



**Universidad Autónoma de Querétaro**  
Facultad de Ciencias Naturales  
Facultad de Ingeniería  
Facultad de Psicología  
Facultad de Filosofía  
Facultad de Química  
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

**EFFECTOS ACUMULATIVOS EN LA MICROCUENCA LA JOYA: EVALUACIÓN  
DE OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestra en Gestión Integrada de Cuencas**

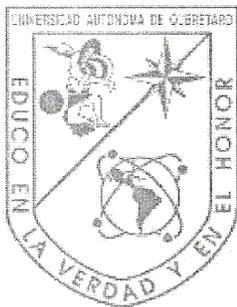
**Presenta:**

Claudia Doralí Pérez Hernández

**Dirigida por:**

Dr. Raúl Francisco Pineda López

Santiago de Querétaro, Qro. Diciembre 2017



**Universidad Autónoma de Querétaro**

Facultad de Ciencias Naturales  
Facultad de Ingeniería  
Facultad de Psicología  
Facultad de Filosofía  
Facultad de Química  
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

**Maestría en Gestión Integrada de Cuencas**

**EFFECTOS ACUMULATIVOS EN LA MICROCUENCA LA JOYA: EVALUACIÓN DE OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestra en Gestión Integrada de Cuencas

**Presenta:**

Claudia Doralí Pérez Hernández

**Dirigido por:**

**Dr. Raúl Francisco Pineda López**

**SINODALES**

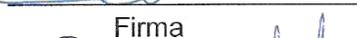
Dr. Raúl Francisco Pineda López  
Presidente

  
Firma

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar  
Secretario

  
Firma

Dr. Mario Roberto Martínez Menez  
Vocal

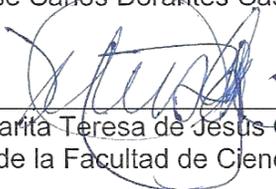
  
Firma

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero  
Suplente

  
Firma

MGIC. José Carlos Dorantes Castro  
Suplente

  
Firma

  
Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca  
Directora de la Facultad de Ciencias Naturales

  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

Campus UAQ- Aeropuerto  
Querétaro, Qro.  
Diciembre, 2017  
México

## ABSTRACT

The effect of a program of reforestation, construction and conservation practices, resources, etc., must be evaluated to observe the differences generated by natural and human resources, in addition to assessing the efficiency of these programs and thus be able to correct or improve the methods used. This project had the objective of evaluating the effect of the different works and conservation practices established in the runoff B1 of the watershed The Jewel through different physical parameters such as soil moisture at different times of the year, the production of sediments during the rainy season, the differences in vegetation cover, and the hydrological analysis, and evaluate the social perception of the population regarding the operation of the works and established practices. To be able to estimate and quantify the effect of conservation practices on the water yield and sediment production the of paired watersheds approach was used, to measure the effect of the treatments in a hydrologic unit and its comparison with the response of other that acts as a control. Obtained results showed that positive cumulative effects is possible and this is very important for an adequate watershed management.

**Keywords:** Cumulative Effects, evaluation, conservation, watershed.

## DEDICATORIAS

A mi esposo Cicerón, por ser mi apoyo incondicional, por motivarme a ser mejor persona cada día, mi vida no estaría completa si no estuviera acompañada de tu mano en el camino, te amo.

A mis hijos Alejandro Cicerón y Julieta, quizá en este momento no entiendan mis palabras, pero cuando sean capaces, quiero que sepan lo que significan para mí. Son la razón de que me levante cada día esforzándome por el presente y el mañana, son mi motor más fiel y confiable hacia la superación, a ustedes, todos mis logros.

A mi mamá Silvína, por ser mi cimiento y brindarme todas las herramientas para vivir.

A mis hermanos Aniela y Javier, por compartir alegrías y tropiezos, por estar siempre para mí, porque aunque nuestras ramas tomen diferentes direcciones, siempre compartiremos la misma raíz.

A mi abue Domí, por estar siempre para mí desde pequeña, gracias por todo tu cariño.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo otorgado en la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Raúl Francisco Pineda López por su asesoría invaluable y apoyo incondicional, por ser un gran ejemplo y por la confianza otorgada.

Al Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero, por estar siempre dispuesto a brindarme su apoyo, por su asesoría, atención y agradable personalidad.

Al Dr. Mario Roberto Martínez Menez, gracias por instruirme en la comprensión de las cuencas, por su asesoría y confianza.

