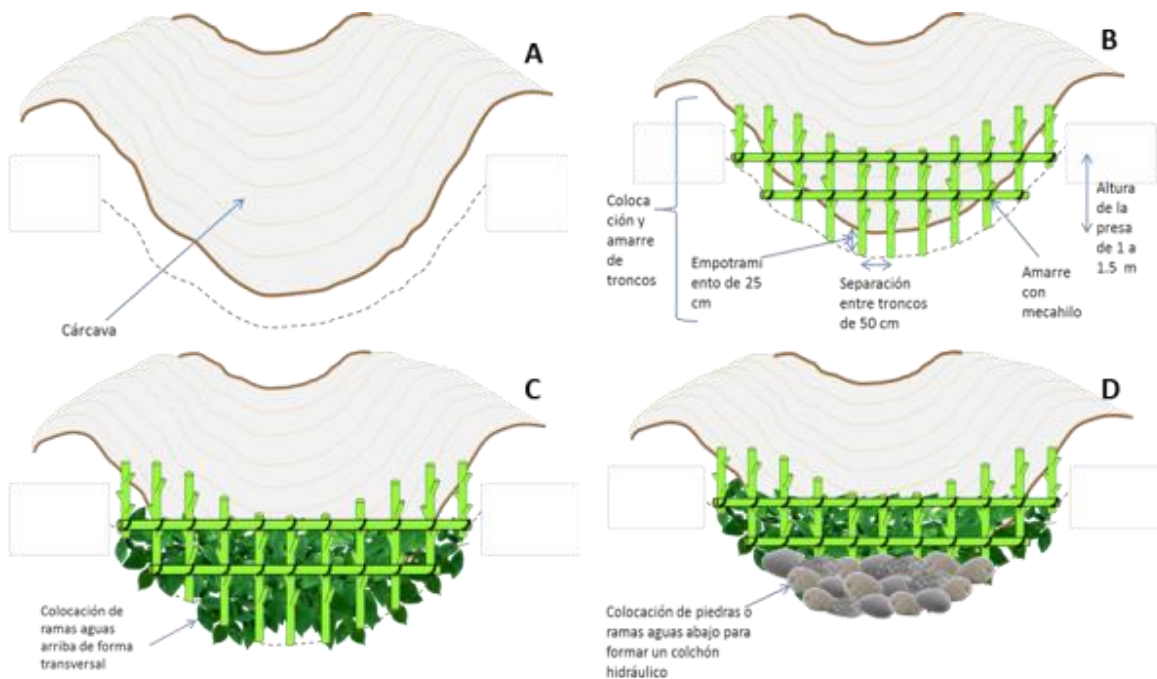


**Figura 45. Ubicación de las presas de ramas a construir como parte del sistema de bioingeniería.**



**Figura 46. Sección transversal de la cárcava 1 donde se estableció una barrera viva.**

Las barreras vivas (ramas y troncos) se colocaron perpendiculares a la sección transversal de cada una de las cárcavas seleccionadas (Figura 47A), con espaciamiento entre troncos de 0.5 a 1 m, empotrados en el lecho de la cárcava a profundidades de 0.3 a 0.5 m y una altura efectiva de la barrera de 1 a 1.5 m (Figura 47B). La especie utilizada en las barreras se conoce localmente como pipal o colorín (*Erythrina americana*) y fue seleccionada por ser una especie nativa que se propaga fácilmente por estaca, razón por la cual se utilizaron troncos de esta especie con diámetro de 10 cm o más. Entre troncos se colocan ramas entrelazadas o amarradas a los troncos para darle soporte a la presa (Figura 47B). Aguas arriba de la barrera se colocaron ramas de jarilla (*Dodonaea viscosa*) y otros arbustos para propiciar la captura de sedimentos y permitir el paso de los escurrimientos (Figura 47C). Aguas debajo de la barrera, se colocaban ramas o piedras para cumplir la función de un tanque amortiguador (Figura 47D).



**Figura 47. Etapas en la construcción de barreras vivas.**



Es importante destacar que estas barreras vivas o de material vegetal deben tener un mantenimiento continuo o hacer reparaciones después de eventos extraordinarios ya que las avenidas pueden causar daños a la estructura temporal, especialmente en los primeros meses de instalación. La intención con el manejo de las barreras vivas, era buscar la salida de los excesos de agua una vez que los sedimentos se habían acumulado aguas arriba de la barrera y ampliar la longitud de la barrera hacia los taludes de la cárcava.

#### 3.4.1. Muestreo de suelo.

Para conocer las propiedades de los suelos en la microcuenca objeto de estudio, se muestrearon 5 sitios a lo largo de la microcuenca. En cada sitio, se tomó una muestra de suelo del lecho, talud y lomo de la cárcava a una profundidad de 0 a 15 cm (Figura 48). Después del periodo de lluvias del año 2015, se realizó un muestreo de los sedimentos retenidos por las barreras vivas (presas del 1 al 8) establecidas en las cárcavas (Figura 48A). Además de tomar una muestra de los sedimentos a una profundidad de 0-15 cm y de 15-30 cm, se tomó una muestra testigo obteniendo así un total de 24 muestras de suelo.

Las muestras de los suelos (lecho, taludes y cima) de las zonas con cárcavas fueron tamizadas y procesadas en laboratorio para determinar las propiedades químicas de los suelos como el pH, Materia Orgánica y Conductividad Eléctrica y las propiedades hidrológicas de los suelos como Conductividad Hidráulica, Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente, Distribución de tamaño de partículas y Textura. A las muestras de sedimentos tomadas aguas arriba de la presa de piedra acomodada, además se les determinó nitrógeno, fósforo y potasio, para conocer la disponibilidad de nutrientes en el suelo retenido por la presa.

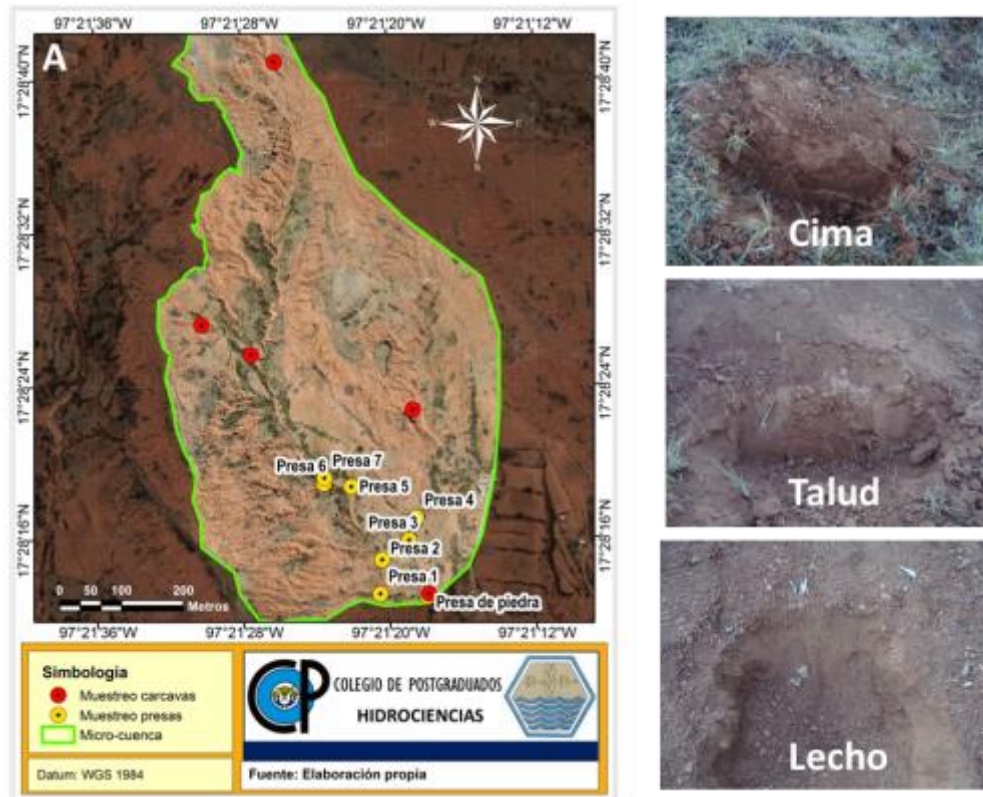
Los métodos utilizados para realizar los análisis físicos y químicos de las muestras de suelo, se enlistan a continuación:

- Materia Orgánica

Se determinó por el método de Walkley-Black que consiste en la oxidación húmeda de la muestra de suelo para obtener carbono orgánico. Durante la oxidación, se produce ácido crómico que puede ser leído por colorimetría. El porcentaje de materia orgánica se obtuvo con la relación del contenido de carbono orgánico.

- pH

El pH se estimó con el potenciómetro, que midió la actividad del hidrógeno ionizado ( $H^+$ ) en una muestra de suelo. La muestra de suelo (relación de 2:1, agua destilada y suelo) se colocó en tubo de ensaye, se introdujo el electrodo y se estimó el pH.



**Figura 48. Muestreo de suelos en cárcavas y áreas de captación de sedimentos de presas.**

- Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se determinó con el puente de conductividad en una pasta de saturación del suelo donde se colocaron los electrodos para medir la capacidad de transporte de la corriente eléctrica del medio acuoso y con ello, determinar la concentración de sales en el suelo

- Conductividad Hidráulica

El permeámetro de carga constante se utilizó para determinar el paso del agua en embudos de metal a diferentes tiempos cuando se aplica agua con sifones a cargas constantes. La conductividad hidráulica del suelo se estima con el volumen de agua que pasa por la columna de suelo, en relación al tiempo, el área del embudo y el gradiente (Figura 49).



$$K = \text{Vol} / t * a * i$$

K = Conductividad hidráulica ( $\text{cm h}^{-1}$ )

Vol = cm de agua medidos

T = Tiempo en horas.

a = Área del suelo en  $\text{cm}^2$ .

i = Gradiente igual a H/L.

H = Longitud de la columna de suelo, más la carga de agua (cm).

L = Longitud de la columna de suelo (cm).

**Figura 49. Conductividad hidráulica estimada con el permeámetro de carga constante**

- Distribución del tamaño de partículas del suelo

Para conocer la distribución por tamaño de partículas de las muestras de suelo, se utilizó el método de Yoder que consiste en el tamizado de las muestras de suelo en tren de tamices con diferentes tamaños de mallas. La cantidad de suelo que se retiene en cada uno de los tamices de diferentes tamaños es utilizada para conocer el porcentaje de partículas de suelo. Con esta información se obtuvo el  $D_{50}$  (Diámetro medio de las partículas del suelo).

- Textura

La textura de las muestras de suelo, se estimó con el método de Bouyoucos que se basa en la relación entre la velocidad de asentamiento y el diámetro de las partículas y que consiste en eliminar la materia orgánica de la muestra, agregar una solución dispersante y hacer lecturas con el hidrómetro a 40 segundos y dos horas para estimar los porcentajes de arena, limo y arcilla y determinar la textura del suelo con el triángulo de texturas.

- Nitrógeno total

La determinación del Nitrógeno en la muestra se realizó con el método Micro- Kjeldahl que consiste en pasar el nitrógeno de formas orgánicas a minerales mediante la digestión de la muestra, seguido de una destilación para obtener amoníaco y estimar el contenido del mismo ( $\text{NH}_3$ ).

- Potasio

El procedimiento consiste en saturar la superficie de intercambio con una solución extractora de acetato de amonio y registrar la lectura con un flamómetro (espectrofotometría).

- Fósforo

Si el pH de la muestra va de ácido a neutro, se determinó con el método de Bray y con el método de Olsen, cuando se trata de suelos neutros o alcalinos.

Las muestras de sedimentos retenidos en las presas de ramas (barreras vivas) fueron llevadas al laboratorio para determinar: Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente, la textura, la densidad aparente, el nitrógeno y el contenido de materia orgánica, con los métodos descritos previamente.

- Esfuerzo Cortante Crítico

El esfuerzo cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por unidad de superficie de la masa de suelo que puede ofrecer a la falla o deslizamiento en un plano. El esfuerzo cortante crítico se estimó de acuerdo con la fórmula propuesta en el manual del WEPP (Nearing et al., 1989), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tau_c = 3.23 - 5.6 \text{ sand} - 24.4 \text{ MO} + \frac{0.9\rho_d}{1000}$$

Dónde:  $\tau_c$  es el esfuerzo cortante del flujo necesario para el desprendimiento de las partículas (Pa); *Sand* es el contenido de arena (0-1); *MO* el contenido de materia orgánica (0-1) y  $\rho_d$  es la densidad aparente del material ( $\text{kg m}^{-3}$ ). Esta expresión estima el esfuerzo cortante crítico como una función de la densidad aparente y el contenido de humedad del suelo, ya que son importantes para conocer la susceptibilidad de los suelos para ser removidos y transportado por la lluvia y el escurrimiento.

### 3.5. Evaluación de las prácticas de bioingeniería

El sistema de bioingeniería a implementar dentro de la zona de estudio consistió en utilizar la presa de piedra acomodada construida hace más de 30 años por los productores como base del sistema y posteriormente barreras vivas (presas de ramas). La presa de piedra acomodada se encontraba azolvada y la primera parte de la evaluación fue estimar la eficiencia de la obra para retener azolves. Después, se estimaron los escurrimientos y la producción de sedimentos para el 2015 y se evaluó la eficiencia del sistema de bioingeniería (presa de piedra acomodada sobre-elevada y las barreras vivas para captar azolves).

#### 3.5.1. Volumen de sedimentos retenidos en la presa de piedra acomodada

La presa de piedra acomoda, estructura importante en el sistema de bioingeniería se evaluó estimando la cantidad de azolves retenidos al inicio del trabajo y después con los azolves retenidos por la sobre-elevación de la cortina.

En el levantamiento del perfil longitudinal se registró el ancho de los sedimentos y se calcularon los sedimentos retenidos en el vaso de almacenamiento de la presa. El volumen de sedimentos retenidos se estimó a partir de la altura de la presa de piedra acomodada y la profundidad de los azolves, al considerar el desnivel registrado entre el cadenamamiento y la proyección del perfil original de los sedimentos retenidos en el lecho de la cárcava (Figura 50). Esta proyección se

basó en los registros tomados del nivel del terreno hasta los 332.3 m que corresponden al lecho de la cárcava donde ya no se observó sedimento retenido; por lo tanto, el desnivel final del perfil se proyectó a la base de la cortina de la presa (Figura 50).

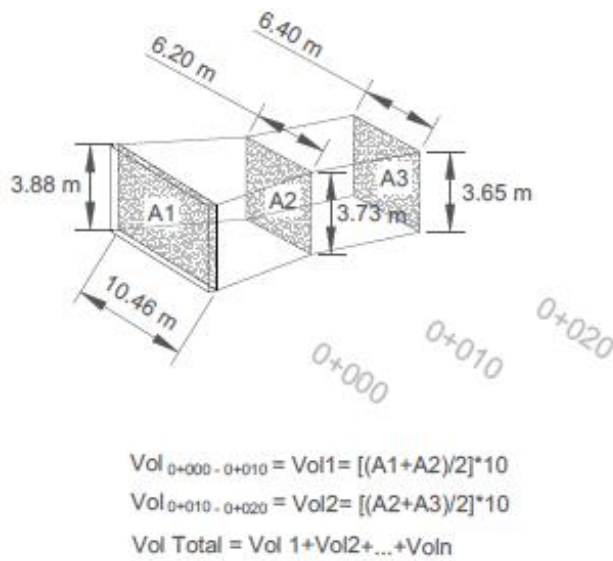
El cálculo del volumen de azolves retenidos por la presa de piedra acomodada asumió áreas rectangulares de diez metros entre el cadenamiento. El área inicial (A1) consideró el ancho de la cortina y la altura de la presa (Figura 51). El volumen de sedimentos de la sección inicial se estimó con el área multiplicada por 10 m de longitud.



**Figura 50. Esquema para el cálculo de la altura de los sedimentos.**

El volumen de sedimentos del área 2, se estimó con el ancho de sedimentos obtenido en la estación 0+010 por la profundidad de sedimentos estimada y por la longitud del tramo (10 m) (Figura 51). Los volúmenes de azolves por tramos se estimaron con ancho de los sedimentos medido en campo, la altura de los sedimentos calculada y la longitud del tramo (10 m). El volumen total de azolves se estimó como la sumatorias de los volúmenes obtenidos por tramos en el perfil de los sedimentos retenidos (Figura 51).





**Figura 51. Estimación del volumen de sedimentos retenidos en la presa de piedra acomodada.**

### 3.5.2. Estimación de escurrimientos y producción de sedimentos

La estimación de la producción de escurrimientos y sedimentos se llevó al cabo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM o MUSLE, por sus siglas en inglés). Williams (1975) propuso una modificación a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) para predecir la producción de escurrimientos y sedimentos; modificó el factor de energía (EI30) de la EUPS por el factor  $(11.8 (Q * q_p)^{0.56})$  y conservó los factores de suelo, pendiente, cobertura de la vegetación y prácticas mecánicas de control de la erosión, como se presenta a continuación:

$$Y = 11.8 (Q * q_p)^{0.56} K L S C P$$

Donde:

- Y = Sedimentos aportados a la salida de la cuenca por un evento ( $t \text{ ha}^{-1}$ )
- Q = Escurrimiento medio ( $m^3$ )
- $q_p$  = Escurrimiento máximo ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ )
- K = Factor de erosionabilidad del suelo ( $t \text{ ha h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ )
- L = Factor de longitud de la pendiente (adimensional)
- S = Factor de grado de la pendiente (adimensional)
- C = Factor de manejo de cultivos (adimensional)
- P = Factor de las prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional)

Los parámetros de Q y  $q_p$  se estimaron con el método del Soil Conservation Service o método de las Curvas Numéricas (USDA-SCS, 1972) utilizando las siguientes ecuaciones:

- Esguerrimiento medio (Q)

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

En la que:  $Q > 0$ , si  $P > 0.2 S$  de lo contrario  $Q = 0$

Donde:

Q = Esguerrimiento medio (mm)

P = Precipitación por evento (mm)

S = Potencial máximo de retención (mm)

El potencial máximo de retención (S) se puede obtener de acuerdo a la siguiente relación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm)

CN = Curvas numéricas (adimensional)

Las Curvas Numéricas fueron obtenidas por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA-SCS, 1972). Los valores de las curvas numéricas dependen del grupo de suelos, condición hidrológica, uso del suelo, prácticas de manejo y la condición de humedad antecedente.

Grupo de suelos. El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) los clasificó en cuatro grupos de acuerdo con sus características para producir esguerrimiento (A, B, C y D).

Condiciones hidrológicas del área de drenaje. Es el indicador de la capacidad de la cubierta vegetal para permitir la infiltración del agua en el suelo y depende de la densidad de la cobertura. Se agrupa para las condiciones malas, regulares y buenas; está asociado al porcentaje de cobertura vegetal.

Uso del suelo. Los valores de  $CN_{II}$  para diferentes usos del suelo, prácticas de manejo, condición hidrológica y grupo de suelos se reportan en el Apéndice A.

Condición antecedente de humedad. El esguerrimiento aumenta a medida que la condición de humedad del suelo al momento de presentarse la tormenta aumenta. Por esta razón, la condición de humedad del suelo de los 5 días previos a la tormenta es considerada en tres grupos

Condición I: Cuando el suelo está seco (precipitación  $< 12.7$  mm en los 5 días previos al evento).

Condición II: Cuando el suelo se encuentra en un nivel medio de humedad (precipitación entre 12.7 a 38.1 mm en los 5 días previos al evento).

Condición III: Cuando el suelo se encuentra húmedo (precipitaciones > 38.1 mm en los 5 días previos al evento).

La estimación del valor de CN para la microcuenca utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) y la información levantada en campo, para delimitar los grupos de suelos, los usos del suelo (zonas con o sin vegetación) y la condición hidrológica de los terrenos, para determinar el valor de CN<sub>II</sub> ponderado del área de estudio. Con el valor de CN<sub>II</sub> se estimó el valor de Q por evento.

Escurrencimiento máximo instantáneo (Q<sub>p</sub>)

Esta variable por evento se estimó con el método racional que se expresa como:

$$q_p = \frac{C * I * A}{360}$$

Donde:

- q<sub>p</sub> = Gasto pico o gasto máximo instantáneo (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)
- C = Coeficiente de escurrencimiento superficial (adimensional)
- I = Intensidad de la precipitación (mm h<sup>-1</sup>)
- A = Área de drenaje o de la cuenca en estudio (ha)

El coeficiente de escurrencimiento (C) se estimó como la relación de (Q/P): donde Q es escurrencimiento medio por evento en mm y P es la precipitación por evento. La intensidad de la precipitación (I) se calculó con la relación (P/T<sub>c</sub>): Donde I es intensidad de la precipitación (mm h<sup>-1</sup>), P es la precipitación por evento (mm) y T<sub>c</sub> es el tiempo de concentración del escurrencimiento (h). Este último se estima con la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.02 \frac{L^{1.15}}{H^{0.38}}$$

Donde:

- T<sub>c</sub> = Tiempo de concentración (minutos)
- L = Longitud del cauce principal (m)
- H = Desnivel del cauce principal (m)

Con este procedimiento se estimaron los escurrencimientos máximos por evento.

La producción de sedimentos por evento se estimó utilizando los parámetros de Q y q<sub>p</sub> estimados con el método de conservación de suelos, seleccionado los valores de CN para los usos del suelo, condición hidrológica y grupo de suelo; se obtuvo un valor de CN ponderado.

El parámetro de erosionabilidad (K) se obtuvo con la información del tamaño de partículas, los contenidos de materia orgánica, el tamaño de agregados y la permeabilidad de las muestras de suelo obtenidas en campo, de acuerdo con la siguiente ecuación propuesta por Wischemier y Smith (1978):

$$K = \left[ \frac{2.1(10^{-4})(12 - a)M^{1.14} + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} \right] * 0.1317$$

Donde:

K = Erosionabilidad del suelo (t/ha. año/Mjha mm/hr).

M = Parámetro que indica el tamaño de partículas

M = % limo + arenas finas(0.1-0.002 mm)x(100-% arcilla )(<0.002 mm))

a = Porcentaje de materia orgánica

b = Código de estructura del suelo

c = Código de permeabilidad del perfil del suelo

Los valores de K fueron promediados para obtener un K ponderado.

El valor de LS se obtuvo utilizando el MDE y utilizando las siguientes ecuaciones para estimar L y S de acuerdo con Renard *et al.* (1997):

$$L = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^m$$

Donde

L = Factor longitud de la pendiente (adimensional)

$\lambda$  = Longitud de la pendiente (metros)

m = Exponente influenciado por la interacción de la longitud y grado de pendiente; puede ser también influenciado por las propiedades del suelo, tipo de vegetación.

$$S = 13.8 \sin \theta + 0.03 \text{ (pendiente menor de 9\%)}$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5 \text{ (pendiente mayor de 9\%)}$$

S=Factor grado de pendiente

$\theta$  = Angulo de la pendiente

La microcuenca se dividió en áreas y se determinó la pendiente y la longitud entre curvas a nivel y se utilizaron las ecuaciones de L y S para obtener un valor de LS por áreas y un LS ponderado.

El levantamiento del uso del suelo identificó tres zonas: suelo desnudo, pastizal y vegetación arbustiva y arbórea (vegetación secundaria): De acuerdo con la literatura disponible se

seleccionaron los valores del parámetro de cobertura vegetal C para cada uso del suelo y se obtuvo el valor de C ponderado para la cuenca.

El parámetro de prácticas mecánicas P fue de 1, ya que no existen obras de conservación en la zona de estudio.

La producción de sedimentos, los escurrimientos medios y máximos por evento se estimaron en una hoja Excel considerando los datos de precipitación diaria del 2005, de la estación meteorológica de Yanhuitlán, el área de drenaje, la curva numérica CN ponderada, los parámetros ponderados de K, LS y C, longitud y desnivel de la corriente principal (Figura 54).

### 3.5.3. Volumen de sedimentos retenidos en las barreras vivas

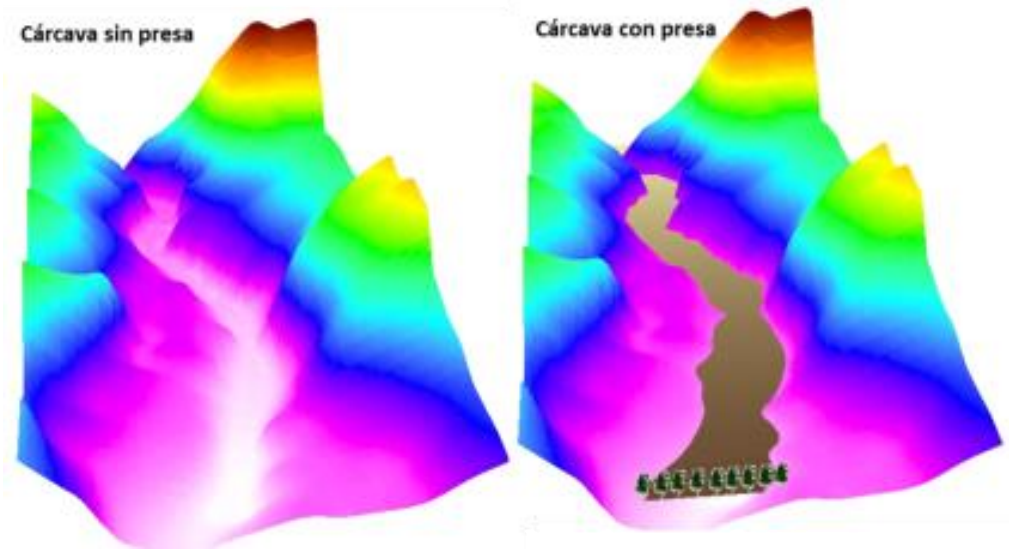
Las barreras vivas construidas para retener azolves como parte del sistema de bioingeniería fueron evaluadas realizando dos levantamientos topográficos con estación total SOKKIA modelo "SET630RK3" con una precisión de 2 mm en cada una de las cárcavas donde se establecieron las barreras vivas. El primer levantamiento topográfico se realizó previo a la construcción de las barreras vivas considerando secciones transversales cada 5 m y tomando de cinco a seis puntos por sección transversal (cima, taludes y lecho) hasta una longitud de 50 m aguas arriba. El segundo levantamiento topográfico se realizó con el mismo procedimiento para levantar las secciones transversales después de una temporada de lluvia (Figura 52).



**Figura 52. Levantamiento de las secciones transversales de las cárcavas con barreras vivas**

La capa ráster obtenida de la interpolación de los puntos obtenidos en el levantamiento topográfico se desplegaron en el Sistema de Información Geográfica para su análisis. Un ejemplo del MDE en tercera dimensión obtenido antes y después del establecimiento de una barrera viva se muestra en la Figura 53.



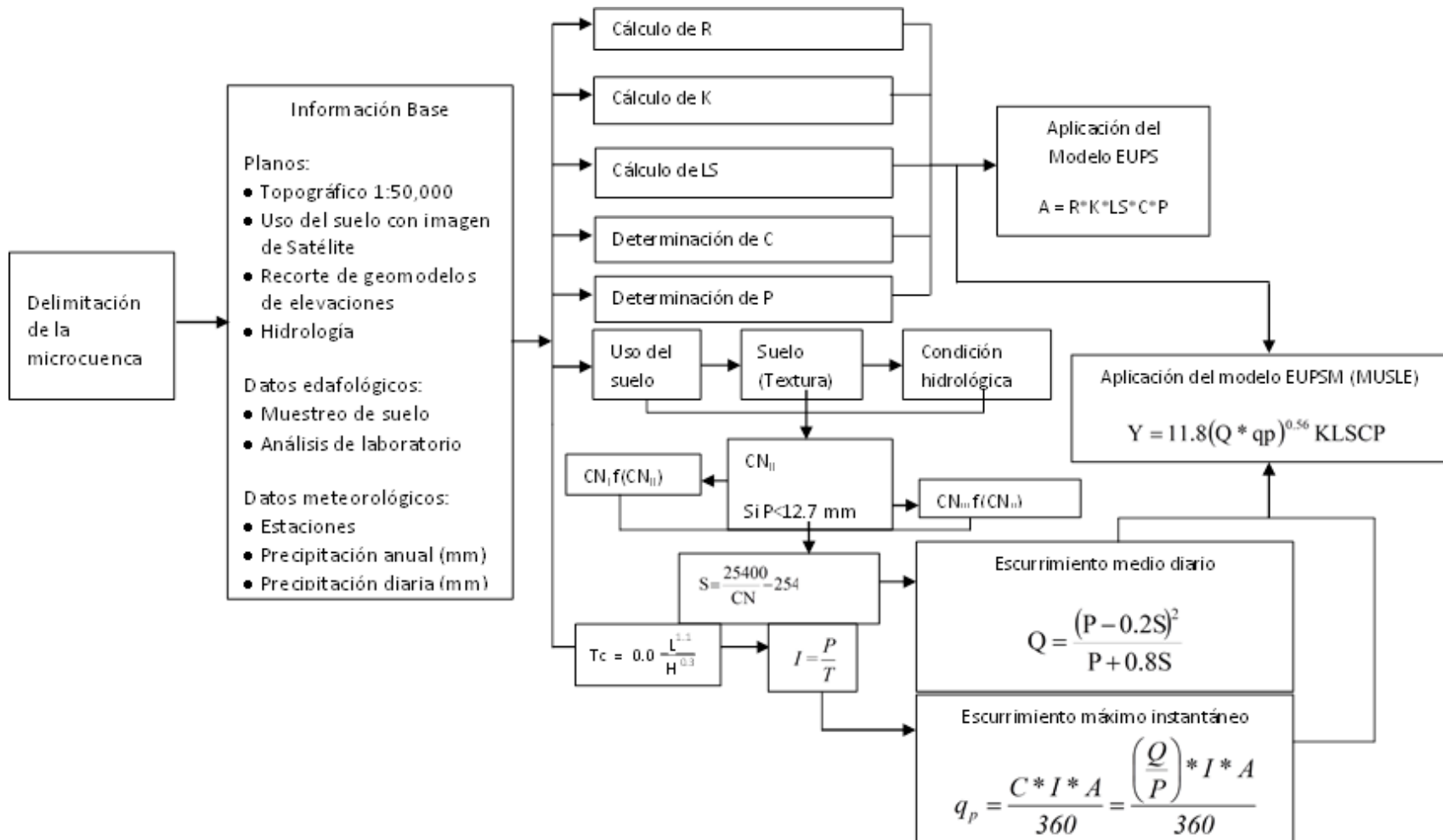


**Figura 53. MDE de una cárcava para antes y después de establecer una barrera viva.**

La cuantificación del volumen de sedimentos retenido por cada una de las barreras vivas se hizo con el uso de la extensión Spatial Analyst del programa ArcMap, que cuenta con el módulo Surface Analysis que permite procesar Modelos Digitales de Elevación. En particular, la herramienta “Cut/Fill”, permite calcular el volumen de corte o de relleno entre dos modelos, por lo que se pudo determinar el volumen entre el MDE original y el que se levantó después de establecer la barrera y posterior al periodo de lluvias.

### **3.1. Muestreo de vegetación**

La vegetación asociada a las cárcavas fue caracterizada para definir una línea base. En el mes de febrero del 2015, se realizó un registro de las especies vegetales presentes en las cárcavas donde se proponía construir la Barrera viva No. 1, 2, 3 y 4; para que sirviera de base para definir el sistema de muestreo de la vegetación existente en las cárcavas bajo estudio.



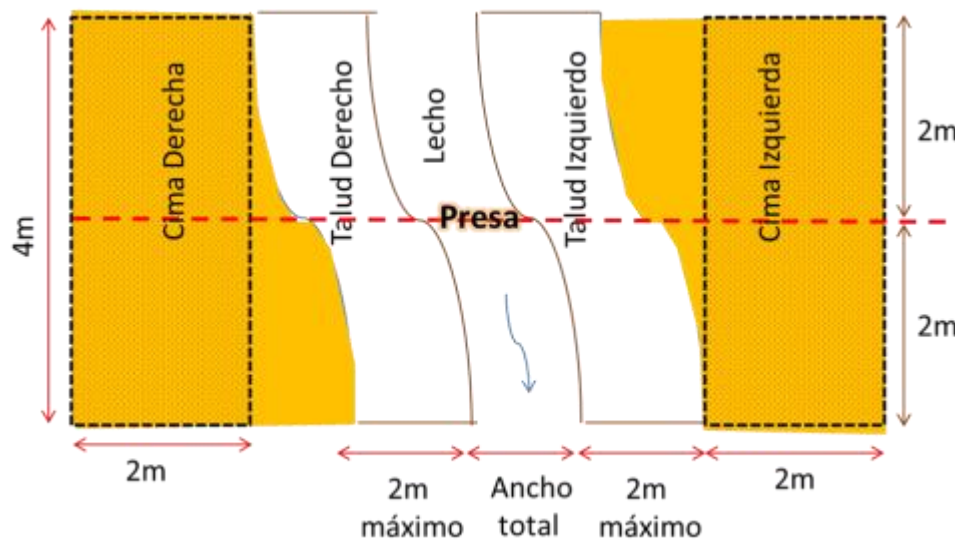
**Figura 54. Diagrama del modelo para la estimación de escurrimientos y sedimentos en cuencas.**

En julio del 2015 se realizó un muestreo de la vegetación existente en las secciones transversales de las cárcavas donde se establecieron las prácticas de bioingeniería. En cada sitio de muestreo se identificaron las especies existentes en la Cima Derecha (CD), Talud Derecho (TD), Lecho (L), Talud Izquierdo (TI) y Cima Izquierda (CI) y se registró la abundancia-cobertura de las especies presentes con base en la Escala Cualitativa de Braun-Blanquet (1979) (Figuras 55 y 56).



**Figura 55. Vista frontal del esquema de muestreo.**

Se muestrearon cuatro metros de longitud sobre la cárcava, con referencia a la ubicación de la obra de bioingeniería; dos metros aguas arriba de la presa y 2 metros aguas abajo. Tanto en la cima como en el talud, se consideró una amplitud de 2 m de muestreo y en el lecho, se tomó el registro de todas las especies encontradas en el transecto de los 4 m.



**Figura 56. Vista aérea del esquema de muestreo**

### 3.2. Identificación de especies.

La identificación de las especies encontradas, se llevó al cabo con claves de identificación taxonómica; se colectaron ejemplares con duplicados de cada una de las especies para su herborización y respaldo en herbario. Las muestras recolectadas presentaron las estructuras necesarias para su identificación (hojas, flor y fruto); salvo casos específicos, donde la época de colecta no correspondió con el momento de floración de la especie, por lo que no fue posible disponer de este material para su identificación.

Las plantas recolectadas se colocaron dentro de periódico y cartón, acomodadas en la prensa botánica para ser llevadas a las instalaciones del Herbario-Hortorio (CHAPA) del Colegio de Posgraduados, donde se secaron y posteriormente, se desinfectaron en el área de congelación para evitar introducir alguna plaga a la colección del Herbario.



**Figura 57. Colecta y herborización de especies.**

La identificación de las especies colectadas se realizó en las instalaciones y con el equipo del herbario CHAPA. La literatura utilizada para la identificación de las especies, incluye la Flora Fanerogámica del Valle de México (Rzedowski, Calderón de Rzedowski y colaboradores, 2005), la Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Grether *et al.*, 2006; Soto-Estrada, 2004; Ocampo-Acosta, 2004; Torres-Colín y Delgado-Salinas, 2008), la Flora del Bajío y Regiones Adyacentes (Villarreal, 2003) y literatura relacionada con la Flora de la Mixteca Oaxaqueña (García *et al.* 1994; Guizar *et al.*, 2010; Guizar, 2011; Cruz, 1992). Una vez que se logró la identificación con las guías, se realizó el cotejo con la colección de dicho herbario. El listado florístico obtenido incluye a las especies tanto del período seco como del período húmedo y cada especie fue catalogada con un acrónimo.

### 3.3. Análisis de datos

Una vez identificadas las especies, se integró una matriz de datos en Excel ordenando las especies en las columnas y los sitios de muestreo en las hileras obteniéndose un total de 29 sitios de muestreo y 36 especies, solo del período lluvioso. Es importante mencionar que los sitios que se encontraron desprovistos de vegetación solo se consideraron en la discusión de resultados, pero no se incluyeron en la matriz. Para construir la matriz con datos cuantitativos del atributo de cobertura, se transformó la escala Braun-Blanquet a porcentajes de cobertura (Cuadro 8), de acuerdo con Pysek *et al.* (2004).

**Cuadro 8. Escala Braun-Blanquet a cobertura en porciento.**

Valor de Cobertura		%
r	Única, escasa cobertura	0.1
+	Cobertura muy baja <1%	0.5
1	1-5%	2.5
2	5-25%	15.0
3	25-50%	37.5
4	50%-75%	62.5
5	75%-100%	87.5

El procesamiento y análisis estadístico de los datos de la matriz y la distribución de las especies con respecto a su posición en la sección transversal de las cárcavas, se realizó un Análisis de Correspondencia Rectificado (DCA por sus siglas en inglés) en el programa PC-ORD, 6.0 (McCune y Mefford, 2011). Esta técnica de ordenación indirecta permite ubicar los sitios y las especies dentro de un espacio de ordenación definido por ejes. Los ejes representan un gradiente ambiental que no se encuentra necesariamente definido previo a la ordenación (Hill y Gauch, 1980). En los gráficos se muestran únicamente los dos primeros ejes de ordenación debido a que son los que explican la mayor parte de la variabilidad en los datos.

La clasificación de los datos obtenidos en el muestreo, utilizó un análisis de agrupamiento de dos vías, también en el programa PC-ORD, 6.0, para esquematizar en un dendrograma los grupos de especies obtenidos con base en el atributo de cobertura y de presencia ausencia. Esta técnica jerárquica aglomerativa, permite formar grupos con semejanza florística; para establecer esta similitud entre grupos se empleó el índice de similitud de Sorensen (Hardle y Simar, 2007; McCune y Mefford, 2011).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se analizará la red drenaje de la microcuenca de Santa María Tiltepec, la captura de sedimentos de la presa de piedra acomodada como parte del sistema de bioingeniería a evaluar, la sobreelevación de la cortina, la construcción de un vertedor de



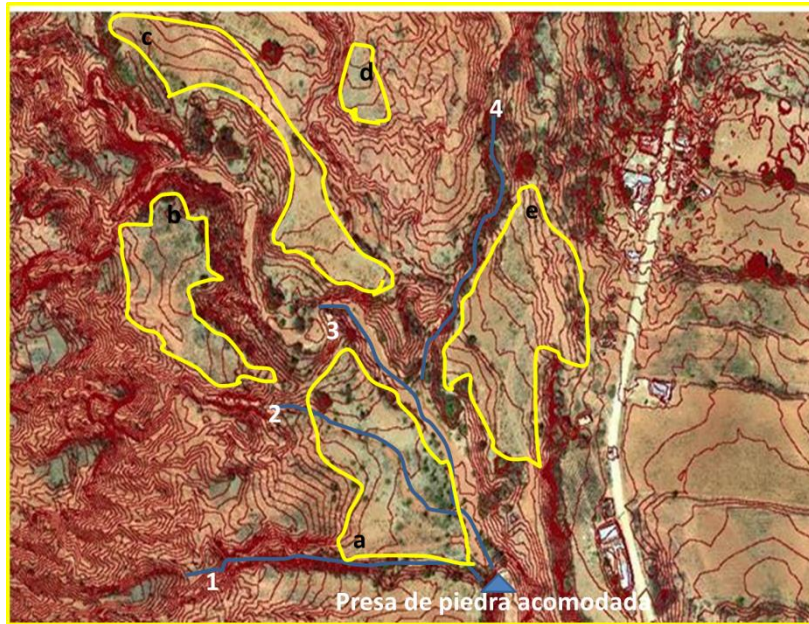
demasiás, el levantamiento de las secciones transversales de las cárcavas que descargan a la presa, el establecimiento de las barreras vivas como parte del sistema de bioingeniería, la estimación de la retención de sedimentos en la presa de piedra acomodada y de las barreras vivas, la degradación específica de los suelos con cárcavas y el levantamiento florístico de la vegetación existente en el lecho, taludes y lomo de las cárcavas con barreras como la línea base de la vegetación.

#### **4.1. Topografía, cobertura vegetal y manejo de los terrenos de la zona de trabajo**

El levantamiento topográfico realizado con el dron permitió trazar curvas a nivel a cada metro. Se identificaron cuatro cárcavas principales que descargan a la presa de piedra acomodada (Figura 58; cárcavas 1, 2, 3 y 4). Destaca que en la cárcava 4 se construyeron una serie de presas de control de azolves de piedra acomodada que cumplieron su función y permitieron el desarrollo de vegetación para la protección y estabilización de la cárcava. Sin embargo, actualmente las presas están destruidas y nuevamente se inicia el crecimiento de la cárcava (Figura 58).

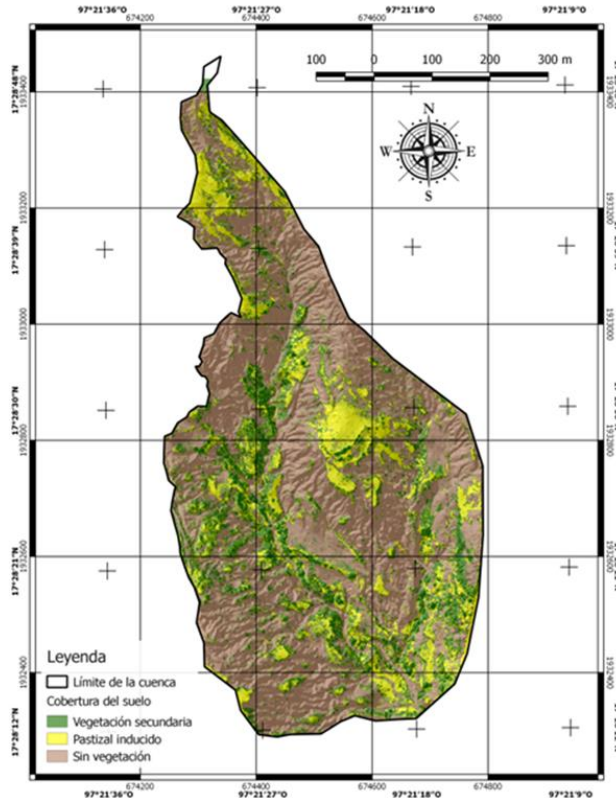
El relieve que predomina es pronunciado, sin embargo, existen algunas pequeñas playas o terrazas construidas por los productores y utilizadas como zonas de cultivo (Figura 58 zonas a, b, c, d y e). Las playas o terrazas utilizadas para la agricultura ahora no se siembran, están abandonadas, sometidas al pastoreo de ganado ovino, no tienen mantenimiento y se están degradando por el crecimiento del sistema de cárcavas que domina la zona.

Los terrenos son comunales, están asignados a los productores quienes los manejaron utilizando bordos de tierra y vegetación (pipal y carrizo) para formar las terrazas o playas, sin embargo, estas parcelas han sido heredadas de generación en generación y los dueños actuales no las siembran porque no les es rentable o porque han emigrado. Las autoridades comunales a pesar de reconocer el problema no pueden hacer nada para recuperar las terrazas porque existen dueños y solo algunos productores han construido obras de retención de azolves.



**Figura 58. Topografía y pequeñas terrazas construidas por los productores en parte de la zona de estudio**

Con el MDE de alta resolución obtenido con el dron se delimitaron las zonas con suelo desnudo (sin vegetación) que es la zona de cárcavas y representa el 61% del área total; la zona de matorrales y zacates (antes zonas agrícolas) que cubre el 17% y la zona de vegetación arbustiva y arbórea (vegetación secundaria) que se encuentra en las márgenes de las cárcavas que tenían obras de control de azolves con un 22% del total de la superficie (Figura 59).