Al Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar, por la asesoría brindada.

Al MGIC. José Carlos Dorantes Castro, por el apoyo para la comprensión de temas importantes y la asesoría brindada.

A mis compañeros de maestría porque de ustedes aprendí muchísimo, especialmente a Patricia Ruiz y Alejandro Carrera, gracias por ser buenos amigos y compañeros, y brindarme siempre su apoyo.

A los pobladores de La Joya, especialmente a Doña Rosa por abrir las puertas de su hogar y apoyarme en las actividades realizadas en su comunidad.

# Contenido

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
DEDICATORIAS.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
INDICE DE FIGURAS .....	VII
INDICE DE TABLAS .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	5
3. OBJETIVOS .....	6
3.1. General.....	6
3.2. Específicos .....	6
4. MARCO TEÓRICO.....	7
4.1. LA CUENCA HIDROGRÁFICA .....	7
4.2. MANEJO DE CUENCAS.....	9
4.3. EFECTOS AMBIENTALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	12
SURGIMIENTO Y EVOLUCION DEL TÉRMINO EFECTOS ACUMULATIVOS.....	17
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
Fase 1: Evaluación. ....	26
Identificación de la necesidad de hacer una evaluación de efectos acumulativos .....	26
Selección del sitio de evaluación de tecnologías de conservación.....	27
Caracterización y análisis ambiental .....	28
Acciones de conservación y restauración de suelo y vegetación .....	40
Fase 2: Análisis .....	41
Análisis de cobertura vegetal.....	41
Comportamiento hidrológico.....	42
Producción de sedimentos.....	45
Humedad del suelo .....	55
Percepción y participación de la población .....	56

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
Fase 1: Evaluación .....	63
Caracterización del área de estudio .....	63
Acciones de conservación y restauración de suelo y vegetación.....	74
Fase 2: Análisis .....	82
Análisis de cobertura vegetal.....	82
Comportamiento hidrológico.....	85
Producción de sedimentos.....	87
Variación temporal de la humedad volumétrica en suelo en temporada húmeda y de estiaje en las unidades de escurrimiento B1 y B2. ....	91
Percepción y participación de la población .....	92
CONCLUSIONES .....	97
Bibliografía .....	99

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una cuenca hidrográfica.....	8
Figura 2. Evaluación de efectos acumulativos y procesos de transformación del medio ambiente (Espinoza, 2002).....	27
Figura 3. Curvas Hipsométricas modelo. A) Cuenca hidrográfica joven, B) Cuenca Hidrográfica Estable. C) Cuenca Hidrográfica madura (Strahler & Strahler, 1974).....	32
Figura 4. Tipos de caudales en base al perfil longitudinal (IMTA, 2013).....	33
Figura 5. Diagrama de flujo para generar una capa de uso de suelo y vegetación por unidad de escurrimiento. ....	40
Figura 6. Esquema de la geometría del vertedero instalado en las unidades de escurrimiento B1 y B2.....	43
Figura 7. Instalación de vertedor en unidad de escurrimiento B1. ....	44
Figura 8. Instalación de levellogger en las unidades de escurrimiento. ....	45
Figura 9. Sitios de muestreo de suelo.....	52
Figura 10. Análisis de textura del suelo.....	53
Figura 11. Estación climatológica Vantage Pro2.....	54
Figura 12. Estación instalada en unidades de escurrimiento de la microcuenca La Joya. ....	55
Figura 13. Sonda TDR-300 para medición de humedad en las unidades de escurrimiento de la microcuenca La Joya. ....	56
Figura 14. Taller de cartografía participativa con habitantes de la Joya. ....	60
Figura 15. Enfoque del FIDA relativo a la cartografía participativa.....	61
Figura 16. Ubicación de las unidades de escurrimiento seleccionadas para evaluar obras y prácticas de conservación.....	64
Figura 17. Orden de corrientes unidades B1 y B2.....	67
Figura 18. Curvas hipsométricas unidades de escurrimiento B1 (control) y B2 (con manejo). ....	67
Figura 19. Perfiles longitudinales unidades de escurrimiento B1 (control) y B2 (con manejo). ....	68
Figura 20. Climograma del sitio La Joya. ....	69
Figura 21. Mapa geológico de las unidades de escurrimiento B1 y B2.....	70
Figura 22. Mapa edafológico de las unidades de escurrimiento B1 y B2. ....	71
Figura 23. Mapa de uso del suelo y vegetación de las unidades de escurrimiento B1 y B2. ....	73
Figura 24. Mapa de ubicación de las obras y prácticas de conservación de suelos y agua en las unidades de escurrimiento B1 y B2. ....	75
Figura 25. Reforestación con Encinos (Quercus sp) en la unidad B2 de la microcuenca La Joya.....	76
Figura 26. Zanja trinchera al límite de capacidad. ....	77
Figura 27. Modelo de tina ciega.....	77
Figura 28. Cerco de exclusión de pastoreo. ....	78
Figura 29. Senderos interpretativos, unidad B2. ....	79