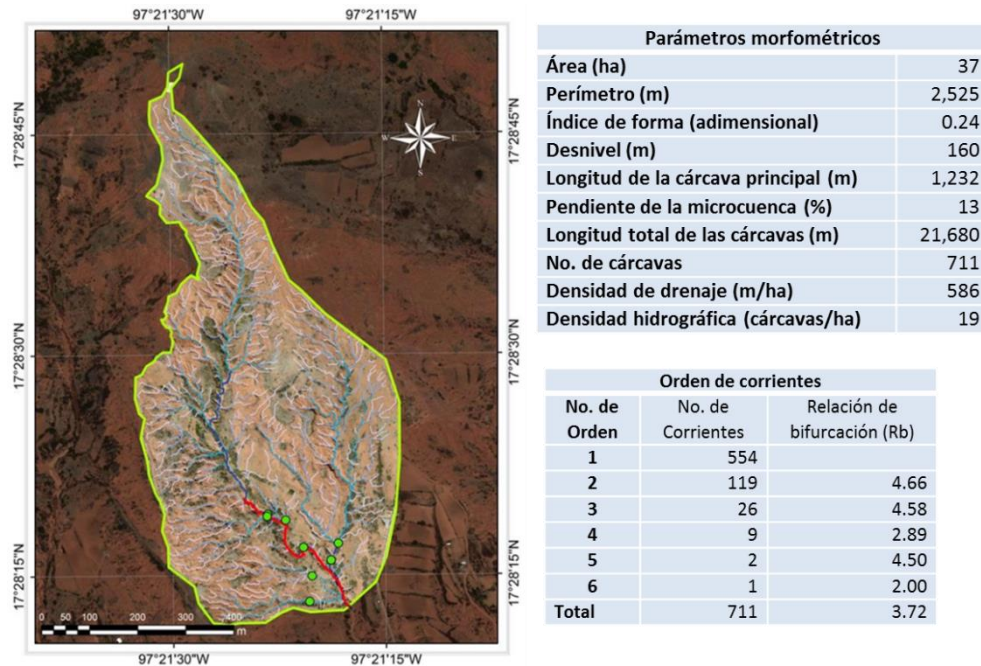


**Figura 59. Mapa de cobertura del suelo.**

La situación que prevalece en la zona de trabajo, motivó a establecer un sistema de bioingeniería considerando la presa de piedra acomodada construida por los productores en la parte baja del área de drenaje y las barreras vivas construidas en las cárcavas que descargan en la playa formada con los sedimentos retenidos por la presa de piedra acomodada.

#### **4.2. Parámetros morfométricos de la zona de trabajo**

La microcuenca de “Santa María Tiltepec” tiene una superficie de 37 ha, un índice de forma de 0.24 que la identifica como una microcuenca alargada, la pendiente media es de 13 %, las cárcavas identificadas fueron 771 con una longitud total de 21,680 m, una densidad de drenaje (cárcavas) de 586 m ha<sup>-1</sup> y una densidad hidrográfica de 19 cárcavas ha<sup>-1</sup>. Los parámetros morfométricos, indican que existe un sistema de drenaje complejo y anómalo con cárcavas de diferentes tamaños y longitudes que están en un constante crecimiento tanto en los taludes como en el lecho producto de los cambios de pendiente, lo que incrementa la capacidad de transporte de partículas por el flujo superficial erosionan los suelos y provocan el crecimiento de las cárcavas (Figura 60).

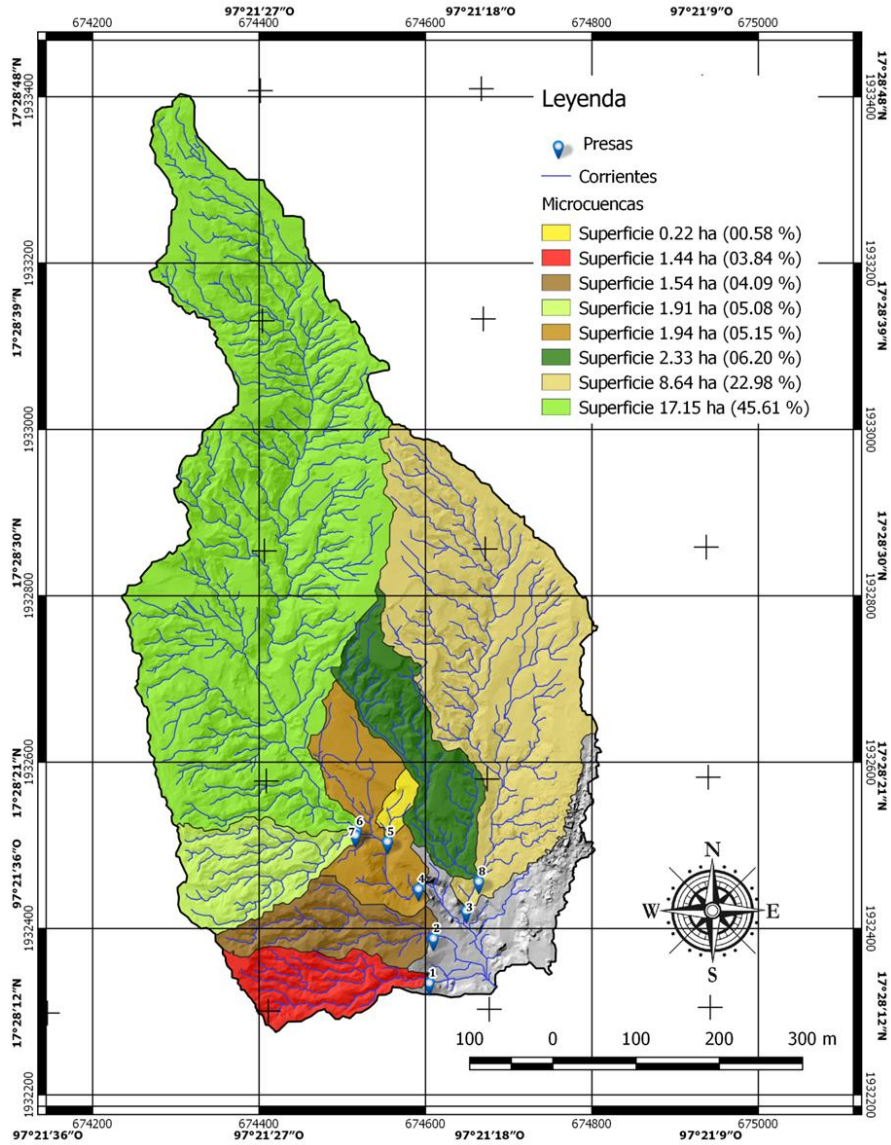


**Figura 60. Parámetros morfométricos de la microcuenca de “Santa María Tiltepec”.**

El área de trabajo tiene cárcavas de primer a sexto orden. La cárcava principal tiene una longitud de 1,232 m y un desnivel de 160 m de la parte alta hasta la presa de piedra acomodada. La relación de bifurcación promedio es de 3.72 que indica que cerca de 4 cárcavas de un orden determinado descargan en un orden inmediato superior. Destaca que 554 cárcavas pequeñas (primer orden) descargan en 119 cárcavas (segundo orden) con una relación de bifurcación de 4.66 (cárcavas de primer orden/cárcavas de segundo orden) (Figura 60).

#### **4.3. Delimitación de área de drenaje de la microcuenca.**

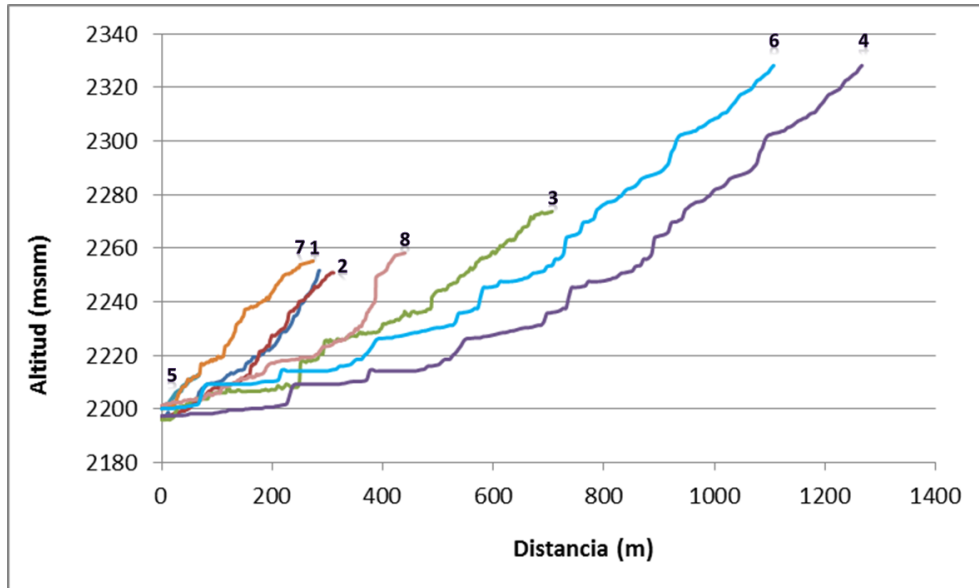
La microcuenca integra ocho áreas de drenaje que se delimitaron con el MDE de precisión y con las curvas a nivel con equidistancia de un metro. Todas las áreas de drenaje descargan a la presa de piedra acomodada y sus tamaños varían de menos de una hectárea hasta más de 17 ha. En cada área de drenaje se levantó el perfil longitudinal para conocer su desnivel y la longitud de cada cárcava y en la parte baja se construyó una barrera viva. En la cárcava principal se colocaron dos barreras vivas (Figura 61).



**Figura 61. Áreas de influencia de cada barrera viva construida.**

El área de estudio se dividió en pequeñas unidades de drenaje por cada cárcava principal encontrando que, de acuerdo a su tamaño, la cárcava 5 es pequeña con una longitud de 70 m y una pendiente media de 18.1 %. Las cárcavas 1, 2, 7 y 8, por su área de drenaje, son medianas con áreas que varían de 1.4 a 2.3 ha, con pendientes medias que fluctúan de 12.9 a 20.2 % y longitudes que varían de 280 a 450 m. Las cárcavas grandes (3, 4 y 6) presentan pendientes de menores de 11 %, y longitudes que fluctúan de 750 a 1300 m. La cárcava 4, recibe los escurrimientos del área de drenaje de las cárcava 5 (0.2 ha) y 6 (17.1 ha); y el área de aporte de la cárcava 3 (10.9 ha), también contiene la unidad de drenaje de la cárcava 8 (2.3 ha) (Figura 61 y 62).





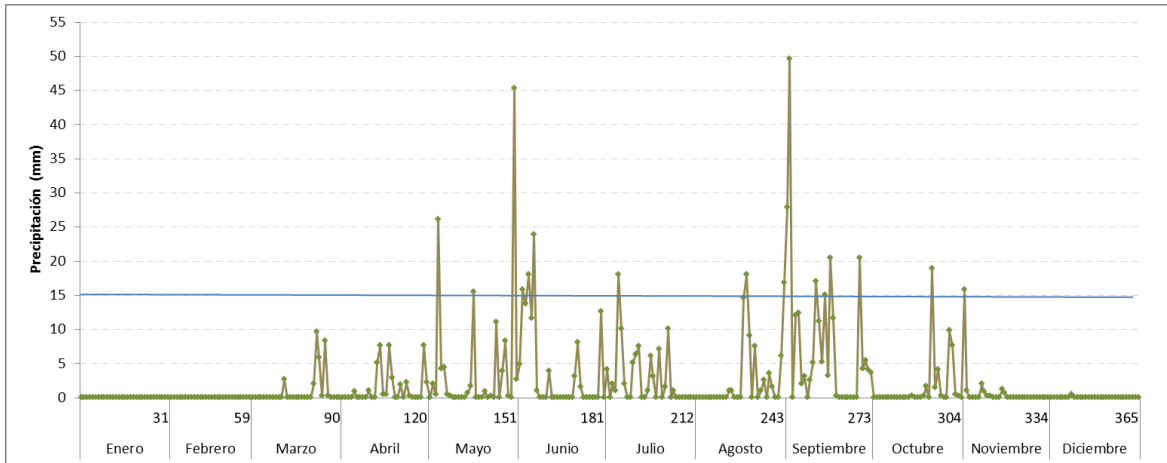
**Figura 62. Perfiles longitudinales de las áreas de drenaje de las cárcavas seleccionadas.**

Las relaciones de área de drenaje, perfiles longitudinales y pendientes medias de las cárcavas seleccionadas para establecer las barreras vivas son importantes ya que influyen en el tiempo de concentración de las avenidas, en los escurrimientos medio y máximos instantáneos y en la producción de sedimentos; variables hidrológicas, que asociadas con la precipitación por evento, son claves para el buen funcionamiento de las barreras vivas por construir.

Las barreras vivas establecidas en las cárcavas pequeñas y medianas captaron sedimentos y desalojaron los excesos de agua sin causar daño a las estructuras o si hubo algún daño, se reparó la barrera después de la avenida. En las cárcavas grandes se tenía el riesgo de que las barreras vivas no pudieran resistir el impacto de las avenidas extraordinarias y fueran a colapsar, situación que se presentó y se discutirá posteriormente.

#### **4.4. Precipitación y predicción de escurrimientos y sedimentos**

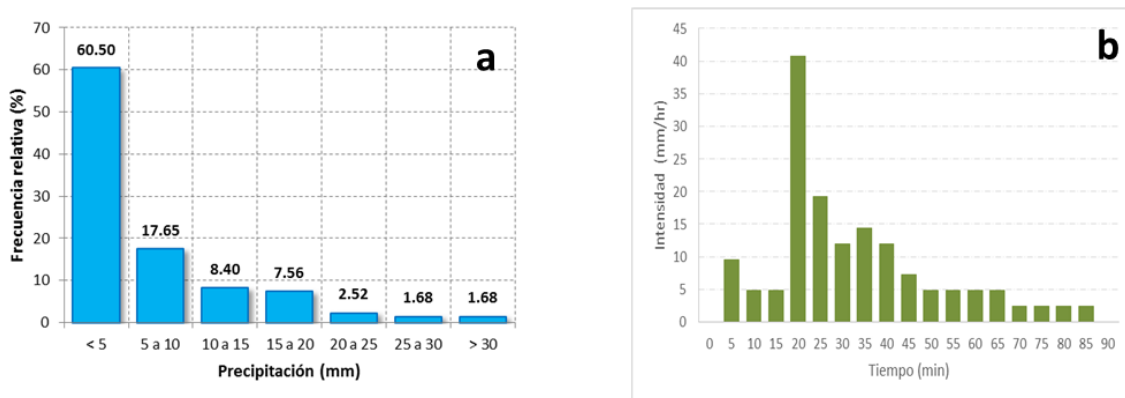
La precipitación anual en la zona de estudio fue de 762 mm que se presentó de los meses de marzo a noviembre, con intensidades que fluctuaron de 1 hasta 49 mm diarios y que se presentaron periodos de lluvia de más tres días lo que originaba que el contenido de humedad variara por evento, situación que influyó en los escurrimientos medios, máximos y en la producción de sedimentos por evento (Figura 63).



**Figura 63. Distribución de la lluvia en el área de estudio.**

Las lluvias diarias se analizaron para tener una idea de cuales podrían causar escurrimientos importantes para el transporte de sedimentos, se seleccionó una precipitación umbral de 15 mm diarios y se encontró que solo 16 eventos, de los 119 que se presentaron, tuvieron cantidades de lluvia mayores a 15 mm que se presentaron en los meses de mayo a octubre y algunos de esos eventos se presentaron asociados con más de 2 días de lluvia (Figura 63).

El año de 2015, presentó 119 eventos de lluvias de los cuales 103 eventos, que representan el 86 % del total, tuvieron lluvias menores de 15 mm y son los eventos que se espera no produzcan escurrimientos y sedimentos y solo el 14% de los eventos pueden estar asociados a la producción de escurrimientos (Figura 64a).



**Figura 64. Características de la lluvia en el área de influencia de la zona de estudio.**

La zona de estudio registró intensidades máximas de lluvia de más de 60 mm h<sup>-1</sup> en 30 minutos para un periodo de retorno de 10 años, que es una intensidad alta que puede generar altos escurrimientos máximos instantáneos. Con la información disponible se tomó un evento del 5 de julio del 2015 con una precipitación de 16 mm y una duración de 85 minutos y el hietograma marca que la intensidad máxima del evento de 40 mm h<sup>-1</sup> se alcanza a los 20 minutos, lo que sugiere que las duraciones de las lluvias son cortas y las

intensidades son altas lo que provocará alta erosividad de la lluvia e impactará en los escurrimientos máximos instantáneos y su capacidad de remoción y transporte de sedimentos, ya que se trata de erosión en cárcavas (Figura 64b).

La producción de sedimentos por eventos fue estimada con el modelo de predicción MUSLE que considera los parámetros de: área de la cuenca, erosionabilidad del suelo (K), factor de longitud y grado de pendiente (LS), factor de cubierta vegetal (C), Curva Numérica<sup>5</sup> (CN<sub>II</sub>), longitud y desnivel de la cárcava principal. Los valores de los parámetros determinados se ingresaron en una hoja de Excel y con los datos de lluvia diaria se calcularon los escurrimientos y producción de sedimentos por evento (Cuadro 9).

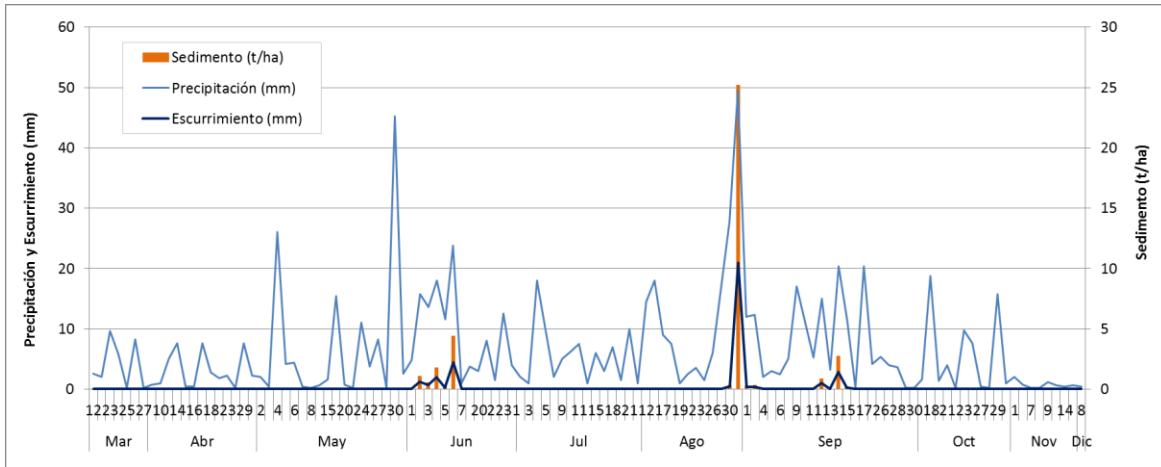
**Cuadro 9. Parámetros utilizados en el modelo MUSLE para la microcuenca de Tiltepec.**

Microcuenca:	Tiltepec
Parámetros de entrada:	
Área de la cuenca (ha):	38.00
Factor K ponderado:	0.029
Factor LS ponderado:	5.740
Factor C ponderado:	0.560
Factor P : CN <sub>II</sub> inicial ponderado:	1.000
L (longitud de cauce principal, metros):	71.0
H (Desnivel del cauce principal, metros):	1,232.00
	160.00
Parámetros de entrada opcionales:	
Pendiente media (s) (%)	13.000
Longitud de pendiente (m):	150.0
m (coef. por rango de pendiente, adim.):	0.5

Los resultados de la corrida del modelo MUSLE muestra que se presentaron escurrimientos y producción de sedimentos de importancia a fin de mayo e inicios de septiembre asociados con la presencia de días con lluvia y fueron los eventos que causaron la acumulación de azolves en las obras de retención (presa de piedra acomodada y barreras vivas). En agosto y septiembre se estimó que hubo escurrimientos y sedimentos de menor magnitud. (Figura 65).

---

<sup>5</sup> El valor de CN<sub>II</sub> se utiliza para estimar el escurrimiento medio (Q) y el escurrimiento máximo (q<sub>p</sub>) que son considerados como el factor de energía para remover y transportar sedimentos  $(11.5 (Q * q_p)^{0.56})$



**Figura 65. Precipitación, escurrimientos y producción de sedimentos en la microcuenca de Tiltepec.**

La información permitió obtener la variación de las variables hidrológicas a nivel mensual que nos permitió estimar que el escurrimiento medio anual fue de 34.98 mm, que se presenta en los meses de junio y septiembre principalmente (93% del escurrimiento anual), que se asocia directamente con la producción de sedimentos y con los escurrimientos máximos instantáneos (Cuadro 10).

**Cuadro 10. Variables hidrológicas estimadas en la zona de estudio**

Meses	Precipitación	Q	Q	q <sub>p</sub>	Sedimentos	
	(mm)	(mm)	(miles de m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	(Mg ha <sup>-1</sup> )	(miles de t)
Ene	-	-	-	-	-	-
Feb	-	-	-	-	-	-
Mar	28.60	-	-	-	-	-
Abr	39.60	-	-	-	-	-
May	127.20	-	-	-	-	-
Jun	117.40	8.58	3.26	2.69	7.97	0.30
Jul	85.20	-	-	-	-	-
Ago	82.30	-	-	-	-	-
Sep	235.40	26.40	10.03	12.77	29.88	1.14
Oct	44.40	-	-	-	-	-
Nov	21.80	-	-	-	-	-
Dic	0.40	-	-	-	-	-
Suma	782.30	34.98	13.29			1.44

La capacidad de remoción y transporte de sedimentos en cárcavas está relacionado con el esfuerzo cortante del flujo, que es una función del tirante hidráulico, la densidad del fluido (agua más sedimentos en suspensión) y la pendiente de la cárcava; por tal razón, con las pendiente pronunciadas de las cárcavas y con los escurrimiento máximos instantáneos que se estimaron en el mes de junio y septiembre, el esfuerzo cortante actual será mayor que el esfuerzo cortante crítico y se propiciaría la producción de sedimentos como ha sido señalado por Foster *et al.* (1995).

La producción de sedimentos estimada con el modelo vario de 0.2 a 25.20 Mg ha<sup>-1</sup> y se asoció solo a 14 eventos (11% del número de eventos en el año) con precipitaciones mayores de 11 mm y con lluvias por varios días. La mayor producción de sedimentos observada fue el 2 de septiembre del 2015, con cantidad de lluvias de 27.8 mm el día previo y de 49.5 mm el día del evento extraordinario (Cuadro 11).

**Cuadro 11. Variables hidrológicas diarias generadas con el modelo MUSLE**

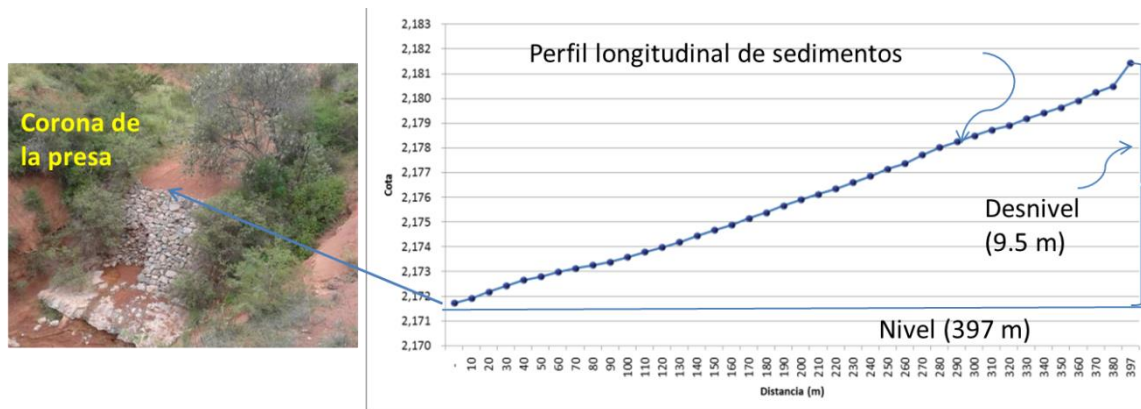
Fecha	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Escurrimiento máximo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Producción de sedimentos (Mg ha <sup>-1</sup> )
6/2/2015	15.8	1.25	0.76	1.06
6/3/2015	13.6	0.67	0.41	0.53
6/4/2015	18	1.96	1.19	1.77
6/5/2015	11.6	0.29	0.17	0.20
6/6/2015	23.8	4.42	2.69	4.40
9/1/2015	27.8	0.45	0.27	0.34
9/2/2015	49.5	21.00	12.77	25.20
9/3/2015	0	-	-	-
9/4/2015	12	0.35	0.21	0.26
9/5/2015	12.3	0.40	0.24	0.30
9/14/2015	15	1.02	0.62	0.85
9/15/2015	3.2	-	-	-
9/16/2015	20.4	2.89	1.76	2.73
9/17/2015	11.6	0.29	0.17	0.20

Los eventos umbrales de lluvia para causar erosión y producción de sedimentos para el año del 2015 se presentaron en los meses de junio y septiembre, por lo que es conveniente analizar la distribución temporal de la lluvia asociada con la intensidad de la lluvia. Esta información concuerda con la reportada por Flores *et al.* (2003) quienes señalan que las lluvias mayores de 24 mm producen escurrimientos. Sin embargo, debe reconocerse que no es solo la cantidad de lluvia, sino que depende de la humedad del suelo al presentarse el evento y de la intensidad de la lluvia.



#### 4.5. Retención de sedimentos antes de la rehabilitación de la presa de piedra acomodada

La presa de piedra acomodada construida por los productores con una altura de 3.88 m, una corona de 1 m y un ancho de 10.46 m estaba llena de sedimentos hasta una cota de 2,172 msnm. A partir de esa cota, se levantó el perfil longitudinal de sedimentos a 10 metros de equidistancia hasta una longitud de 397 m y se encontró un desnivel de 9.5 m. (Figura 66).



**Figura 66. Perfil longitudinal de la cárcava principal (De la cortina a la zona de depósito de sedimentos).**

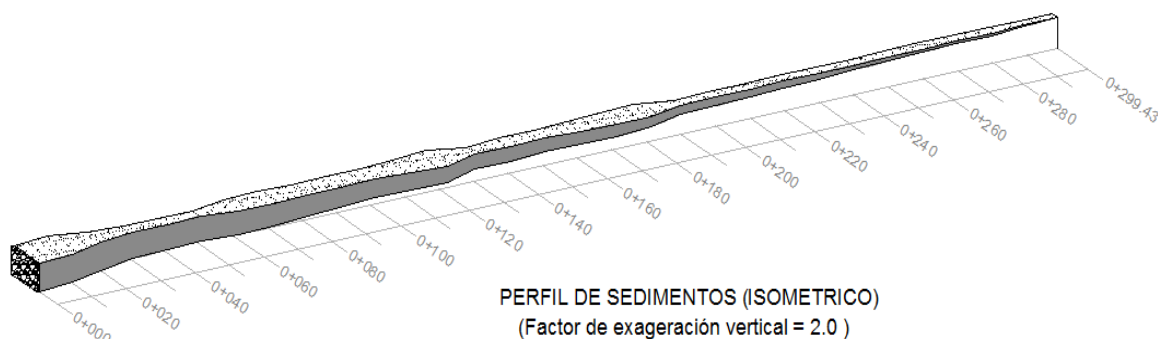
El ángulo de reposo de los sedimentos retenidos o pendiente de compensación para el espaciamiento de presas de control de azolves determinado fue del 2%, que permite considerar que el tamaño de los sedimentos corresponde a arenas como esta mencionado en el Manual de Conservación de Suelos del Colegio de Postgraduados (1975).

El perfil longitudinal levantado de la cárcava principal de la microcuenca “Santa María Tiltepec”, sirvió de referencia para que cada 10 m de longitud se tomara el ancho de los sedimentos para obtener las áreas para cada estación y con el ancho promedio se obtuvo el volumen de azolves por cada 10 m hasta la cota de 350 m (Cuadro 12).

**Cuadro 12. Volúmenes de sedimento retenidos por la presa de piedra acomodada.**

Estación	Prof (m)	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Vol acum (m <sup>3</sup> )	Estación	Prof (m)	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Vol acum (m <sup>3</sup> )
0+000	3.88	10.46	40.58	-	-	0+180	1.48	4.00	5.92	60.63	3,823.70
0+010	3.73	6.20	23.11	318.48	318.48	0+190	1.37	7.30	9.98	79.48	3,903.18
0+020	3.65	6.40	23.33	232.21	550.69	0+200	1.30	7.80	10.17	100.77	4,003.95
0+030	3.54	14.70	52.08	377.07	927.76	0+210	1.20	4.45	5.35	77.61	4,081.56
0+040	3.44	13.30	45.76	489.23	1,416.99	0+220	1.09	3.55	3.87	46.08	4,127.64
0+050	3.24	13.80	44.69	452.27	1,869.26	0+230	0.96	3.15	3.01	34.40	4,162.04
0+060	3.08	11.30	34.76	397.26	2,266.52	0+240	0.87	4.30	3.76	33.86	4,195.91
0+070	2.88	7.90	22.78	287.72	2,554.24	0+250	0.78	5.20	4.06	39.12	4,235.03
0+080	2.67	9.20	24.58	236.81	2,791.05	0+260	0.73	4.95	3.61	38.37	4,273.40
0+090	2.46	9.50	23.36	239.71	3,030.75	0+270	0.62	4.75	2.93	32.69	4,306.09
0+100	2.31	5.45	12.57	179.68	3,210.43	0+280	0.61	7.65	4.70	38.13	4,344.22
0+110	2.17	5.95	12.94	127.56	3,338.00	0+290	0.57	2.70	1.54	31.20	4,375.42
0+120	2.16	5.33	11.51	40.96	3,378.95	0+300	0.47	4.10	1.92	17.33	4,392.75
0+130	2.02	4.70	9.50	69.88	3,448.84	0+310	0.37	5.90	2.16	20.42	4,413.17
0+140	1.89	4.30	8.13	88.15	3,536.98	0+320	0.25	0.30	0.08	11.19	4,424.36
0+150	1.80	4.50	8.09	81.06	3,618.05	0+330	0.09	3.35	0.31	1.91	4,426.27
0+160	1.69	4.34	7.35	77.21	3,695.26	0+340	0.02	4.75	0.09	1.98	4,428.25
0+170	1.55	4.00	6.21	67.81	3,763.07	0+350	-	2.80	-	0.45	4,428.69

La profundidad de los sedimentos varió de 0.2 a 3.88 m con un promedio de 1.69 m. El ancho de los azolves depositados fluctuó de 14.7 m a 0.3 m con un promedio de 6.18 m, Las áreas de azolves variaron de 52 a 0.08 m<sup>2</sup> y el volumen de azolves captados por tramos fluctuó de 0.45 a 489 m<sup>3</sup> con una media de 123 m<sup>3</sup>. La variación en la profundidad de los sedimentos fue función de la pendiente del lecho de la cárcava y los anchos, áreas y volúmenes retenidos por tramos está relacionado con la variación del relieve en el perfil longitudinal, producto de las cárcavas que descargan los escurrimientos y sedimentos, razón por la cual, existe la presencia de expansiones y contracciones en las áreas de azolves acumulado como se aprecia en el perfil isométrico (Figura 67).



**Figura 67. Perfil isométrico de sedimentos retenidos en la presa de Santa María Tiltepec.**

Los azolves retenidos llegaron hasta 350 m aguas arriba en la presa de piedra acomodada, con un volumen captado 4,428.25 m<sup>3</sup>. La densidad aparente de los sedimentos retenidos fue de 1.35 Mg m<sup>-3</sup> y el peso de los azolves retenidos fue de 5,978.14 toneladas de sedimentos. La variación de las toneladas de sedimentos retenidos para antes de sobre elevar la presa de

piedra acomodada, muestra que en la parte baja de la cárcava cercana a la presa se formó una playa o terraza de sedimentos más ancha hasta la cota 0+100 que tuvo la capacidad de retener el 83 % de los sedimentos (Cuadro 13).

**Cuadro 13. Acumulación de sedimentos en la cárcava aguas arriba de la presa.**

Estación	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen Acumulado (m <sup>3</sup> )	Sedimentos* (Mg)
0+000	40.58	-	-
0+050	44.69	1,869.26	2,523.50
0+100	12.57	3,210.43	4,334.09
0+150	7.35	3,695.26	4,988.59
0+200	5.35	4,081.56	5,510.11
0+250	3.61	4,273.40	5,769.08
0+300	2.16	4,413.17	5,957.78
0+350	0.09	4,428.25	5,978.14

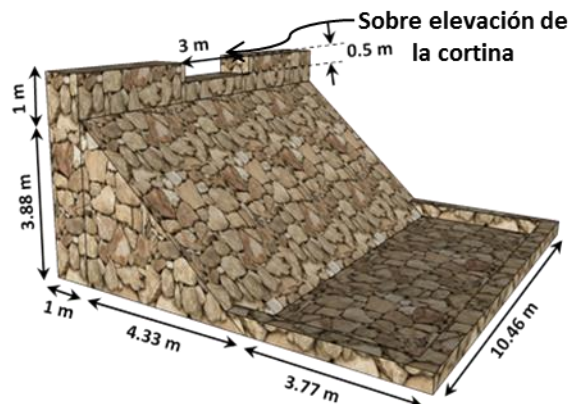
\* Densidad aparente 1.35 Mg m<sup>-3</sup>

La presa de piedra acomodada después de más de 15 años, cumplió su función de retener los sedimentos a la altura de diseño de la presa, lo que indica que los azolves retenidos son producto de una degradación de la zona de cárcavas por erosión de 157 Mg ha<sup>-1</sup> en varios años. Antes de realizar este estudio, la presa a lo ancho de su corona, era una estructura vertedora que dejaba pasar todos los escurrimientos y sedimentos fuera de la zona de estudio, situación que estaba afectando con socavaciones la cortina y el colchón hidráulico lo que ponía en riesgo la estabilidad de la obra.

#### **4.6. Retención de sedimentos después de la rehabilitación de la presa**

El sistema de bioingeniería establecido en este estudio, consistió en sobre elevar la cortina de la presa de piedra acomodada y establecer barreras vivas en varias cárcavas para cuantificar la cantidad de azolves que se pueden retener en un año y así estimar la degradación específica de varias áreas de drenaje en la zona de estudio.

La cortina de la presa se sobre elevó un metro de altura, se construyó un vertedor en la parte central de la cortina de 3 m de largo, 1 m de ancho y 0.5 m de altura, y se repararon las socavaciones de la cortina. Los trabajos realizados por los productores, permitieron mantener la estabilidad y el funcionamiento de la presa y aumentó su capacidad para retener azolves (Figura 68).



**Figura 68. Rehabilitación de la presa de piedra ubicada en la parte baja de la zona de cárcavas en “Santa María Tiltepec”.**

La estimación del volumen almacenado en la presa sobre-elevada se realizó después de la temporada de lluvia del 2015 y se encontró que la presa se había azolvado hasta la altura del vertedor (0.50 m). Como se tenía el área de azolves, se consideró que los sedimentos se depositaron proporcionalmente a lo largo del perfil longitudinal de la cárcava. El volumen de azolve estimado por cada estación considerando la profundidad de sedimentos y el área de depósito permitió estimar un volumen total de azolves retenidos por la presa sobre-elevada de 684.27 m<sup>3</sup> para el 2015 (Cuadro 14).

**Cuadro 14. Volumen de sedimentos retenidos por la presa sobre – elevada.**

Estación	Prof (m)	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Vol acum (m <sup>3</sup> )	Estación	Prof (m)	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Vol acum (m <sup>3</sup> )
0+000	0.50	10.46	5.23	-	-	0+180	0.25	4.00	1.01	10.25	552.99
0+010	0.48	6.20	3.00	41.16	49.85	0+190	0.24	7.30	1.76	13.84	566.84
0+020	0.48	6.40	3.05	30.24	80.09	0+200	0.23	7.80	1.83	17.94	584.78
0+030	0.47	14.70	6.84	49.42	129.51	0+210	0.22	4.45	1.00	14.13	598.90
0+040	0.45	13.30	6.05	64.44	193.95	0+220	0.21	3.55	0.75	8.75	607.65
0+050	0.43	13.80	5.99	60.18	254.12	0+230	0.20	3.15	0.63	6.90	614.55
0+060	0.42	11.30	4.71	53.50	307.63	0+240	0.19	4.30	0.82	7.22	621.77
0+070	0.40	7.90	3.14	39.26	346.89	0+250	0.18	5.20	0.94	8.78	630.55
0+080	0.38	9.20	3.45	32.96	379.85	0+260	0.18	4.95	0.87	9.03	639.58
0+090	0.35	9.50	3.36	34.06	413.92	0+270	0.16	4.75	0.78	8.22	647.80
0+100	0.34	5.45	1.84	26.00	439.91	0+280	0.16	7.65	1.25	10.13	657.93
0+110	0.32	5.95	1.93	18.85	458.77	0+290	0.16	2.70	0.43	8.39	666.32
0+120	0.32	5.33	1.72	18.24	477.01	0+300	0.15	4.10	0.61	5.19	671.51
0+130	0.31	4.70	1.45	15.85	492.86	0+310	0.14	5.90	0.81	7.11	678.61
0+140	0.29	4.30	1.27	13.59	506.45	0+320	0.13	0.30	0.04	4.25	682.87
0+150	0.29	4.50	1.28	12.76	519.20	0+330	0.02	3.35	0.07	0.51	683.38
0+160	0.27	4.34	1.19	12.38	531.58	0+340	0.01	4.75	0.06	0.61	683.99
0+170	0.26	4.00	1.04	11.16	542.74	0+350	-	2.80	-	0.28	684.27

Los sedimentos captados por la presa sobre-elevada a lo largo del perfil longitudinal de la cárcava principal indican que el 76 % se depositaron en los primeros 150 m agua arriba de la presa, lo que indica que la tecnología de presas y lama bordo que siguen los productores de la Mixteca permite formar pequeñas playas o terrazas para la producción de cultivos como fue referido por Oropeza *et al.* (1990), Antón y Martínez (2001) y Santiago (2016) (Cuadro 15).

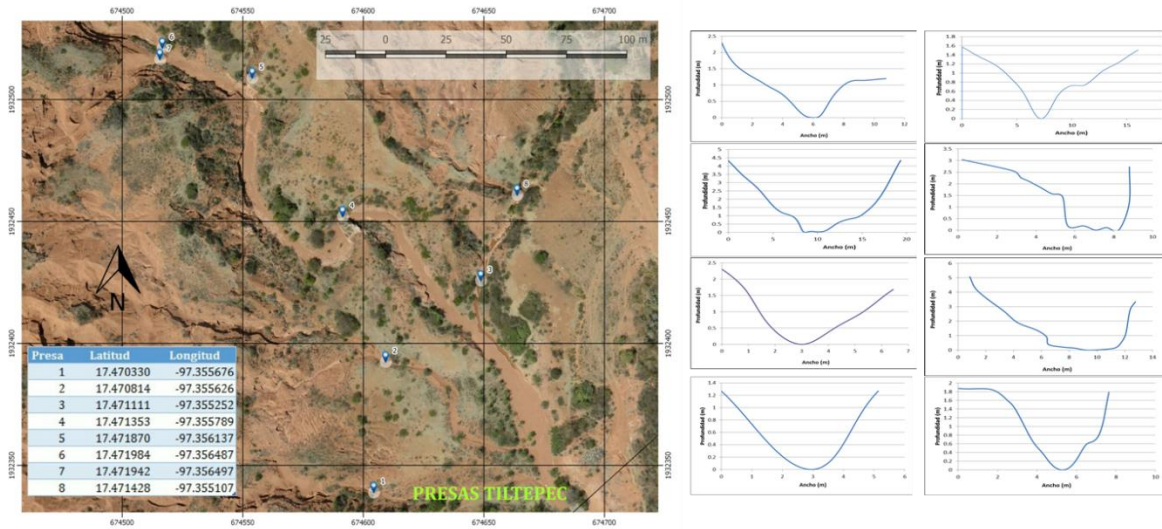
**Cuadro 15. Sedimentos acumulados a lo largo del perfil longitudinal de la cárcava.**

Estación	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen Acumulado (m <sup>3</sup> )	Sedimentos* (Mg)
0+000	5.23		-
0+050	28.76	254.12	358.32
0+100	16.51	439.91	620.28
0+150	7.65	519.20	732.08
0+200	6.83	584.78	824.53
0+250	4.13	630.55	889.07
0+300	3.93	671.51	946.83
0+350	0.97	684.27	964.83
* Densidad aparente 1.41 Mg m <sup>-3</sup>			

Es importante señalar que la presa de piedra acomodada retuvo 964.83 toneladas de sedimentos adicionales en el 2015 y que además las barreras vivas establecidas, también capturaron sedimentos por lo que al sumar ambos escenarios es posible estimar la cantidad de sedimentos retenidos en la zona estudio y estimar la degradación específicas de los suelos, en forma general, ya que se reconoce que una parte de los sedimentos que se generan en la cuenca no fueron retenidos por el sistema de bioingeniería establecido.

#### **4.7. Barreras vivas para el control de azolves**

La colocación las barreras vivas, requirió que se levantaran las secciones transversales de 8 cárcavas que descargan sus escurrimientos y sedimentos a la presa de piedra acomodada. Las secciones transversales eran irregulares tanto en ancho como en profundidad y algunas de ellas correspondían a cárcavas de pequeñas áreas de drenaje y dos de ellas se colocaron en la cárcava principal con más de 1,200 m de longitud como fue mencionado previamente (Figura 69).



**Figura 69. Ubicación de las barreras vivas y sus secciones transversales**

Las barreras vivas de troncos de colorín de diámetro > 10 cm que se clavaron en el lecho de las cárcavas a 20 a 30 cm de profundidad, espaciados de 0.5 a 1 m y a una altura efectiva de la barrera de entre 1 y 1.5 m. Aguas arriba de las barreras se colocaron ramas de forma transversal para formar el filtro para la retención de azolves y para dejar los escurrimientos corriendo el riesgo que colapsaran con la presencia de las avenidas extraordinarias que se presentaron en el año de 2015, como fue señalado en anterioridad (Figura 70).

La construcción de las barreras vivas con los troncos enterrados, con menos de 10 cm de diámetro, corrían el riesgo de ser volteados junto con las ramas entrelazadas, con la presencia de avenidas extraordinarias que podían causar daños en las estructuras temporales como se muestran en la barrera viva 5 (Figura 70).





**Figura 70. Barreras vivas antes y después de los eventos de lluvia del 2015.**

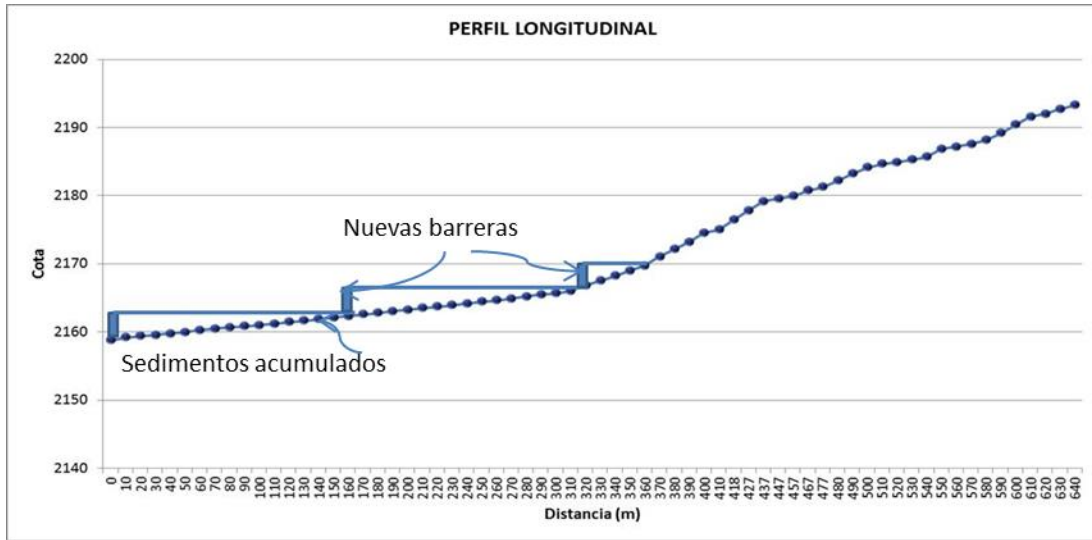
Las barreras vivas, en general funcionaron bien reteniendo azolves de un poco más de 1 m de profundidad, con ancho variables de acuerdo a la sección transversal levantada y con longitudes de depósito de sedimentos variables de más de 20 metros de longitud en función de la pendiente del lecho de las cárcavas pequeñas (Figura 71).