Figura 30. Presa de gavión, en la unidad de escurrimiento B2. ....	80
Figura 31. Establecimiento de presa de malla electrosoldada.....	80
Figura 32. Presas de piedra acomodada en la unidad de escurrimiento B2. ....	81
Figura 33. Presas de geocostales en la unidad de escurrimiento B2. ....	82
Figura 34. Mapa de uso del suelo y vegetación 2011. ....	83
Figura 35. Mapa de uso del suelo y vegetación 2016. ....	84
Figura 36. Hidrograma precipitaciones del 4 de septiembre al 08 de septiembre de 2017, en unidades de escurrimiento B1 y B2. ....	85
Figura 37. Hidrograma de precipitación del 17 de septiembre, en unidades de escurrimiento B1 y B2.....	85
Figura 38. Grafica de descarga de sedimento de las unidades de escurrimiento B1 (control) y B2 (con manejo).....	90
Figura 39. Descarga de sedimento por unidad de superficie.....	90
Figura 40. Distribución de humedad octubre 2016 y febrero 2017 .....	92
Figura 41. Distribución de humedad abril 2017 y septiembre 2017.....	92
Figura 42. Mapa elaborado por la comunidad de la Joya.....	93
Figura 43. Mapa de cartografía participativa digitalizado.....	94
Figura 44. Efectos acumulativos identificables y medibles en la unidad manejada de la microcuenca La Joya .....	95

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de erosionabilidad de los suelos (K) estimado en función de la textura y el contenido de materia orgánica (Morgan, 1985).....	46
Tabla 2. Factor C utilizando tipo de vegetación (Lianes, Marchamalo, & Roldán, 2009) ...	49
Tabla 3. Factor de P (SAGARPA, 2001) .....	50
Tabla 4. Parámetros físicos de las unidades de escurrimiento B1 Y B2 requeridos para determinar las características morfológicas.....	65
Tabla 5. Superficie y porcentaje de los usos de suelo y vegetación de las unidades B1 y B2.....	74
Tabla 6. Diferencias en superficie de uso del suelo y vegetación de la unidad de escurrimiento B2 para los años 2011 a 2016. ....	84
Tabla 7. Datos de precipitación, volumen y escurrimiento para las unidades B1 (control) y B2 (con manejo) .....	86
Tabla 7. Resultados de muestras de textura. ....	87
Tabla 8. Valores de K para los suelos muestreados en las unidades de estudio.....	87
Tabla 9. Información de producción de sedimentos por evento de precipitación cuantificada por unidad de escurrimiento durante el 2016. ....	89

## 1. INTRODUCCIÓN

En los límites de Guanajuato y Querétaro se ubica la microcuenca El Potrero y dentro de ella hay un cráter volcánico con una antigüedad de al menos 6 millones de años, a la unidad hidrográfica conformada por el cráter se le ha denominado microcuenca la Joya.

Un problema perceptible en la microcuenca la Joya es la degradación del suelo causada por el uso irracional de sus recursos naturales. Históricamente, en la Joya se han desarrollado actividades que han propiciado esta degradación, las de mayor impacto son la deforestación y sobrepastoreo que asociados a la alta vulnerabilidad de los suelos del sitio, los ha hecho susceptibles al intemperismo y erosión generando un efecto sinérgico.

En el año 2010, como resultado de diversos trabajos previos realizados por la Universidad Autónoma de Querétaro a través de la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, surge el Centro Regional de Capacitación en Cuencas (CRCC), el cual tiene la finalidad de promover acciones locales enfocadas hacia la conservación, manejo de recursos naturales y el desarrollo comunitario, todo ello con el apoyo y vinculación interinstitucional.