**Figura 71. Barreras vivas con ancho, longitud y profundidad de azolves retenidos.**

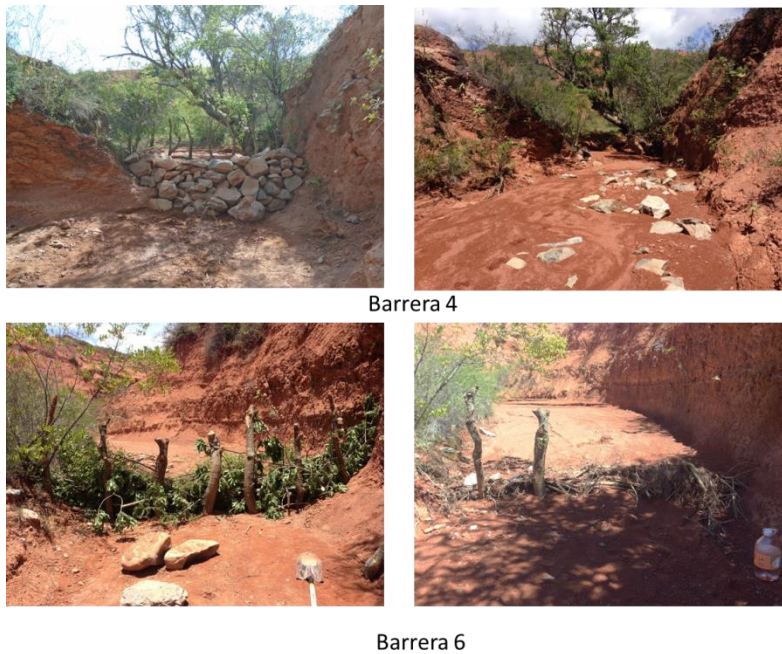
La mayor parte de las barreras vivas construidas cumplieron su función de retener azolves y después de una temporada de lluvia se encontraban azolvadas y los troncos comenzaban a retoñar. Algunas de las ramas fueron destruidas, situación que se consideró para rehabilitarlas en forma permanente, ya que se corría el riesgo de destrucción sino se le daba mantenimiento. De manera complementaria, cada barrera viva debe prolongarse a ambos márgenes de la cárcava para aumentar su capacidad de retención de azolves y resistir la próxima temporada de lluvia; además habrá que construir otras barreras vivas aguas arriba para continuar en forma escalonada con la estabilización de las cárcavas como se muestra esquemáticamente en la Figura 72.





**Figura 72. Escalonamiento de las barreras vivas aguas arriba para la estabilización de las cárcavas.**

Es recomendable considerar el área de drenaje ya que en cárcavas grandes donde se presentan altos escurrimientos máximos instantáneos se pueden poner en riesgo las estructuras temporales. En este estudio, se estableció sobre la cárcava principal la barrera viva 4, que se construyó con un pequeño muro de piedra y aguas arriba con una barrera viva y la barrera viva 6 que se formó con troncos y ramas; pero colapsaron con los escurrimientos de más de  $12.77 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  estimados del área de estudio (Figura 73).

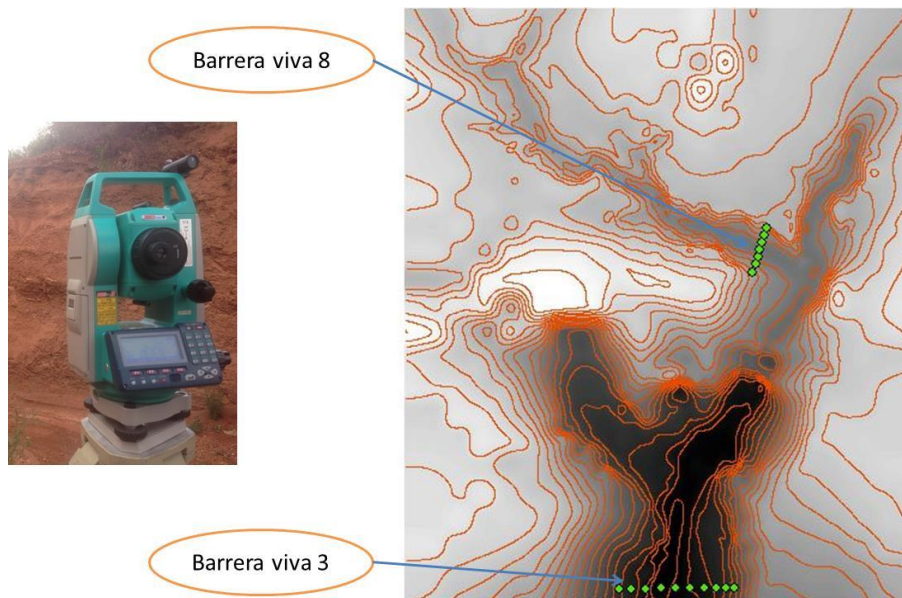


**Figura 73. Barreras vivas que se colapsaron con las avenidas extraordinarias.**

El sistema de bioingeniería se basa en construir una presa permanente en la parte baja de la cárcava principal y luego colocar las barreras vivas aguas arriba para formar zonas de retención de sedimentos que permitan la repoblación para estabilizar las cárcavas pequeñas y en la cárcava principal es recomendable establecer presas permanentes.

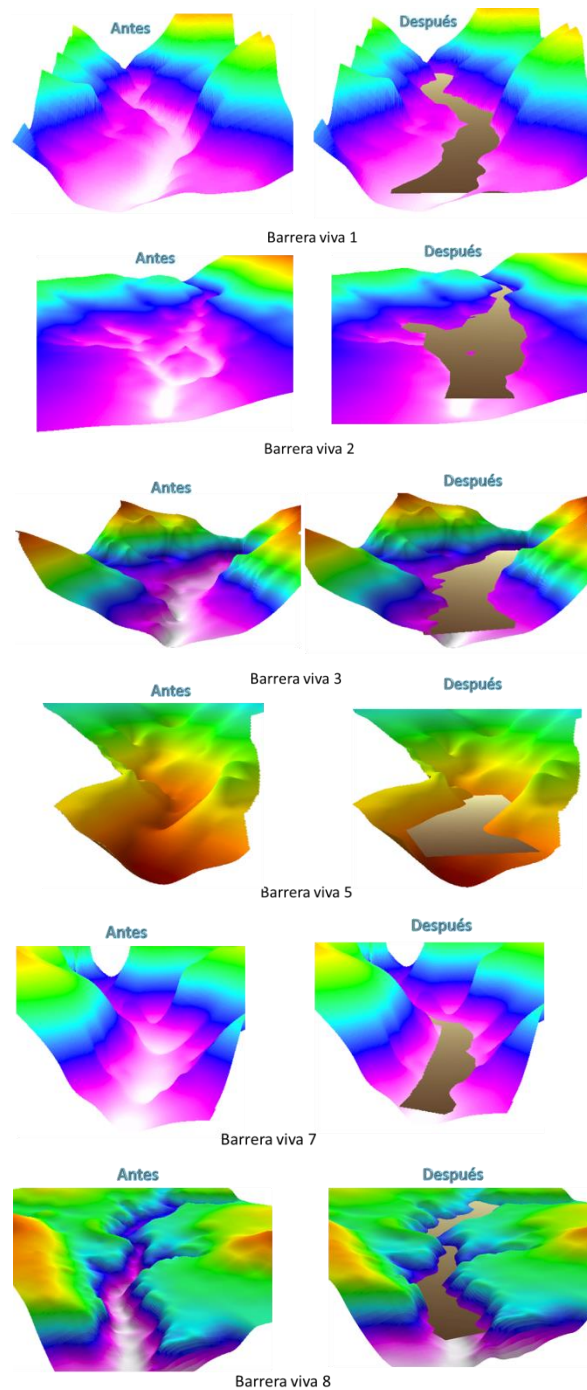
#### 4.8. Estimación de los sedimentos retenidos en las barreras vivas

Los levantamientos topográficos de las cárcavas para antes y después de su establecimiento (después de la época de lluvias del año 2015) permitieron generar curvas de nivel a cada 0.5 m. Las curvas a nivel de antes y después de establecer las barreras vivas permitieron definir una línea base de volumetría a fin de cuantificar los azolves retenidos aguas arriba de cada una de las barreras después del periodo de lluvias. Un ejemplo del levantamiento de las secciones transversales de 2 cárcavas se muestra en la Figura 74.



**Figura 74. Levantamiento de precisión con curvas de nivel a cada 0.5 m en cárcavas de Tultepec.**

El volumen de sedimentos retenidos por cada barrera viva se realizó con la herramienta “Cut/Fill”, de la extensión Spatial Analyst del programa ArcMap, que estima los volúmenes de corte o de relleno entre dos modelos. Los perfiles isométricos de las cárcavas obtenidos con el programa permitieron determinar las diferencias de elevaciones de antes y después del levantamiento para estimar el volumen de sedimentos acumulados en el año 2015 para cada barrera viva (Figura 75).



**Figura 75. Perfiles isométricos de antes y después de las cárcavas con barreras vivas**

El perfil isométrico para antes del ciclo de lluvias muestra el relieve de las cárcavas (ancho, profundidad y largo) en tercera dimensión. Después del periodo de lluvia, en el perfil isométrico aparece la ubicación de las barreras vivas y las zonas de recepción de los sedimentos (zona de color café), como se muestra en la Figura 75.

La información de cortes y rellenos por cárcava permitió estimar la profundidad de azolves en la barrera viva y, en la parte alta del perfil, la longitud de la zona de recepción de sedimentos, el área de la cárcava con sedimentos, que se calculó con los pixeles (0.1 x 0.1 m) identificados en los MDE levantados, la densidad aparente de los sedimentos retenidos y los volúmenes de azolves retenidos en m<sup>3</sup> en cada cárcava (Cuadro 16).

Las barreras vivas retuvieron más de 248 m<sup>3</sup> de azolves que corresponden a un peso de sedimentos de más 340 Mg, de los cuales fue la barrera 3 la que retuvo el 29 %, seguido de la barrera 2 con el 28% y resto de las barreras con menos del 13%. La degradación específica de las áreas de drenaje con barreras vivas varió de 13 a 83 Mg ha<sup>-1</sup> con un valor promedio de 30.88 Mg ha<sup>-1</sup> que es un indicador de la cantidad de sedimentos que salen de cada una de las áreas de drenaje y que descargan en la presa de piedra acomodada (Cuadro 16). La degradación específica estimada para el año de 2015 es parcial ya que la barrera viva solo retuvo parte de los sedimentos transportados en cada área de drenaje y el resto paso a través de las barreras vivas con los escurrimientos superficiales extraordinarios que se presentaron en cada cárcava bajo estudio.

**Cuadro 16. Volumen, peso de sedimentos y degradación específica de los suelos.**

Barrera	Area de drenaje (ha)	Profundidad de azolves en la barrera (m)	Profundidad de azolves en la parte alta (m)	Longitud del perfil de azolves (m)	Area de la cárcava con azolves (m <sup>2</sup> )	Volumen de azolves (m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	Peso de sedimentos (Mg)	Degradación específica (Mg ha <sup>-1</sup> )
1	1.44	0.85	0.15	29.70	64.42	31.00	1.39	43.09	21.53
2	1.54	0.79	0.11	33.24	162.96	69.70	1.33	92.70	45.26
3	8.64	0.82	0.19	25.70	122.38	72.70	1.35	98.15	8.41
4	1.94								
5	0.22	1.11	0.10	14.35	37.15	18.30	1.20	21.96	83.18
6	17.15								
7	1.91	0.89	0.12	18.70	43.01	25.80	1.42	36.64	13.51
8	2.33	0.84	0.11	40.11	82.30	31.20	1.27	39.62	13.39
Resto	1.83	Area sin barreras vivas pero que los escurrimientos descargan a la presa de piedra acomodada							
Total	37.00					248.70		332.16	30.88

Los volúmenes de azolves retenidos en la presa de piedra y en las barreras vivas para el año de 2105 fue de 1,304 Mg, de los cuales el 74% corresponden a la presa de piedra acomodada, lo que indica que es la obra de infraestructura la que capta la mayor parte de los sedimentos que pasan por las barreras vivas y los que provienen de la cárcava principal. Las barreras vivas a pesar que cumplieron su función solo lograron retener el 26% de los sedimentos ya que dos barreras ubicadas en la cárcava principal colapsaron. Esto indica que el sistema de bioingeniería debe diseñarse con la construcción de obras permanentes (presas de control de azolves) y temporales como las barreras vivas para lograr estabilizar las cárcavas y propiciar la repoblación natural como se había señalado con anterioridad (Cuadro 17).

La degradación específica del área de estudio fue de 35. 27 Mg ha<sup>-1</sup> para el 2015 que es menor a la estimada con el modelo MUSLE (37.8 Mg ha<sup>-1</sup>) y la referida por Oropeza *et al.* (1990) que fue de más de 200 Mg ha<sup>-1</sup> y que estimó con los sedimentos retenidos en el



bordo y los sólidos acarreados y el material en suspensión que salía con los escurrimientos del área de drenaje. En este estudio solo se consideraron los sedimentos retenidos en las barreras vivas y en la presa sobre-elevada dejando constancia que la medición de los azolves retenidos solo se cuantificó a la altura del vertedor y en aguas arriba de la estructura. En la presa se retuvieron azolves en las márgenes derecha e izquierda que no fueron cuantificados, así como los sedimentos en suspensión y en el lecho que salieron por el vertedor de la presa.

**Cuadro 17. Azolves retenidos por la presa y barreras vivas en el 2015.**

Tipo de obra	Volumen de azolves (m <sup>3</sup> )	Peso de sedimentos (Mg)
Presa de piedra acomodada	684.27	964.83
Barreras vivas	248.70	340.06
Total	932.97	1,304.89
Área de drenaje (ha)	37	
Degradación específica (Mg ha <sup>-1</sup> )	35.27	

#### 4.9. Características de los suelos y de los sedimentos retenidos en la zona de estudio

Los suelos muestreados en campo (cima, lecho y talud) se analizaron para conocer las variaciones en la fertilidad, características hidráulicas y la distribución del tamaño de partículas de suelos y los sedimentos retenidos en la presa de piedra acomodada y en las barreras vivas se analizaron para ver las variaciones en las propiedades físicas y los contenidos de materia orgánica.

##### 4.9.1. Propiedades de los suelos muestreados

Los suelos de la zona de estudio han estado sometidos a un proceso de erosión hídrica acelerado, formando cárcavas y dejando expuesto el material parental; una porción del terreno muestra la presencia de los horizontes A y B en la cima de los sitios de muestreo y en el lecho y talud de la cárcava los suelos provienen del material parental. Los suelos muestran un pH ligeramente alcalino, una baja conductividad eléctrica y no existen diferencias significativas entre ubicación y sitios de muestreo. Los contenidos de materia orgánica promedio son más bajos en el lecho y en los taludes y son ligeramente mayores en la cima donde existe un poco más de actividad biológica en los suelos (Cuadro 18).

Los contenidos promedio de fósforo son bajos (1.19 Mg kg<sup>-1</sup>), los contenidos de potasio y nitrógeno son bajos (0.39 Cmol (K) kg<sup>-1</sup> y 0.02 %, respectivamente). Los suelos tienen muy baja fertilidad ya que la mayor parte de ellos no tienen vegetación tanto en las laderas de pendientes y en los taludes. Se esperaba que los suelos de la cima tuvieron mejor fertilidad,

pero solo en el sitio 1 se obtuvo un contenido de materia orgánica más alto en comparación con el resto de los sitios muestreados (Cuadro 10).

Las propiedades hidrológicas muestran que la conductividad hidráulica varía de moderadamente rápidas a muy rápidas (Wischmeier y Smith, 1978); se observó que los valores mayores corresponden con los suelos de los lechos de las cárcavas ya que dominan los sedimentos que son producto de la erosión, sin embargo, existen zonas donde el lecho de la cárcava es material parental con baja conductividad hidráulica, razón por la cual, el coeficiente de variación es muy alto (más del 59%) (Cuadro 18).

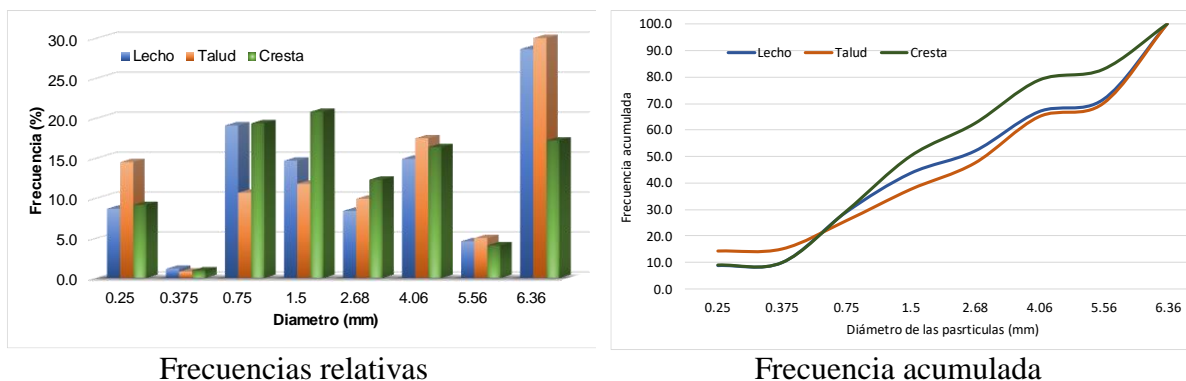
**Cuadro 18. Propiedades de los suelos del área de estudio.**

Sitio de muestreo	Ubicación	pH 1:2	M.O. %	Conductividad eléctrica (dSm <sup>-1</sup> )	Conductividad hidráulica (cm h <sup>-1</sup> )	% hg CC	% hg PMP
1	Cima	7.8	0.88	0.15	4.50	24	14
2	Cima	7.9	0.76	0.15	3.85	26	15
3	Cima	7.8	0.25	0.09	9.94	16	12
4	Cima	7.9	0.19	0.09	3.20	19	12
5	Cima	7.8	0.25	0.12	1.42	22	12
Promedio		7.9	0.47	0.12	4.58	21	13
Desviación estándar		0.04	0.33	0.03	3.21	4.02	1.54
Coeficiente de variación (%)		0.46	69.96	25.00	70.05	18.73	11.76
1	Lecho	8.0	0.13	0.11	13.61	16	11
2	Lecho	8.0	0.51	0.11	1.26	25	14
3	Lecho	7.3	0.13	0.10	5.70	17	12
4	Lecho	8.0	0.38	0.13	1.13	21	12
5	Lecho	7.9	0.13	0.10	4.29	20	14
Promedio		7.8	0.25	0.11	5.20	20	13
Desviación estándar		0.30	0.18	0.01	5.09	3.46	1.12
Coeficiente de variación (%)		3.85	70.71	11.13	97.97	17.42	8.89
1	Talud	8.0	0.13	0.12	3.54	21	12
2	Talud	8.0	0.25	0.12	2.59	23	14
3	Talud	7.8	0.51	0.09	5.95	19	14
4	Talud	7.9	0.25	0.12	1.42	20	12
5	Talud	7.9	0.13	0.14	1.77	23	13
Promedio		7.9	0.25	0.12	3.05	21	13
Desviación estándar		0.09	0.15	0.02	1.82	1.98	1.10
Coeficiente de variación (%)		1.20	61.24	15.16	59.44	9.32	8.44

Los suelos presentaron una baja capacidad de retención de agua del orden de 11.76 cm/100 cm de profundidad y no existen diferencias en los porcentajes de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente entre sitios y ubicación de los suelos muestreados (Cuadro 18).