Como resultado de toda la gestión realizada en el CRCC, se han ejecutado diversas acciones emanadas de trabajos de investigación, muchos de ellos enfocados hacia la conservación y restauración de zonas degradadas, todas estas acciones tienen un efecto acumulativo benéfico. Sin embargo, este efecto acumulativo no ha sido evaluado, por ello, es necesario valorar el comportamiento y efecto de todo el trabajo realizado, identificar de la relación entre los flujos de agua y energía, además de estudiar y conocer cómo se comporta el gradiente de los diferentes componentes físicos y ambientales en una unidad de escurrimiento.

El monitoreo, seguimiento y predicción de los efectos acumulativos benéficos o nocivos de múltiples influencias naturales y artificiales sobre los componentes ambientales en el espacio y tiempo requiere de la integración de información

compleja, por ello es importante realizar un estudio de evaluación ahora, con la información que ya se tiene, generar nueva y quizá poder elaborar modelos que puedan darnos una perspectiva del impacto de los trabajos de conservación realizados ahora, en un futuro.

Los efectos acumulativos presentes en una cuenca representan un desafío para los gestores, pues están obligados a evaluar la interacción de las actividades de los habitantes de la cuenca con las que han desarrollado en el pasado, presente y futuro, a la vez que se evalúan los efectos combinados de todas las actividades existentes. Aunque el efecto de una actividad podría ser mínimo cuando se considera de manera aislada, éste se puede combinar con efectos de otras agravando el impacto (Reid, 1993).

Los fenómenos y procesos que se suceden dentro de la microcuenca La Joya tienen un alcance y una temporalidad determinada. Identificar la escala y alcance espacial en que los procesos operan es determinante para la caracterización de los componentes clave y crear las bases científicas para decidir las estrategias de manejo más adecuadas. Entender las transformaciones en el uso del territorio y las fuerzas sociales y económicas que operan es de crucial importancia para la evaluación de los efectos acumulativos.

La microcuenca La Joya ha presentado problemas de erosión y degradación, producto de la deforestación y el sobrepastoreo en zonas de ladera, lo que ha causado la erosión y formación de cárcavas por la falta de control de los escurrimientos superficiales que formaron extensas zonas degradadas.

Por esta razón, el Centro Regional de Capacitación en Cuencas en colaboración con la población de la comunidad de La Joya, ha implementado desde hace al menos siete años esquemas de manejo y recuperación del suelo, a través de la integración de diversas obras y prácticas de conservación, entre las que se encuentran, reforestación con nopal, reforestación con encino, presas (gavión, piedra acomodada, geocostales y de malla electrosoldada), tinas ciegas, zanjas tricheras y senderos interpretativos, todas procurando la mejora de tres

componentes principales: el suelo, el agua y la biodiversidad, éstas prácticas tienen como unidad de manejo a una unidad de escurrimiento y se le ha denominado unidad CONSABIO (Conservación de suelo, agua y biodiversidad).

A la fecha se tiene un efecto acumulativo de los beneficios que se han logrado con la implementación de las unidades CONSABIO, como los cambios en cobertura vegetal y la recuperación de algunas especies herbáceas, esto según las observaciones de los pobladores y diversos estudios realizados, estas unidades se establecieron en diferentes áreas de la microcuenca La Joya, en una de ellas, la unidad B, subdividida a su vez en unidad B1 y B2 se hizo un análisis de la riqueza específica, donde se diferenció el efecto obtenido a partir de una zona de exclusión en la unidad de escurrimiento B2 contra un área circundante abierta a la ganadería.

En ese estudio se resalta que la riqueza taxonómica de la zona cercada en la unidad de escurrimiento B2 alcanza 69 especies vegetales, comparada con el área circundante, la cual presenta una riqueza de 35 especies. Los valores de cobertura vegetal cambian de 30% en la zona circundante y de 125% en la zona excluida (Pineda, Segura, & González, 2015).

En esta investigación se pretenden valorar los impactos de las obras y prácticas de conservación que se han establecido en la unidad CONSABIO dentro de la unidad de escurrimiento B2, y compararlos con la unidad de escurrimiento B1, la cual tendrá la función de unidad de escurrimiento control, en la que no se cuenta con ninguna práctica de manejo.

Siendo la microcuenca La Joya típicamente representativa del 60 % del territorio nacional por sus características biofísicas, esta investigación representa una oportunidad de generar instrumentos de planeación-atención teniendo en cuenta los aspectos técnicos, sociales y económicos, los cuales posteriormente se podrán extrapolar a otras cuencas y sus unidades de escurrimiento.