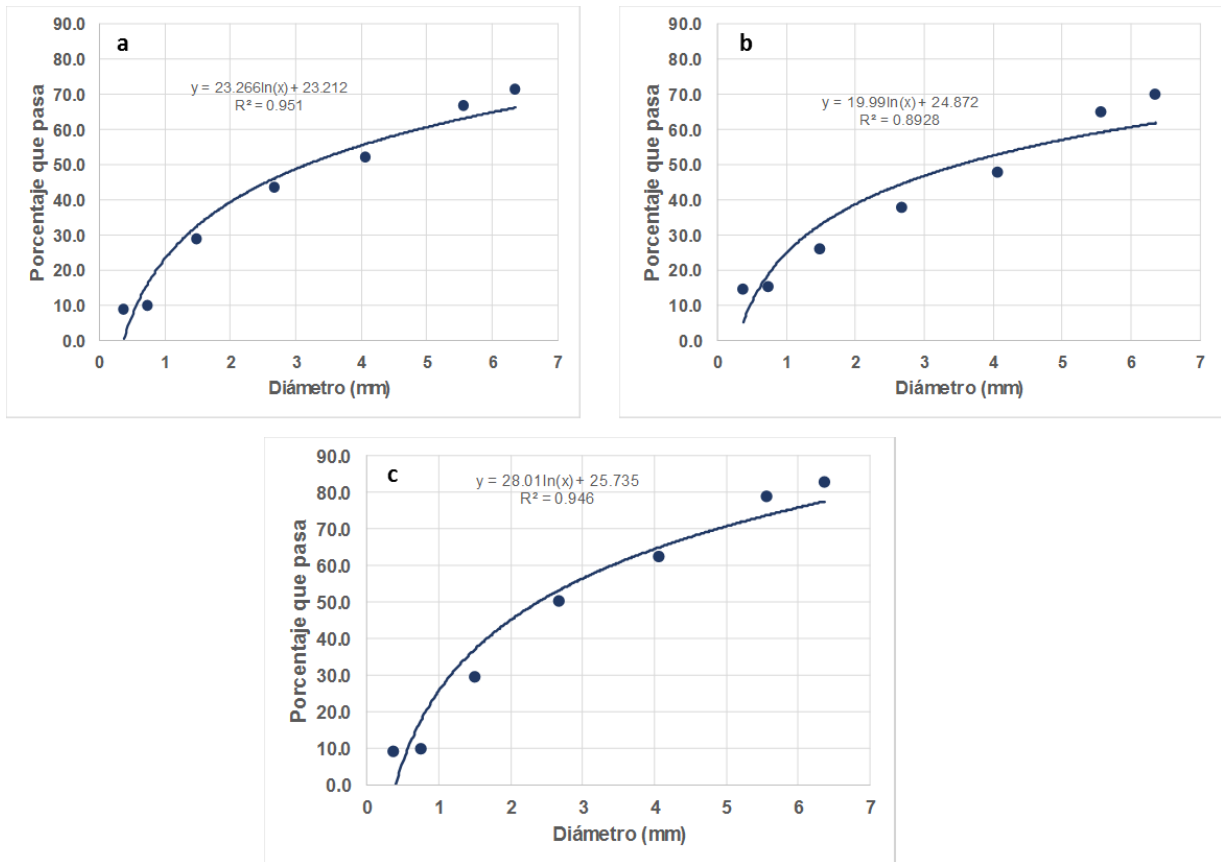
La distribución del tamaño de partículas de los suelos muestra que en el lecho dominan las fracciones mayores de 6.36 mm y de 0.75 mm con un 59%; en los taludes y cimas o cresta los suelos tienen los diferentes tamaños en diferentes proporciones como se aprecia en el histograma de frecuencia relativas y acumuladas (Figura 76). Es importante señalar que

más del 50 % de las partículas tiene un diámetro mayor de 2 mm y que no existen diferencias estadísticas en la distribución del tamaño de partículas entre el lecho y taludes de las cárcavas y si se aprecia un ligero cambio en el tamaño de partículas de las muestras de suelo tomadas en la cima o cresta.



**Figura 76. Frecuencias relativas y acumuladas de la distribución del tamaño de partículas.**

Las curvas granulométricas de los suelos de los diferentes sitios de muestreo se ajustan a un modelo logarítmico y muestran los diámetros de las partículas asociados con los porcentajes (Figura 77). Los suelos de la cima tienen una distribución de tamaños de partículas en toda la escala que se considera bien gradado; en contraste, los suelos del lecho (propriadamente sedimentos) y de los taludes muestran una cantidad apreciable de granos de mayor tamaño que dejan espacios para el llenado por otros de menor tamaño, y los espacios entre estos son ocupados a su vez por partículas más pequeñas. En el lecho de las cárcavas las partículas más finas que son acarreadas en suspensión con los escurrimientos pueden depositarse y modificar la distribución de tamaños de partículas, situación que no sucede en los taludes ya que estos están sujetos movimiento en bloques hacia el lecho de la cárcava y posteriormente son removidos y transportados por los escurrimientos.



**Figura 77. Curvas granulométricas de los suelos de diferentes sitios (a) lecho; b) Talud y c) Cima).**

Las características de las partículas del suelo muestran que en el lecho y en los taludes se tienen los mayores diámetros medios ponderados, geométricos, la moda y la mediana con mayor variabilidad como lo explican la desviación estándar, el coeficiente de asimetría y el curtosis en comparación con los mencionados para los suelos de la cima (Cuadro 19).

**Cuadro 19. Características de la distribución del tamaño de las partículas de los suelos.**

<b>Característica</b>	<b>Lecho</b>	<b>Talud</b>	<b>Cima</b>
Diámetro medio ponderado	3.29	3.45	2.79
Diámetro medio geométrico	2.17	2.21	1.88
Moda	3.10	3.33	2.36
Mediana	5.44	6.42	3.52
Desviación estándar	5.81	7.32	3.24
Coeficiente de asimetría	172.69	295.12	45.70
Curtosis	58.58	90.93	18.94
D <sub>50</sub>	3.10	3.33	2.36
D <sub>16</sub>	0.77	0.73	0.75
D <sub>84</sub>	12.46	15.21	7.46

El esfuerzo cortante crítico de los suelos expresa la susceptibilidad de que la partícula más expuesta pueda ser removida y transportada por el flujo superficial en laderas, canales o cárcavas (Foster y Meyer, 1975). La capacidad de remoción y transporte de las partículas del suelo existe, cuando el esfuerzo cortante actual<sup>6</sup> es mayor que el esfuerzo cortante crítico.

El esfuerzo cortante crítico para las muestras obtenidas de los taludes, lecho y cresta en las cárcavas de Tiltepec muestra valores más altos para los taludes de las cárcavas ( $0.94 \text{ N m}^{-2}$ ), que es donde propiamente se tiene el material parental consolidado y la fuerza necesaria para su desprendimiento es mayor, debido a la exposición y escaso efecto de procesos pedogenéticos. Sin embargo, como se observó durante las visitas de campo, el contenido de humedad ejerce un efecto importante en la disgregación de estos materiales; a medida que se humedecen disminuye la consolidación de los materiales y son más susceptibles de desprendimiento y depósito en lecho de la cárcava. En el lecho se encontraron los valores más bajos ( $0.74 \text{ N m}^{-2}$ ), que corresponden a materiales sueltos sin cohesión fácilmente erodibles; en las cimas de las cárcavas, se requieren esfuerzos superiores a los  $0.92 \text{ N m}^{-2}$ , para iniciar el desprendimiento de las partículas. En esta parte de la cárcava, a pesar de que el material sobreyace a material parental consolidado, el contenido de materia orgánica es el más alto de los tres sitios, lo que puede evidenciar cierto grado de agregación entre las partículas del suelo y en consecuencia mayor cohesión y resistencia a los procesos erosivos. Estos valores son semejantes a los reportados por Berenbrock y Tranmer (2008), para sedimentos no consolidados del tamaño de arenas muy finas.

La susceptibilidad de los suelos a la erosión estimada con el método de Wischmeier y Smith (1978), muestra que los suelos de la cima, lecho y talud tienen una susceptibilidad media a la remoción y transporte por lluvia y escurrimientos de 0.021, 0.028 y 0.032 respectivamente (Cuadro 12).

El proceso de erosión en la cima de las cárcavas, es función de la resistencia del suelo a ser removido o transportado por la lluvia y el escurrimiento como ha sido definido por Meyer y Wischmeier (1969) y, en este caso, el factor de erosionabilidad si se aplica. En el lecho dominan el proceso de erosión por escurrimiento que es definido como una función de los esfuerzos cortantes actual y crítico y de la resistencia del suelo a la remoción y transporte por el escurrimiento como ha sido señalado por Nearing *et al.* (1989). En los taludes de las cárcavas el proceso de erosión se debe considerar como un movimiento en masa producto de los procesos de mojado y secado como ha sido definido por Alcántara (2000).

---

<sup>6</sup> Esfuerzo cortante actual  $\tau = \gamma h s$  donde:  $\tau$  es el esfuerzo cortante actual,  $h$  es el tirante y  $S$  es la pendiente del terreno, surco o cárcava (Nearing *et al.* 1989).



Los modelos de predicción de la erosión laminar en zonas de cárcavas, deberán considerar los procesos de remoción y transporte de partículas del suelo por lluvia y escurrimiento, la erosión en surcos y cárcavas deberá ser estimadas como la capacidad del flujo superficial para remover y transportar las partículas del suelo y el movimiento en masa o el desprendimiento de tierra, hundimiento o flujo de tierra como ha sido referido por Sidorchuk (1999); Bull y Kirkby (2002) y Gómez *et al.* (2011).

La erosionabilidad (factor K) de los suelos de la cima, taludes y lecho se estimó en este estudio con base en el tamaño de partículas, el contenido de materia orgánica y los códigos de estructura y permeabilidad, encontrando que la erosionabilidad de los suelos (K) varía de 0.0003 hasta 0.048 con un valor promedio de 0.27 (Cuadro 20).

**Cuadro 20. Erosionabilidad de los suelos en el lecho, talud y cima de la zona de estudio.**

Sitio	Suelo	Arenas finas	Limo	Arcillas	M	M. Orgánica	Permeabilidad	Permeabilidad	Estructura	K
		(0.1-0.002 mm)				%	mm/ hr	Código		
1	Lecho	12.2	14.95	12.0	2,389.39	0.13	136.1	1	2	0.017
	Talud	18.9	44.28	30.0	4,423.80	0.13	35.4	2	3	0.048
	Cima	6.1	45.84	34.0	3,426.46	0.88	45.0	2	2	0.030
2	Lecho	10.8	36.01	20.0	3,744.78	0.51	12.6	3	2	0.038
	Talud	9.3	25.39	12.0	3,052.58	0.25	25.9	2	3	0.031
	Cima	9.5	39.25	44.0	2,730.10	0.76	38.5	2	2	0.022
3	Lecho	9.9	21.58	20.0	2,515.87	0.13	57.0	2	2	0.021
	Talud	4.2	11.13	14.0	1,319.77	0.51	59.5	2	3	0.012
	Cima	3.9	6.00	16.7	828.65	0.25	99.4	1	2	0.0003
4	Lecho	10.2	33.17	16.0	3,644.66	0.38	11.3	3	2	0.037
	Talud	10.5	14.52	10.0	2,253.65	0.25	14.2	3	3	0.026
	Cima	9.5	14.36	12.0	2,099.50	0.19	32.0	2	2	0.017
5	Lecho	9.9	25.31	18.0	2,889.32	0.13	42.9	2	2	0.026
	Talud	12.9	37.18	24.0	3,809.04	0.13	17.7	3	3	0.044
	Cima	9.6	39.46	26.0	3,627.64	0.25	14.2	3	2	0.037
Promedio										0.027

Los valores de K promedio fueron 0.021, 0.028 y 0.032 para los suelos de la cima, lecho y talud, respectivamente lo que indica que los suelos de los taludes de las cárcavas, en promedio, son más susceptibles a la erosión que los del lecho y cima por los contenidos de materia orgánica y tamaños de partículas como ya se había señalado con anterioridad. Al realizar la comparación de medias con la prueba de Tukey con una  $\alpha = 0.05$ , se encontró que no había diferencias estadísticas ya que la  $P_r > F$  es de 0.425 que es mayor que el valor de 0.05.

#### 4.9.2. Propiedades de los sedimentos retenidos en las obras de control de azolves

Las propiedades hidrológicas de los sedimentos retenidos en la presa y en las barreras vivas fueron comparados con los suelos aledaños a cada sitio y se encontró que existe una similitud en sus propiedades dado que los suelos no tenían vegetación (suelos desnudos) y

son los que por el proceso de remoción y transporte de la lluvia y el escurrimiento se convierten en los sedimentos que se captaron en la presa y las barreras vivas (Cuadro 21).

**Cuadro 21. Características de los sedimentos y suelos cercanos a la presa y barreras.**

Obra	Muestra	% Arcilla	% Arenas	% Limos	Clase Textural	Dap (Mg m <sup>-3</sup> )	CC (%)	PMP (%)	K (mm h <sup>-1</sup> )	N %	M.O %
Presa	Sedimentos	16	53	31	Migajon Arenoso	1.35	20.00	16.00	16.68	0.033	0.654
B1	Sedimentos	26	22	52	Migajon Limoso	1.39	23.00	18.00	17.75	0.023	0.654
B2	Sedimentos	22	30	48	Migajon	1.33	23.00	19.00	14.14	0.039	0.050
B3	Sedimentos	16	41	43	Migajon	1.35	21.00	17.00	12.50	0.039	0.785
B5	Sedimentos	50	13	37	Arcillo Limoso	1.20	33.00	24.00	5.06	0.037	0.080
B6	Sedimentos	20	44	36	Migajon	1.26	22.00	18.00	14.30	0.029	0.654
B7	Sedimentos	16	44	40	Migajon	1.42	21.00	17.00	29.37	0.046	0.150
B8	Sedimentos	20	42	38	Migajon	1.27	23.00	18.00	24.80	0.040	0.654
Presa	Suelo	26	22	52	Migajon Limoso	1.34	24.00	18.00	17.75	0.056	0.654
B1	Suelo	16	43	41	Migajon	1.27	21.00	17.00	17.75	0.043	0.654
B2	Suelo	34	8	58	Migajon Arcillo Limoso	1.19	31.00	24.00	2.59	0.029	0.654
B3	Suelo	28	43	29	Migajon	1.28	31.00	26.00	9.50	0.099	1.177
B5	Suelo	58	6	36	Arcilla	1.27	30.00	23.00	5.06	0.057	1.308
B6	Suelo	24	20	56	Migajon Limoso	1.19	22.00	18.00	3.82	0.030	0.785
B7	Suelo	30	25	45	Migajon Arcilloso	1.21	25.00	19.00	3.74	0.085	0.654
B8	Suelo	38	7	55	Migajon Arcillo Limoso	1.27	30.00	21.00	1.69	0.023	1.308

Es importante señalar que las propiedades de los suelos son muy semejante, ya que se trata de partículas de suelos que han sido removidas y transportadas por el escurrimiento y que los removidos provienen del material parental intemperizado, situación que se refleja por la presencia de partículas de tamaños mayores de 2 mm en más del 50% como se había mencionado antes.

Para determinar si existen diferencias estadísticas significativas entre las propiedades hidrológicas, físicas y de fertilidad de los suelos se realizó un análisis de varianza y se encontró que no existían diferencias entre los porcentajes de arcillas, arenas, limos, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, así como en el contenido de nitrógeno total y, en contraste, si hubo diferencias estadísticas significativas ( $\alpha=0.05$ ) para las variables de densidad aparente, conductividad hidráulica y contenido de materia orgánica de los sedimentos y los suelos aledaños a cada obra de retención de azolves (Cuadro 22).

Los contenidos de materia orgánica en los suelos son mayores por la existencia de vegetación y la actividad biológica que genera, en comparación con los sedimentos, ya que estos son una mezcla de los materiales acarreados por el escurrimiento que provienen de las laderas, taludes y del propio lecho, lo cual coincide con la información referida por Santiago (2016). La densidad aparente y la conductividad hidráulica son mayores en los sedimentos por el tamaño de las partículas de los sedimentos en comparación con los suelos como ha sido mencionado por Saxton y Rawls (2009).

**Cuadro 22. Comparación de medias entre las propiedades de los sedimentos y los suelos.**

Propiedad	Sedimentos		Suelo		F-Valor	Pr > F	DMS
	Media	Desv Estándar	Media	Desv Estándar			
Arcilla %	23.25	11.36	31.75	12.487	2.03	0.176	12.802
Arena %	36.12	13.30	21.75	14.983	4.12	0.062	15.194
Limo %	40.62	6.80	46.5	10.515	1.76	0.206	9.497
Densidad Aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	1.32 A	0.073	1.25 B	0.052	4.71	0.048	0.068
Capacidad de campo (%)	23.25	4.09	26.75	4.2	2.85	0.114	4.449
Punto de marchitez permanente (%)	18.37	2.44	20.75	5.05	3.284	0.123	3.105
Conductividad Hidráulica (mm h <sup>-1</sup> )	16.82 A	7.49	7.74 B	6.603	6.63	0.022	7.571
Nitrógeno (%)	0.036	0.009	0.053	0.029	2.87	0.112	0.022
Materia orgánica (%)	0.460 B	0.307	0.899 A	0.311	8.12	0.013	0.331

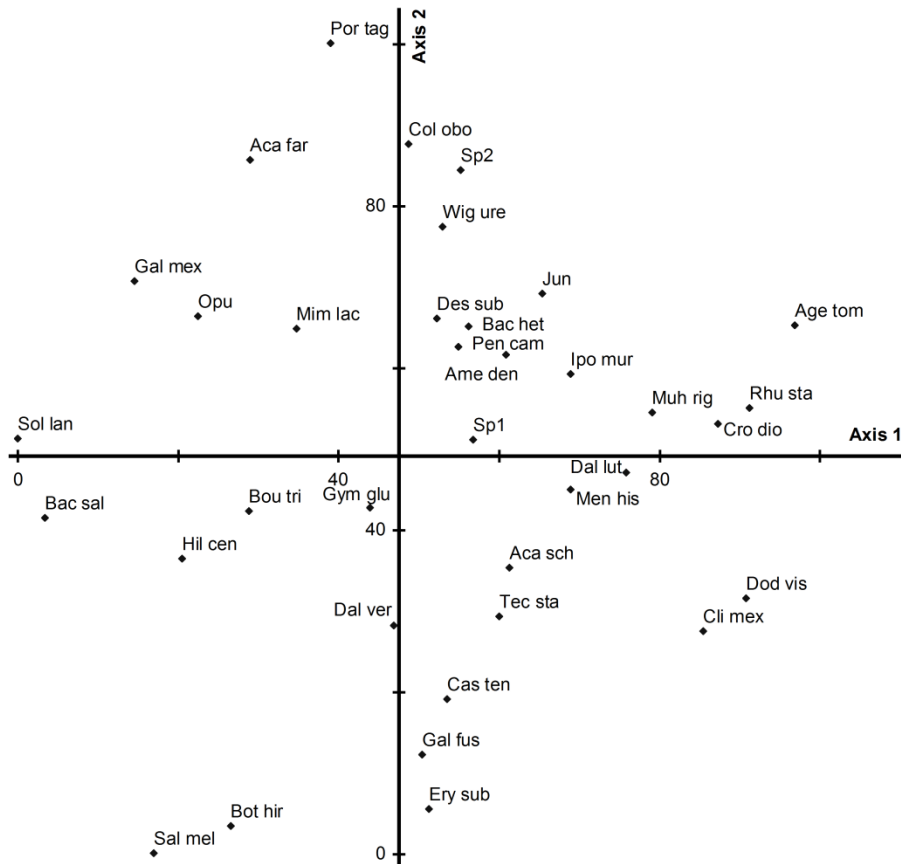
#### 4.10. Línea base de vegetación

El inventario florístico de las cárcavas se aprecia en el Apéndice B. Fueron 6 especies del período seco, 13 del período lluvioso y 23 que se presentaron en ambos periodos. Las especies más comunes pertenecen a las familias *Asteraceae*, *Poaceae* y *Fabaceae*.

Del análisis de correspondencia, se puede observar una clara diferenciación de las especies que crecen en los taludes de las que se desarrollan en las cimas de las cárcavas. En el lecho de las cárcavas, difícilmente se desarrolla la vegetación y únicamente en el sitio 5 (S5) hubo registro de especies. En el primer eje, se observa una tendencia a diferenciar entre las especies encontradas en el talud y las registradas en la cima de las cárcavas (Figura 78 y 79).

El extremo derecho del eje 1, advierte un grupo claramente diferenciado y constituido por los sitios: S6 CD, S4 TI, S4 CI y S7 CD (Figura 78 y 79). En este grupo, *Croton dioicus*, *Rhus standleyi*, *Dodonaea viscosa* y *Clinopodium mexicanum* son las especies en común y destacan porque presentan mayores valores de cobertura.

En correspondencia con la diferenciación propuesta entre la cima, el talud y el lecho de las cárcavas, en la parte central del eje 1, se concentran cuatro sitios en donde se muestreó el talud: S1, S3, S4 y S6. En estos sitios, las especies que dominan son *Wigandia urens*, *Desmodium subsessile*, *Baccharis heterophylla*, *Penstemon campanulatus* y *Amelanchier denticulata*.

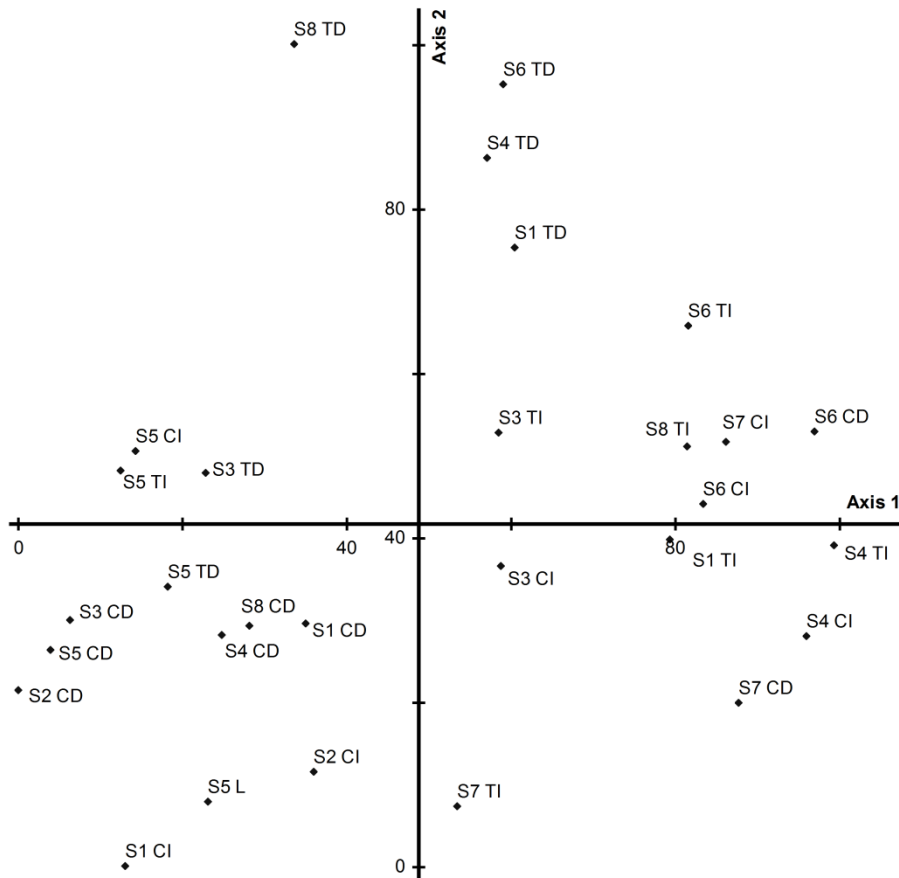


**Figura 78. Diagrama de ordenación del DCA.**

Ver acrónimos para relacionar las especies en el Apéndice B.

Las especies que por su atributo de cobertura destacan en un cuarto grupo (Cimas de los sitios 2, 3 y 5) son: *Galium mexicanum* y *Baccharis salicifolia*.

Finalmente, en el espacio de ordenación que corresponde a la parte negativa del eje 1 y 2, también se observa un grupo, que en su mayoría corresponden con la posición de la cima (S1, S2, S4 y S5) y que se asocian, aunque con menor cercanía, como los grupos observados anteriormente. Las especies que abundan en esta posición de la cárcava son: *Hilaria cenchroides*, *Bothriochloa hirtifolia* y *Salvia melissodora*. En el caso particular del S5, el lecho, el talud y la cima derecha guardan cierta semejanza y se aglomeran en este grupo.



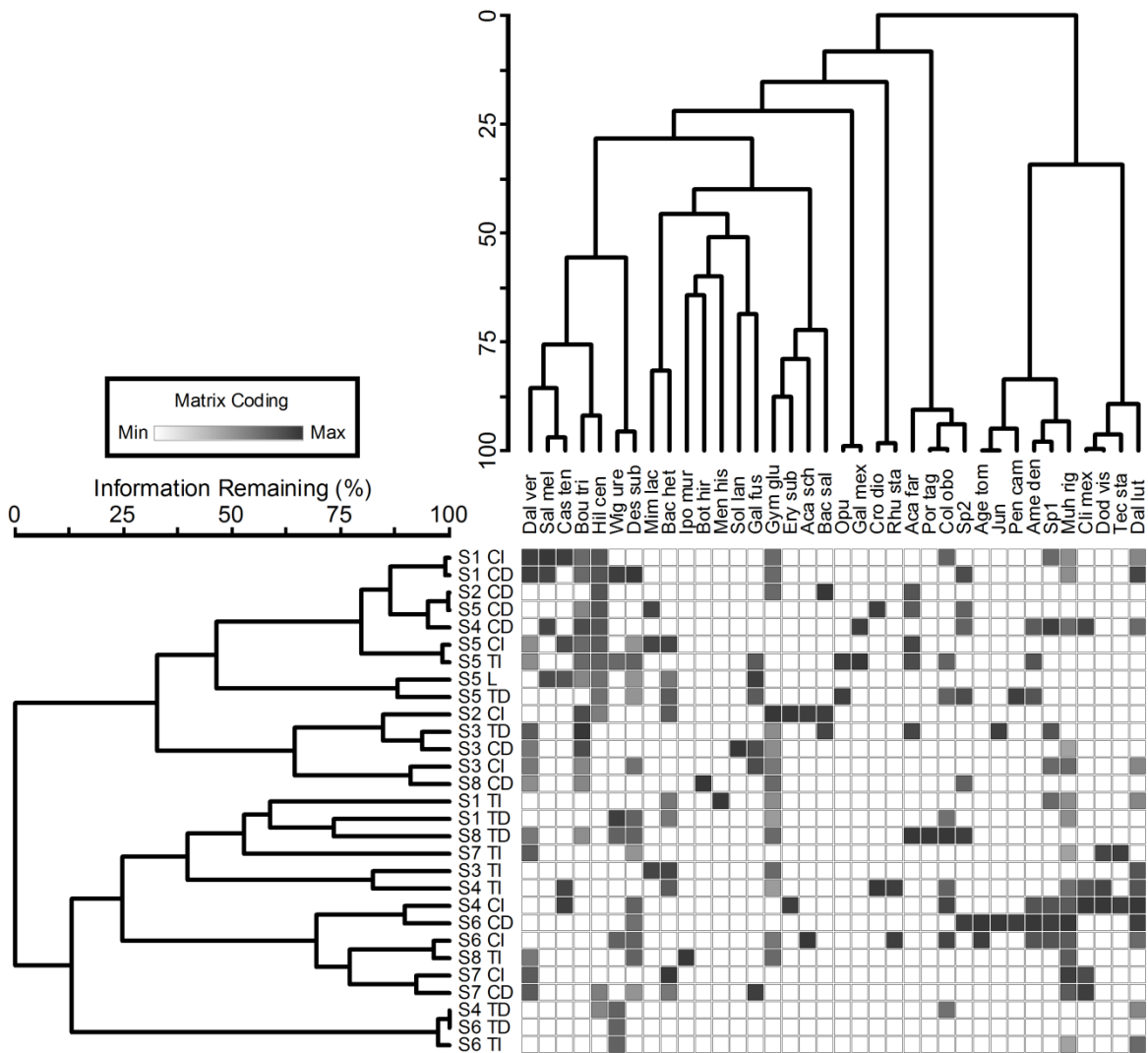
**Figura 79. Diagrama de ordenación del DCA.**

La clave de los sitios de muestreo es: Cima Derecha (CD), Talud Derecho (TD), Lecho (L), Talud Izquierdo (TI) y Cima Izquierda (CI) y van del sitio 1 al 8 (S1 a S8).

El dendrograma (Figura 80), mostró en un primer grupo ubicado en el extremo superior izquierdo y definido en base al atributo de cobertura, la cima de las cárcavas se encuentra dominada por dos gramíneas (*Bouteloua triaena* e *Hilaria cenchroides*), con buen potencial para la retención de suelo por su alta cobertura, su sistema de raíces extendido, la posibilidad de propagarse y su hábito de crecimiento. En el estrato arbustivo, *Dalea versicolor* y *Salvia melissodora* presentan mayores valores de cobertura.

Otro grupo destacado, es el conformado por los sitios 1, 3, 4, 7 y 8 en la posición del talud. Las especies *Gymnosperma glutinosum*, *Desmodium subsessile*, *Baccharis heterophylla*, *Muhlenbergia rigida* y *Dalea lutea* presentan mayor cobertura.

Un tercer grupo identificado en el extremo inferior derecho (S4, S6, S7 y S8), en la posición de la cima *Amelanchier denticulata*, *Muhlenbergia rigida* y *Clinopodium mexicanum*, presentan mayor valor de cobertura.

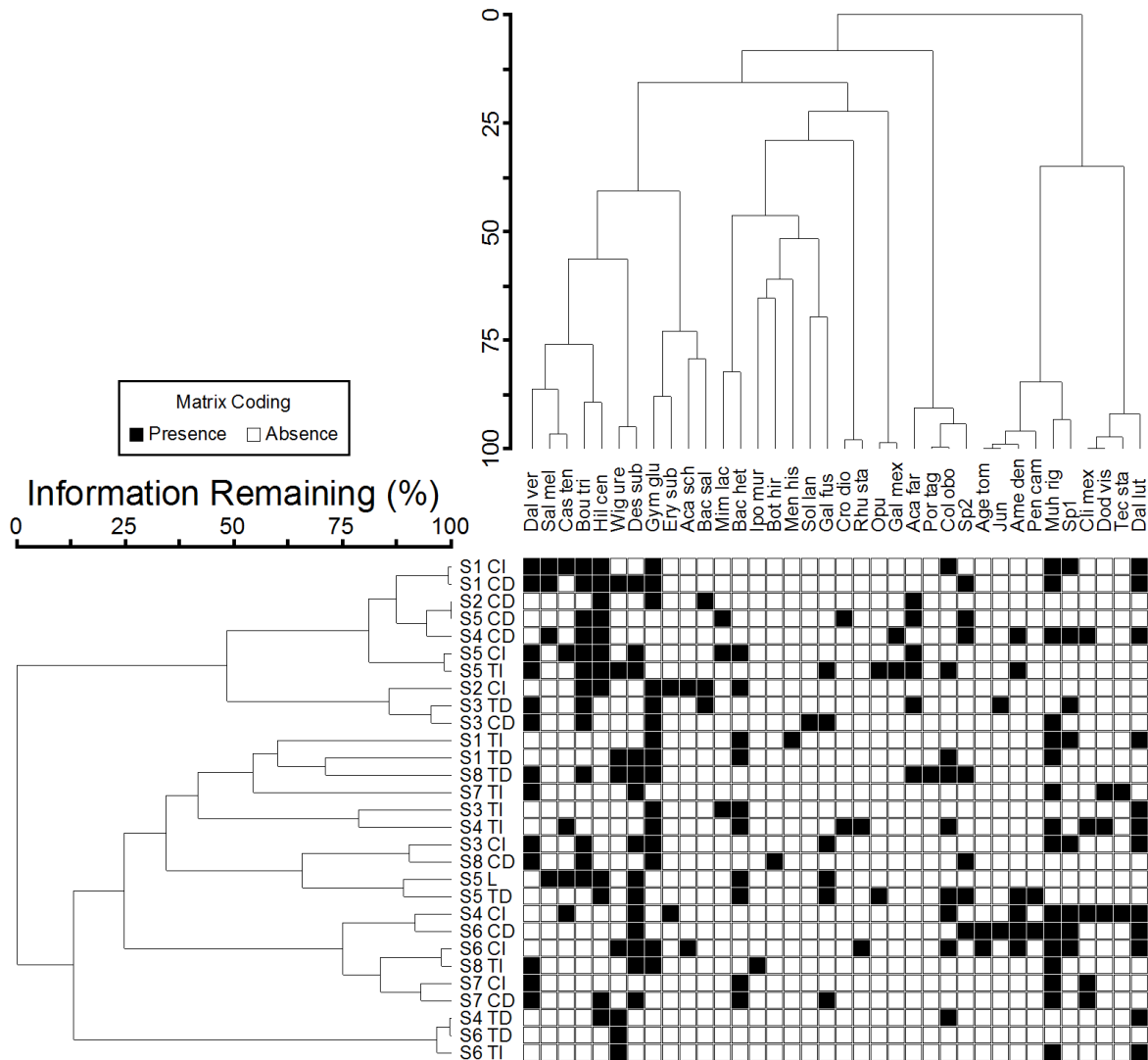


**Figura 80. Dendrograma por cobertura.**

Del análisis del dendrograma definido con base en la presencia o ausencia de especies (Figura 81), *Gymnosperma glutinosum*, *Desmodium subsessile* y *Muhlenbergia rigida* fueron especies ubicuas, localizadas en la mayoría de las unidades de muestreo, lo que indica su adaptación a las condiciones adversas del área de estudio y su potencial para recuperar zonas de cárcavas.

En este mismo dendrograma, destaca que la posición del lecho (S5 L), se asocia con el talud del mismo sitio, compartiendo especies como: *Hilaria cenchroides*, *Desmodium subsessile*, *Baccharis heterophylla* y *Galium fuscum*.





**Figura 81. Dendrograma por presencia-ausencia.**

De los resultados obtenidos tanto en el análisis de ordenación como en el de clasificación, destaca que por el atributo de cobertura, la posición en la sección transversal de las cárcavas determina la composición y la abundancia de las especies que se desarrollan ahí; lo que podría asociarse a que la acción erosiva del flujo superficial actúa de manera distinta en la cima, en el talud y en el lecho. Por ejemplo, la razón de que solo se tenga registro de un sitio con vegetación en el lecho, se explica porque el escurrimiento sin control tiene una alta capacidad de remoción y transporte de partículas de suelo que no permite la retención ni de humedad ni de suelo y no favorece las condiciones para el establecimiento de la vegetación. Burylo *et al.* (2007), establecen claramente que al controlar el escurrimiento y crear depósitos de sedimentos con prácticas de bioingeniería, la colonización con especies nativas se presenta y que las especies que crecen en los taludes juegan un papel

fundamental; a futuro, las especies que se logran establecer mejoran la protección del suelo contra la erosión.

En particular, en la posición de la cima, se destacan dos grandes grupos, uno que corresponde a los sitios 4, 6 y 7 y un segundo grupo compuesto por los sitios 2, 3, 5 y 8. En el primer grupo, los sitios 4 y 6 se ubican sobre la cárcava principal del sistema lo que sugiere semejanza entre las condiciones; además de que los tres sitios se encuentran más alejados de la presa de piedra acomodada; en cambio, los sitios del segundo grupo guardan más cercanía con la presa y se ubican sobre los ramales aledaños de la cárcava principal, lo que sugiere menor impacto del escurrimiento superficial.

La vegetación que crece en los taludes, se diferencié claramente en el grupo conformado por los sitios 1, 3, 4, 7 y 8, en donde la posición en la cárcava define la presencia y abundancia de las especies que ahí se desarrollan.

El área de aporte de escurrimientos, también es un factor que influye en el establecimiento de las especies en las cárcavas porque la erosividad del flujo superficial confiere al terreno condiciones distintas para el desarrollo de la vegetación. Esto se observa claramente en los datos de la barrera viva 6 y 7, en donde se esperaría una estrecha semejanza en su composición florística dada la proximidad entre los sitios de muestreos. Sin embargo, no fue así y al comparar la superficie que drena en cada barrera, 17.15 ha (barrera 6) y 1.91 ha (barrera 7), podemos entender la razón de esta diferenciación.

Después de analizar la respuesta de la vegetación en las diferentes secciones de las cárcavas, es posible abordar el potencial de las especies encontradas para estabilizar áreas degradadas. De Baets *et al.* (2009), hacen mención de que la eficacia de las plantas para el control de la erosión depende de su arquitectura y de sus propiedades mecánicas pero destacan en mayor medida, el potencial de cada una de las especies estudiadas para estabilizar taludes y para resistir el flujo concentrado, lo que finalmente nos habla de su posición en las cárcavas. En este estudio, con base en el atributo de cobertura, observamos especies con potencial para estabilizar zonas de cárcavas, lo que se refleja en su capacidad para establecerse con predominio en las diferentes posiciones.

Aunque la zona de estudio, a nivel general, se caracteriza por ser un ambiente muy perturbado, la cima de las cárcavas, es la posición que ofrece mayor estabilidad para el crecimiento de la vegetación y al diferenciar la estructura vertical de la vegetación que aquí se desarrolla, encontramos que en el estrato herbáceo, *Bouteloua triaena* e *Hilaria cenchroides* destacan con mayores valores de cobertura y la facultad para propagarse. En el estrato medio, especies como *Dalea versicolor*, *Dalea lutea* y *Dodonaea viscosa*, presentan mayor cobertura y tiene la facultad de establecerse en suelos pobres, en condiciones de sequía y con tolerancia al fuego. En particular, *Dodonaea viscosa* es recomendada como

una especie eficaz en el control de cárcavas por su sistema radical extendido (Duvauchelle, 2009). Y en el estrato arbóreo, *Acacia schaffneri* presenta buen desarrollo y se destaca por presentar raíces profundas que le permiten prosperar en condiciones de sequía (Apéndice C).

Las condiciones poco favorables del talud para el crecimiento de la vegetación, sobresalen por su cobertura las especies: *Wigandia urens*, *Baccharis heterophylla*, *Desmodium subsessile*, *Muhlenbergia rigida* y *Gymnosperma glutinosum*. Estas especies presentan importantes atributos botánicos como amplia cobertura, persistencia del follaje y tolerancia a suelos con baja fertilidad. En particular, el sistema de raíces extendidas de las dos últimas especies enlistadas, reviste de gran importancia ya que como se ha mencionado en trabajos como el realizado por Reubens *et al.* (2007), la arquitectura de los sistemas radicales se asocia a su potencial para dar estabilidad a la pendiente y al control de la erosión del suelo. En relación a *Wigandia urens*, la abundancia del follaje de esta especie, se ajusta a las conclusiones obtenidas por Burylo *et al.* (2012) en relación a que especies de hoja ancha resultan más eficientes para retener sedimentos. Por otro lado, como se ha mencionado con anterioridad, *Baccharis heterophylla* ha sido ya implementada en prácticas de control de cárcavas en la zona de estudio por un productor.

Finalmente en el lecho, *Castilleja tenuiflora*, *Salvia melissodora* y *Galium fuscum* sobresalen por crecer precisamente en la posición del lecho, lo que sugiere resistencia al flujo concentrado al establecerse en esa posición.

Especies que no destacaron por su atributo de cobertura en el análisis o que se solo se registraron en periodo seco, se mencionan en la composición florística de ecosistemas como el bosque, el palmar o el matorral, lo que nos habla de que puede tratarse de especies climáticas que al pasar del tiempo, de alcanzarse una condición más estable, irán remplazando a las especies pioneras que en la condición actual de degradación dominan. *Acacia schaffneri*, *Amelanchier denticulata*, *Cercocarpus fothergilloides*, *Dodonaea viscosa*, *Baccharis heterophylla*, *Mimosa lacerata*, *Rhus standleyi* y *Penstemon campanulatus*, forman parte del Bosque templado mediano de linearifolios; *Amelanchier denticulata*, *Gymnosperma glutinosa*, *Tecoma stans*, *Solanum lanceolatum*, se referencian al ecosistema de Bosque tropical bajo palmatifoliado; y *Amelanchier denticulata*, *Mimosa lacerata*, *Salvia melissodora*, *Tecoma stans*, *Castilleja tenuifolia* y *Mentzelia hispida* pertenecen al Bosque bajo crasicuale espinoso (Guizar, 2011 ).

## **5. CONCLUSIONES**

Los parámetros morfométricos de la micro-cuenca, mostraron la alta densidad de drenaje que se presenta en la zona, lo que demuestra una gran capacidad del flujo para transportar los sedimentos

La presa de piedra acomodada asociada a las barreras vivas, resultaron ser eficientes para la retención de sedimentos y permitieron estimar la degradación específica de las zonas con cárcavas.

Los suelos de la zona degradada bajo estudio, son de baja calidad productiva, dado que prevalece el material parental y, los sedimentos que se producen, tienen condiciones similares a los suelos identificados en el lecho, en los taludes y en las cimas.

Las barreras vivas fueron eficientes para retener sedimentos en áreas de drenaje pequeñas y demandan de mantenimiento continuo en los eventos de gran magnitud. Para cuencas de tamaño mayor no son recomendables ya que los escurrimientos máximos instantáneos provocan su destrucción

La asociación de estructuras permanentes en cárcavas grandes y de estructuras temporales en cárcavas medianas y pequeñas, resultaron ser un buen sistema para el control de erosión en cárcavas y favorecer su estabilización a bajo costo.

El uso de prácticas de bioingeniería propicia el desarrollo de la vegetación por la acumulación de azolves, la disminución de la velocidad del flujo, conservación de la humedad y estabilización de taludes y lecho.

El trabajo permitió establecer una línea base de la vegetación que crece en las cárcavas considerando su ubicación, composición, abundancia y atributos botánicos.

El sistema de bioingeniería demanda de un programa de mantenimiento continuo y construcción secuencia de las obras de infraestructura permanentes y temporales aguas arriba de las existentes a fin de reducir la velocidad y capacidad de transporte de los flujos superficiales.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

Agassi, M. 1996. Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. Marcel Dekker. New York. 410 p.

Alcántara, I. 2000. Landslide: ¿Deslizamientos o Movimientos del terreno? Definición, Clasificaciones y Terminología. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 41.

Antón, C, y J, A Martínez-Casasnovas (2001). Cartografía de la erosión por barrancos mediante restitución fotogramétrica y modelos digitales de elevación en el Pendés (Cataluña). Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Climático. 229-232 pp.

Banco Mundial. 1995. Vetiver: La barrera contra la erosión. 3ra ed. en español. Washington, D.C. 53 p.

Belay, Mehretie y Woldeamlak Bewket. 2012. Assessment of gully erosion and practices for its control in northwestern highlands of Ethiopia. International Journal of Environmental Studies Vol. 69, No. 5: 714–728.

Berenbrock, C. y A.W. Tranmer. 2008. Simulation of flow, sediment transport, and sediment mobility of the lower Coeur d'Alene River, Idaho. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008–5093.

Blanco H. y R. Lal. 2010. Principles of Soil Conservation and Management. Springer. New York.

Bolaños González, M. A., F. Paz Pellat, C. O. Cruz Gaistardo, J. A. Argumedo Espinoza, V. M. Romero Benítez y J. C. de la Cruz Cabrera. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Terra Latinoamericana 34: 271-288.

Braun-Blanquet, J. 1979. Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. Blume, Madrid.

Brito F., I. del C. 2005. Zompante o colorín (*Erythrina americana* Miller). Tlahui-Medic. No. 20 Vol. 2

Bull, L. J., y M. J. Kirkby (Eds.). 2002. Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels. John Wiley, Chichester, England. 398 pp.

Burylo, M., F. Rey y P. Delcros. 2007. Abiotic and biotic factors influencing the early stages of vegetation colonization in restored marly gullies (Southern Alps, France). Ecological engineering 30: 231–239.

Burylo, M., F. Rey, E. Bochet, T. Dutoit. 2012. Plant functional traits and species ability for sediment retention during concentrated flow erosion. Plant Soil 353:35–144.

Carey, B. 2006. Gully erosion. Department of Natural Resources and Water, Queensland Government. Fact Sheets: Land Series, Rep. L81. Disponible en línea <http://www.nrw.qld.gov.au/factsheets/pdf/land/181.pdf>).

Chaplot, V. 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. Geomorphology, 186: 1-11.

COITAPAC, (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas y Peritos Agrícolas de Cataluña). 1998. Restauración del paisaje. Obras de bioingeniería. Técnicas de estabilización de taludes. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo 12S (Parte 2):1-43.

Colegio de Posgraduados (COLPOS). 1991. Manual de conservación de suelos y del agua. M. Anaya G., M. R. Martínez M., A. Trueba C., B. Figueroa S. y O. Fernández M. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 248p.

Colegio de Posgraduados (COLPOS). 2009. Prácticas Vegetativas y Agronómicas Complementarias al proyecto integral. Disponible en línea (<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Julio/Documents/Prácticas%20vegetativas%20y%20agronomicas.pdf>) Consultado el 16 de enero de 2014.

Comisión Nacional Forestal. 2007. Manual de Obras y Prácticas: Protección, restauración y conservación de suelos forestales 3ra, edición. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>. Consultado el 4 de enero de 2014.

CONABIO. 2012. Fichas de especie Arundo donax. Sistema de información sobre especies invasoras en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Cruz C., E. 1992. Los agostaderos comunales de Tiltepec, un caso típico del deterioro ambiental de la Mixteca Alta Oaxaqueña. Maestría en Ciencias Esp. en Botánica. Colegio de Postgraduados.

Das, G. 2009. Hydrology and Soil Conservation Engineering: Including Watershed Management. PHI Learning Privated Limited. New Delhi. 539 p.