La identificación y evaluación de los efectos acumulativos derivados de las obras y prácticas de conservación en la microcuenca La Joya, contribuirá al diseño de

soluciones que puedan tener impactos benéficos en la estructura y función de cuenca y por consecuencia, en el mejoramiento de la calidad de vida de la población.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La evaluación de los efectos acumulativos es un instrumento importante para la gestión de cuencas, que en México se ha explorado muy poco, pero es de vital importancia, pues al realizar la evaluación de los efectos acumulativos identificamos y caracterizamos cada uno de los impactos que están sucediendo y que se pueden generar en un espacio de influencia común y que además pueden tener un efecto sinérgico.

Hacer una evaluación de efectos acumulativos derivados de las obras y prácticas de conservación permite visualizar los efectos con un enfoque holístico, donde viendo la cuenca como un sistema complejo podemos entender las relaciones en tiempo y espacio de los efectos que ocurren en la microcuenca La Joya.

La forma más simple y aceptada dentro de las investigaciones hidrológicas para comparar los efectos de una alteración externa (en este caso los efectos de las prácticas y obras de conservación) sobre una cuenca corresponde al método de las cuencas pareadas (ARAUCO, 2012). Chang (2003), en su libro de Hidrología Forestal refiere que el uso del método de cuencas pareadas busca contrastar el efecto de la intervención de una cuenca versus la cuenca testigo o control.

De acuerdo a los datos resultantes, podremos identificar con que aspecto medido, obtendremos mejores resultados para evaluar efectos acumulativos, esto beneficiaría directamente a la comunidad que habita ahí, pues esta herramienta sirve para evaluar también efectos acumulativos negativos como, agotamiento de recursos, la degradación de zonas naturales y la pobreza, los cuales son los principales problemas que causan vulnerabilidad social e injusticia ambiental, como es el caso de la comunidad de La Joya.

Esta investigación servirá también para fijar algunos parámetros de monitoreo y evaluación de las obras y prácticas que existen en el sitio, para con las mediciones obtenidas verificar cuales son las prácticas y obras más eficientes y cuáles son los cambios generados a partir de ellas, así como también tener datos cuantificables.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. General**

Evaluar los efectos acumulativos derivados de las obras y prácticas de conservación de suelo y agua en la unidad de escurrimiento B2 de la microcuenca la Joya.

#### **3.2. Específicos**

- Cuantificar los cambios en vegetación y uso del suelo antes y después de la implementación de obras y prácticas de conservación.
- Comparar el comportamiento hidrológico y la producción de sedimentos en las unidades con o sin obras de conservación.
- Establecer el comportamiento de la humedad del suelo en las cuencas pareadas.
- Recoger y reflejar en medios tangibles, información sobre la eficiencia de las obras y prácticas de conservación.

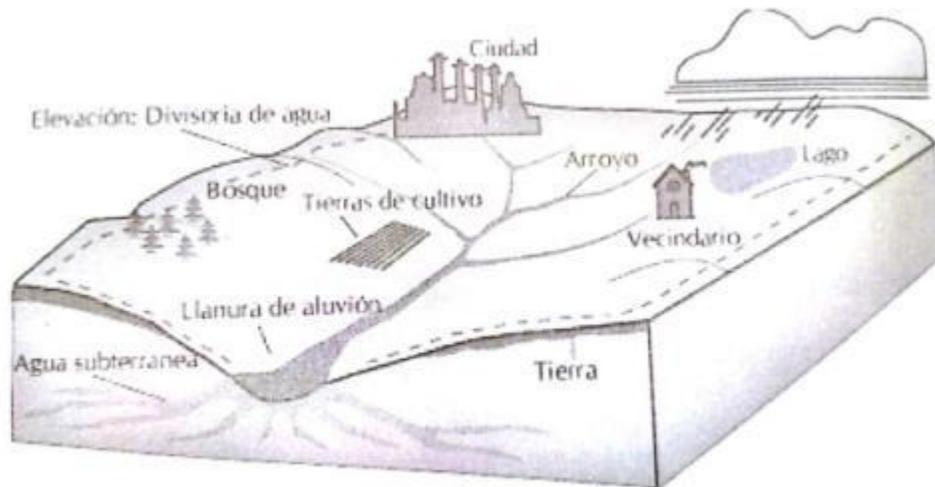
## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. LA CUENCA HIDROGRÁFICA