De Baets, S., J. Poesen, B. Reubens, B. Muys, J. De Baerdemaeker y J. Meersmans. 2009. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: application to a Mediterranean ecosystem. *Earth Surf Process Landforms* 34:1374–1392.

Deltoro T., V., J. Jiménez R. y X. M. Vilán F. 2012. Bases para el manejo y control de Arundo donax L. (caña común). Col. Manuales Técnicos de Biodiversidad, 4. Generalitat Valenciana. Valencia. España.

Desta, L. y B. Adugna. 2012. A Field Guide on Gully Prevention and Control. Nile Basin Initiative. Ethiopia.

Dhital, Y.P, R B. Kayastha y J. Shi. 2013. Soil Bioengineering Application and Practices in Nepal. *Environmental Management* 51:354–364.



Duvauchelle, D. 2009. Plant fact sheet for hop bush (*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq. Published November, 2009). USDA-Natural Resources Conservation Service, Hawaii Plant Materials Center, Hoolehua.

Edouard, F., J. Jiménez y M. Cid. 2004. Restauración de áreas invadidas por copetate en la región Chinantla, Oaxaca, México. Centro de Investigación e Información sobre Agricultura Sostenible de bajos Insumos, Lima (Perú).

Environment Canterbury. 2001. Tunnel gully erosion control. InfoSheet 7, Resource care guide.

Fan, J., B. Tian, y D. Yan. 2008. Cause analysis of gully erosion in Yuanmou basin of Jinshajiang valley. Wuhan University Journal of Natural Sciences Vol. 13 No.3: 343-349.

Fay, L., M. Akin y X. Shi. 2012. Cost-effective and sustainable road slope stabilization and erosion control (Vol. 430). National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Synthesis 430. Washington D. C.

Flanagan, D.C. y M. A. Nearing, 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.

Flores-López H.E, H. Ramírez-Vega, K.F. Byerly-Murphy, J.A. Ruiz-Corral, J.A. Martínez-Sifuentes, P. Díaz-Mederos y V. Alemán-Martínez (2003). Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca de Jihuite, México. TERRA, Volumen, 21, No. 3.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1986. Watershed management field manual - Gully control. Roma, Italia.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1994. Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. FAO. Roma, Italia.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO, 8. Roma, Italia.

Foster, G.R. D.C. Flanagan, M.A. Nearing, L.J. Lane, L.M. Risse y S.C. Finkner. 1995. Hillslope erosion component (Chapter 11). Water Erosion Prediction Project. NSERL Report No. 10). pp 1-13.

Foster, G.R. y Meyer, L.D., 1977. Soil erosion and sedimentation by water: an overview. In: ASAE (Editor), Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water, pp. 1-13.

- Foster, G.R., 1982. Modelling the erosion processes. In: C.T. Haan (Editor), Hydrologic Modelling of Small Watersheds. ASAE Monograph, pp. 297-380.
- Foster, G.R., y L.D. Meyer. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: Present and Propsective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. USDA-Sci. and Educ. Admin. ARS-S-40. 190-207 pp.
- García M. A., P. Tenorio L. y J. Reyes S. 1994. El endemismo en la flora fanerogámica de la Mixteca Alta, Oaxaca–Puebla, México. *Acta Botánica Mexicana* 27:53–73.
- García M., R., M. Soto H. y H. Vibrans. 2001. *Erythrina americana* Miller (“Colorin”; Fabaceae), a versatile resource from Mexico: A review. *Economic Botany* 55(3): 391-400.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Mapa de climas 1:1,000,000 (clasificación Köppen modificado por E. García). CONABIO, Mexico, D.F.
- Gómez G., A, S. Schnabel y F. Lavado C. 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 55: 59-80.
- Greenfield, J. 2016. Vetiver Grass: The Hedge against Erosion. Disponible. Disponible en línea <https://vetiverindonesia.wordpress.com/pedoman/john-greenfield/> (Consultado en julio de 2016)
- Grether, R., A. Martínez-Bernal, M. Luckow y S. Zárate. 2006. Mimosaceae. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 44. Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. 133 p.
- Guizar N. E. 2011. La vegetación de la mixteca. Doctor en Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autonoma Metropolitana.
- Guízar N., E., D. Granados S. y A. Castañeda M. 2010. Flora y vegetación en la porción sur de la mixteca poblana. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 16 Vol 2: 95-118.
- Hardle, W y L. Simar, *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Springer, Berlin, 2007.
- Harmon, R.S. y Doe, W.W. 2001. *Landscape Erosion and Evolution Modelling*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, USA, 540 pp.
- Hicks, D. H. y T. Anthony (Editores). 2001. *Soil Conservation Technical Handbook*. Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand. Disponible en: <http://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/soil-conserv-handbook-jun01.pdf>

Hill, M. O. y Gauch, H. G. 1980. Detrended Correspondence Analysis: an improved ordination technique. *Vegetatio* Vol 42: 47-58.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1988. Carta Geológica, Escala 1:250 000. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional). México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). México.

Lammeranner W., H P. Rauch & G. Laaha. 2005. Implementation and monitoring of soil bioengineering measures at a landslide in the Middle Mountains of Nepal. *Plant and Soil*, 278:159-170.

Lane, L.J., Nichols, M.H. y Paige, G.B., 1995. Modeling erosion on hillslopes: concepts, theory and data. In: P. Binning, H. Bridgman and B. Williams (Editors), *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'95)*.

León P., J.D. 2009. Control de la erosión en cárcavas. Universidad Nacional de Colombia. [http://www.docentes.unal.edu.co/jdleon/docs/Curso\\_Cuencas\\_Hidrograficas/Docs\\_para\\_lectura/Cap%204.2%20Control%20erosi%3Fn%20c%3Frcavas.pdf](http://www.docentes.unal.edu.co/jdleon/docs/Curso_Cuencas_Hidrograficas/Docs_para_lectura/Cap%204.2%20Control%20erosi%3Fn%20c%3Frcavas.pdf). Consultado el 03 de enero de 2014.

Li, M.H. y K. E. Eddleman. 2002. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods. A biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning* 60: 225–242.

Martínez, Juan (Coord.). 2006. Manejo del agua y restauración productiva en la región indígena mixteca de Puebla y Oaxaca. Resultados de estudios y recomendaciones para los tomadores de decisiones de las comunidades y organizaciones de la Sociedad Civil. México, D. F. 103 pp.

McCune, B. y M. J. Mefford. 2011. PC-ORD for Windows. *Multivariate Analysis of Ecological Data*. Version 6.0. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, U.S.A.

Meyer, L.D. y W.H. Wischmeier. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *TRANSACTIONS of the ASAE* 12(6): 754-758, 762.

Morgan, R. P. C. 2005. *Soil Erosion & Conseqvation*. Blackwell Publishing. 303 p.

Morgan, R. P. y R. J. Rickson. 2003. *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. Chapman & Hall.

Muñiz, M, C. (2015). Evaluación de presas filtrantes de morillos en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. Tesis de licenciatura. Facultad de Química. Programa ambiental. Universidad de Veracruzana.

Narváez Carvajal, G. 1991. Las condiciones naturales para la producción agrícola en las mixtecas oaxaqueñas. *Revista de Geografía Agrícola*. 15-16: 33 – 40.

Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J. y Finkner, S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA: water erosion prediction project technology. *Transactions of ASAE*, 32: 1587–1593.

Nearing, M.A., L.D. Norton, X. Zhang. 2001. Soil erosion and sedimentation. In: W.F. Ritter y A. Shirmohammadi (eds.) *Agricultural Nonpoint Source Pollution*. Lewis Publishers, Boca Raton pp.29-58.

Niembro R., A; M. Vázquez T. y O. Sánchez S. 2010. Árboles de Veracruz: 100 especies para la reforestación estratégica. Gobierno del Estado de Veracruz, Secretaría de Educación del Estado de Veracruz, Comisión del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave para la conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución, Centro de Investigaciones Tropicales. Xalapa, Veracruz. 256 p.

Núñez S., J. 2001. Manejo y conservación de suelos. EUNED. San José, C. R. 288 p.

Núñez D. y G. Marten. 2013. Combatiendo la desertificación con reforestación comunitaria y agricultura sustentable. En línea: <http://www.ecoinflexiones.org/historias/detallados/mexico-oaxaca-forestacion-comunitaria-mixteca.html>. Consultado el 02 de noviembre 2015.

Ocampo A., G. 2004. Buddlejaceae. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 39. Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. 17 p.

Oklahoma Forestry Services (OFS). 2009. Side-Gully Control: Using Trees, Hand Labor, Rock and Other Materials. Oklahoma Department of Agriculture, Food & Forestry. Oklahoma.

Oropeza Mota, J. L., M. R. Martínez Menes y D. Ríos Berber. 1990. Metodología para la evaluación de sedimentos en terrenos degradados mediante muros de control de azolves. *Agrociencia* Vol.1 No. 3.

Ortiz S., M.L.M., M. Anaya G. y J. Estrada B. W. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. CONAZA. México.

Osman, K. T. 2013. Soil degradation conservation and remediation. Springer. 237 p.

- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten y C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133
- Poesen, J.W., K. Vandaele y B. V. Wesemael. 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Publication, vol. 236.
- Prosser, I. P. y B. Abernethy. 1996. Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process threshold. *Water Resources Research* Vol 32. No.7: 2289-2298.
- Pysek, P., Z. Chocholouskova, A. Pysek, V. Jarosik, M. Chytry y L. Tichy. 2004. Trends in species diversity and composition of urban vegetation over three decades. *Journal of Vegetation Science*. 15:781-788
- Ramírez, M. N., A. Camacho C. y M. González E. 2003. Guía para la Propagación de Especies Leñosas Nativas de Los Altos y Montañas del Norte de Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas. México. 40 pp. Sobrevivencia y crecimiento vegetativo de estacas de *Erythrina americana*.
- Rivas Guevara, M., B. Rodríguez Haros y J. Palerm Viqueira. 2008. El sistema de jollas una técnica de riego no convencional en la Mixteca. En: Comisión Nacional del Agua. Boletín del archivo histórico del agua. Año 13 (número especial). México, D. F. pp: 6-16.
- Renard, K.G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool y D.C. Yoder (Coordinators). 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA, Agriculture Handbook No. 703. Washington D.C., USA. 404 pp.
- Reubens B., J. Poesen, F. Danjon, G. Geudens, B. Muys. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees* 21:385-402.
- Reubens, B., J. Nyssen, J. Poesen, H. Woldekidan, A. Zenebe, G. Girmay, J. Deckers, N. Taha, S. Tewoldeberhan, K. Gebrehiwot, H. Bauer y M. Haile, B. Muys. 2008. Establishment and Management of Woody Vegetation to Control Gully Erosion. Tigray Livelihood Papers No. 8, VLIR – Mekelle University IUC Programme.
- Rey F. y M. Burylo. 2014. Can bioengineering structures made of willow cuttings trap sediment in eroded marly gullies in a Mediterranean mountainous climate? *Geomorphology* 204: 564-572.

Rivera P., J. H. 2012. Experiencias de casos exitosos, con el uso de la bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Colombia.

Rodríguez, A., G. Moya, E. Castelló, G. Vanoli, H. D. Farías y F. López. 2005. Obras de estabilización de procesos erosivos en suelos loésicos (cárcavas). Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 5, No 2: 149-162.

Rose, C. W., B. Yu, D. P. Ward, N. E. Saxton, J. M. Olley y E.K. Tews. 2014. The erosive growth of hillside gullies. Earth Surf. Process. Landforms 39: 1989–2001.

Ruiz, J., M. Bravo y G. Loaeza. 2001. Cubiertas vegetales y barreras vivas: tecnologías con potencial para reducir la erosión en Oaxaca, México. Terra 19(1): 89-95.

Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski y colaboradores, 2005. Flora fanerogámica del Valle de México. 2a. ed., 1a reimp., Instituto de Ecología, A. C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. (Edición digital: INECOL 2010).

Sangalli, P. 2005. ¿Qué es la bioingeniería? QEJ. BricoJardinería & paisajismo: Revista profesional de distribución en horticultura ornamental y jardinería. No. 130: 12-20.

Santiago Mejía, B. E. 2016. Evaluación de las obras de conservación de suelos en la Mixteca Alta Oaxaqueña. Maestría en Ciencias. Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados.

Saxton, K. E. y W. Rawlsen 2009. Soil Water Characteristics: Hydraulic properties calculator. United States Department of Agriculture, Washington State University Disponible en línea (<http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>)

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2016. Isoyetas de Intensidad–Duración Frecuencia. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura. México, D. F. Disponible en línea (<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas/oaxaca.pdf>) (Consulta octubre 2016).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Colegio de Postgraduados. 2003. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000. Memoria Nacional. SEMARNAT-CP. 58p.



Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2010. Normales climatológicas de la estación 20265 “San Mateo Etlatongo”. SMN-CNA. Disponible en línea (<http://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales5110/NORMAL20265.TXT>).

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2015. Base de Datos Climatológica de la estación 20265 “San Mateo Etlatongo”. SMN-CNA. Disponible en línea (<http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Diarios/20265.txt>)

Shit, P.K. y R. K. Maiti. 2012. Mechanism of Gully-Head Retreat-A Study at Ganganir Danga, Paschim Medinipur, West Bengal. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management EJESM* Vol. 5 No. 4:332–342.

Sidorchuk, A, 1999. Dynamic and static models of gully erosion. *Catena* 37: 401–414

Sidorchuk, A. 2001. GULTEM – The Model to predict Gully Thermoerosion and Erosion (Theoretical Framework). In Stott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C (eds) *Sustaining the Global Farm. Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organisation Meeting held May 24 -29, 1999 at the Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.*

Sidorchuk, A., M. Markerb, S. Morettic, G. Rodolfid. 2003. Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. *Catena* 50: 507– 525.

Sidorchuk, Aleksey y Anna Sidorchuk. 1998. Model for estimating gully morphology. *Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes, IAHS Publ.* 249:333-343

Singh, R.B., y M.J. Haigh (eds.). 1995. *Sustainable reconstruction of highlands and headwater regions.* New Delhi.

Soto-Estrada, C. 2004. *Crotalariaeae. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 40.* Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. 25 p.

Strahler, A. N. 1952, Dynamic basis of geomorphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol.63: 923-938.

Studer, R. y H. Zeh. 2014. *Soil Bioengineering: Construction Type Manual.* vdf Hochschulverlag. 441 p.

Torres-Colín, L. y A. Delgado-Salinas. 2008. *Desmodieae. Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fascículo 59.* Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. 52 p.

UNESCO, 2009. Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile. Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Claudio Olivares, Rodrigo Valdés, Francisco Balocchi. *Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°18.*

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service), 1972. National Engineering Handbook. Part 630, Hydrology, Section 4, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Valentin, C., J. Poesen y Y. Li. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* Vol. 63: 132-153.

Villa M. I. 2014. Valoración de obras y prácticas de conservación de suelo y agua en el estado de Puebla. Tesis de Licenciatura, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo.

Villarreal Q., J. A. 2003. Compositae, Tageteae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo 113. 89 p.

Walling, D.E. y D. Fang. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the World's Rivers. *Global and Planetary Change*, 39:111–126.

Williams, J. R. 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, Vol. ARS-S-40 (1975), pp. 244-252 Key: citeulike:13481135

Wischmeier, W.H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agricultural Handbook 537*. USDA, Science and Education Administration, Washington, DC.

Wischmeier, W.H., C.B. Johnson y B.V. Cross. 1971 A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of soil and water conservation* Vol. 26 No.5: 189–193

WWF (2015). Módulos demostrativos para el monitoreo de los servicios ecosistémicos en la Mixteca de Oaxaca. Informe Técnico.

## 7. APÉNDICES

### Apéndice A. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo - cobertura y manejo (condición de humedad II, y Ia = 0.2S)

Cobertura			Grupo de suelos			
Uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
			Curva numérica (CN)			
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivo de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	69	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80

Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Caminos de tierra		Buena	72	82	87	89
Caminos pavimentados		Buena	74	84	90	92

## Apéndice B. Listado florístico de la vegetación en las cárcavas.

Nombre científico	Acrónimo	Forma de vida	Época colecta
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	<i>Aca far</i>	Árbol	PS-PH
<i>Acacia schaffneri</i> (S. Watson) F.J. Herm.	<i>Aca sch</i>	Árbol	PS-PH
<i>Ageratina glabrata</i> (Kunth) R.M. King & H. Rob.	<i>Age gla</i>	Arbusto	PS
<i>Ageratina petiolaris</i> (Moc. ex DC.) R.M. King & H. Rob.	<i>Age pet</i>	Arbusto	PS
<i>Ageratina tomentella</i> (Schrad.) R.M. King & H. Rob.	<i>Age tom</i>	Arbusto	PH
<i>Amelanchier denticulata</i> (Kunth) K. Koch	<i>Ame den</i>	Arbusto	PH
<i>Baccharis heterophylla</i> Kunth	<i>Bac het</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Baccharis salicifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	<i>Bac sal</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Bothriochloa hirtifolia</i> (J. Presl) Henrard	<i>Bot hir</i>	Hierba	PH
<i>Bouteloua triaena</i> (Trin. ex Spreng.) Scribn.	<i>Bou tri</i>	Hierba	PS-PH
<i>Buddleja sessiliflora</i> Kunth	<i>Bud ses</i>	Arbusto	PS
<i>Castilleja tenuiflora</i> Benth.	<i>Cas ten</i>	Hierba	PS-PH
<i>Clinopodium mexicanum</i> (Benth.) Govaerts	<i>Cli mex</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Cologania obovata</i> Schtdl.	<i>Col obo</i>	Hierba	PS-PH
<i>Croton dioicus</i> Cav.	<i>Cro dio</i>	Hierba	PS-PH
<i>Dalea lutea</i> (Cav.) Willd.	<i>Dal lut</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Dalea versicolor</i> Zucc.	<i>Dal ver</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Desmodium subsessile</i> Schtdl	<i>Des sub</i>	Hierba	PS-PH
<i>Dodonaea viscosa</i> Jacq.	<i>Dod vis</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Eryngium humile</i> Cav.	<i>Ery sub</i>	Hierba	PH
<i>Galium fuscum</i> M. Martens & Galeotti	<i>Gal fus</i>	Hierba	PH
<i>Galium mexicanum</i> Kunth	<i>Gal mex</i>	Hierba	PH
<i>Gymnosperma glutinosum</i> (Spreng.) Less.	<i>Gym glu</i>	Hierba	PS-PH
<i>Hilaria cenchroides</i> Kunth	<i>Hil cen</i>	Hierba	PS-PH
<i>Ipomoea murucoides</i> Roem. & Schult.	<i>Ipo mur</i>	Árbol	PH
<i>Juniperus</i> sp.	<i>Jun</i>	Árbol	PH
<i>Mentzelia hispida</i> Willd.	<i>Men his</i>	Hierba	PH
<i>Mimosa lacerata</i> Rose	<i>Mim lac</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Muhlenbergia emersleyi</i> Vasey	<i>Muh eme</i>	Hierba	PS
<i>Muhlenbergia rigida</i> (Kunth) Kunth	<i>Muh rig</i>	Hierba	PH
<i>Opuntia</i> sp.	<i>Opu</i>	Arbusto	PS-PH
<i>Penstemon campanulatus</i> (Cav.) Willd.	<i>Pen cam</i>	Hierba	PH
<i>Pinaropappus roseus</i> (Less.) Less.	<i>Pin ros</i>	Hierba	PS
<i>Porophyllum tagetoides</i> (Kunth) DC.	<i>Por tag</i>	Hierba	PS-PH
<i>Rhus standleyi</i> F.A. Barkley	<i>Rhu sta</i>	Árbol	PS-PH
<i>Salvia melissodora</i> Lag.	<i>Sal mel</i>	Hierba	PS-PH
<i>Solanum lanceolatum</i> Cav.	<i>Sol lan</i>	Arbusto	PH
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	<i>Son ole</i>	Hierba	PS
Sp 1		Arbusto	PS-PH
Sp 2		Arbusto	PH
<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	<i>Tec sta</i>	Árbol	PS-PH
<i>Wigandia urens</i> (Ruiz & Pav.) Kunth	<i>Wig ure</i>	Árbol	PS-PH

### Apéndice C. Atributos de las especies con mayor cobertura.

Posición y Especie		Atributos					
Cima	Nombre común	Habito de crecimiento	Cobertura	Densidad de follaje	Raíz	Reproducción	Resistencia y Tolerancia
<i>Acacia schaffneri</i>	Espino	Arbusto	Amplia	Regular	Profunda	Sexual	Sequía y Suelos pobres
<i>Bouteloua triaena</i>	Navajita	Hierba	Amplia	Regular	Extendida	Vegetativa	Suelos pobres
<i>Dalea lutea</i>	Rabito	Arbusto	Amplia	Escaso	Profunda	Sexual	Fuego, Heladas, Suelos pobres
<i>Dalea versicolor</i>	Hierba del zorrillo	Arbusto	Amplia	Escaso			
<i>Dodonaea viscosa</i>	Jarilla	Arbusto	Amplia	Abundante	Extendida	Sexual y Vegetativa	Fuego, Sequía, Suelos pobres
<i>Hilaria cenchroides</i>	Gramma	Hierba	Amplia	Regular	Extendida	Vegetativa	Suelos pobres
<b>Talud</b>							
<i>Baccharis heterophylla</i>	Chamizo negro	Arbusto	Amplia	Regular			Suelos pobres
<i>Desmodium subsessile</i>	Hierba de la garrapata	Hierba	Reducida	Regular			
<i>Gymnosperma glutinosum</i>	Romerillo	Hierba	Amplia	Regular	Extendida	Sexual	Suelos pobres
<i>Muhlenbergia rigida</i>	Pasto blanco	Hierba	Amplia	Regular	Extendida		Heladas
<i>Wigandia urens</i>	Chichicaste	Árbol	Amplia	Abundante		Sexual	Suelos pobres
<b>Lecho</b>							
<i>Castilleja tenuiflora</i>	Espinosilla	Hierba	Amplia	Escasa		lida	
<i>Galium fuscum</i>	Enredadera	Hierba	Amplia	Escasa			
<i>Salvia melissodora</i>	Flor de muerto	Hierba	Amplia	Regular			