Los recursos hídricos de un país son regulados por políticas para el uso y protección de sus recursos hídricos. La implementación de dichas políticas resulta eficaz en diversas escalas, desde el sitio específico donde se implementan, hasta el alcance de estas, el cual puede ser para toda la cuenca, y resolver controversias aguas arriba, aguas abajo (para un río) y de región a región (para un lago o el agua subterránea). El enfoque de "toda la cuenca" permite la evaluación de un impacto a nivel de sistema. En otras palabras, las políticas nacionales, así como también los acuerdos internacionales y los convenios regionales para aguas transfronterizas, se aplican en cuencas naturales. La relación que existe entre la gestión de los recursos hídricos dentro de un país y la gestión del agua en cuencas se vuelve, de esta manera, dinámica y más sensible a las circunstancias cambiantes, sean estas ambientales, sociales o económicas. (Global Water Partnership, 2009).

Sabemos que solo una cuarta parte del planeta es plataforma continental, lo demás es agua. Mucha de esta agua se evapora, se suspende en la atmósfera en forma de vapor de agua y forma nubes que, al saturarse, regresa a la tierra en forma de lluvia. Abajo, la tierra es un gran recipiente donde se recoge el agua que escurre por vertientes, definiendo así las cuencas hidrográficas.

Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales naturalmente delimitadas por un parteaguas, son espacios geográficos donde interaccionan procesos ecológicos, geomorfológicos, hidrológicos, sociales y económicos. La interdependencia temporal y espacial de estos procesos determina la dinámica de la cuenca, las presiones sobre los recursos naturales de la misma y como consecuencia la capacidad del sistema de proveer de bienes y servicios ecosistémicos (Cotler, González, & Machorro, 2015).



**Figura 1. Esquema de una cuenca hidrográfica.**

Las cuencas hidrográficas funcionan por gravedad, que hace correr el agua hacia abajo de acuerdo con el gradiente de la ladera. Este proceso físico genera una energía adicional que imparte un gran dinamismo al medio ambiente. La lluvia que cae en las tierras altas se acumula y corre hacia las zonas bajas. Así se forman y recargan los recursos de aguas superficiales y subterráneas, se riega la vegetación y los animales disponen de agua para beber. Los sedimentos minerales y orgánicos que acarrea la escorrentía enriquecen el suelo y transportan semillas (FAO, 2009).

Cada cuenca tiene una mezcla única de hábitats y usos de la tierra y el agua; de humedales, ríos y lagos; de bosques, pastizales, granjas, pueblos y ciudades (Davies & Hanley, 2010). Los elementos que integran la cuenca varían de acuerdo al medio donde se ubique la cuenca y el grado de intervención antrópica.

Las cuencas hidrográficas se pueden subdividir en unidades espaciales a partir de la función hidrológica que desempeñan. Comúnmente se reconocen tres zonas funcionales en una cuenca: a) área de captación, donde las aguas son captadas, infiltradas y concentradas transformándose en escorrentía, b) área de almacenamiento hídrico, esta zona tiene la función de almacenar y desalojar agua cuenca abajo y, finalmente, c) área de descarga, esta zona es el área de salida o emisión hídrica, la cual típicamente se presenta en forma de escorrentía (Garrido,

Damián, & Guadarrama, 2014). También a estas áreas se les llama, zona alta, zona media y zona baja.

Por todo lo anterior, el concepto de cuenca hidrográfica es considerado la unidad mínima de gestión desde la cual se pueden manejar interacciones entre los factores naturales y los factores sociales rebasando así su tradicional énfasis biofísico.

La cuenca es también un espacio social producido por el conjunto de las relaciones e interacciones sociales de apropiación y uso de los recursos que ella contiene. Físicamente, la cuenca representa una fuente natural de captación y concentración de agua superficial, por lo que esta unidad territorial tiene una connotación esencialmente volumétrica e hidrológica. Pero, en tanto espacio social, la cuenca debe ser considerada como una realidad socialmente construida a partir de las relaciones económicas, culturales, sociales y políticas que se establecen entre los diferentes sectores (FAO, 2007).

En la presente investigación, el concepto de cuenca hidrográfica se aborda como la unidad territorial delimitada por un parteaguas y conformada por un sistema de drenaje, donde interactúan características físicas, biológicas, sociales, económicas y culturales que hacen cada cuenca particular. Los actores sociales determinan la organización y uso de los recursos existentes en la cuenca por ser un bien común, determinan el manejo y efectos positivos y negativos que de este manejo emanen.

## **4.2. MANEJO DE CUENCAS**

El manejo de cuencas es el proceso complejo que le da orden a un conjunto de acciones dentro de la Cuenca Hidrológica Superficial (Hidrográfica) o Cuenca Hidrológica Subterránea, encaminado a lograr un desarrollo social y económico sostenible en el tiempo, además de la protección del medioambiente.

Un manejo no adecuado puede llevar a problemas como la degradación del suelo aumentando así los efectos negativos en los recursos de una cuenca. Se han identificado seis procesos de degradación: erosión hídrica, disminución del

carbono orgánico del suelo; compactación; salinización y sodificación; contaminación; y disminución de los microorganismos en el suelo (Louwagie, Gay, & Burrell, 2009). La erosión es un problema natural, sin embargo, se intensifica y acelera por actividades humanas como la deforestación, sobrepastoreo y prácticas agrícolas inapropiadas.

Una de las iniciativas de desarrollo sustentable para el manejo de suelos y agua, es la conservación. La conservación del suelo promueve el uso de obras y prácticas que reducen la pérdida de cantidad y calidad del suelo a través del tiempo. Las obras y prácticas de conservación generalmente son aquellas que reducen el impacto de los agentes erosivos en los procesos de remoción y transporte de las partículas del suelo y mantienen los niveles de materia orgánica y calidad de los suelos para producir bienes y servicios (FAO, 2011).

La combinación de técnicas de conservación que se aplicarán en un sitio de interés se determina de acuerdo a la magnitud de la operación, la disponibilidad de infraestructura, maquinaria y recursos humanos y la organización del trabajo. Por esta razón, el uso de obras y prácticas de conservación deben combinarse para tener una mayor eficiencia en la conservación del suelo y agua, en el mejoramiento de la calidad del suelo y en el incremento en la productividad de la tierra.

Es importante obtener información sobre la interrelación entre obras y prácticas de conservación de suelo y de reducción de escurrimientos, debido a que la heterogeneidad de la topografía del país e incluso dentro de una misma unidad de planeación, junto con la diversificación de cultivos, hace que para los productores sea eficiente combinar varias practicas dentro de un esquema general de conservación (Lichtenberg, 2001).

Los principios que debe considerar el manejo de suelos para el mejoramiento de cuencas degradadas según la FAO sigue los lineamientos:

- Aumentar la cobertura de suelos
- Aumentar la materia orgánica del suelo

- Aumentar la infiltración y retención de humedad
- Reducir el escurrimiento
- Mejorar las condiciones para el desarrollo radicular
- Mejorar la fertilidad química y productividad
- Reducir costos de producción
- Reducir la contaminación del suelo y el ambiente
- Proteger las parcelas

Para lograr estos principios es necesario mejorar las condiciones del suelo, una de las alternativas es a través del uso de las obras y prácticas de conservación con las cuales se mejora la estructura del suelo, disminuyendo la erosión y pérdida de agua. La combinación de las obras logra, dependiendo de la geomorfología de cada lugar, que la lluvia no escurra sobre la superficie, sino que se logre infiltrar al suelo.

En México se han utilizado diferentes obras y prácticas de conservación con el apoyo de instituciones y programas del gobierno federal, estatal y municipal y con la aprobación de los productores para conservar o recuperar los suelos que han estado sometidos a procesos erosivos, siendo así una herramienta importante para el manejo de las cuencas.

El manejo de cuencas se basa en el entendimiento de la dinámica de la cuenca y de cada uno de sus componentes, así como en el conocimiento, voluntad, capacidad de gestión y participación de los actores que intervienen en la cuenca (Dourojeanni, Conceptos y Definiciones sobre Gestión Integrada de Cuencas, 2006).

Es necesario identificar cada una de las funciones en una cuenca, que dan origen a los servicios ecosistémicos, pues estos son los componentes valorados del ecosistema y son a su vez los que se ven afectados por las acciones realizadas en la cuenca. Los procesos que se desarrollan en las distintas zonas funcionales de la cuenca tienen en común la vinculación con el agua como elemento integrador (Black, 1997). Por ello la cuenca permite analizar el comportamiento hídrico y su

relación con otros componentes (suelo, vegetación, topográfica, etc.) y evaluar los efectos acumulativos de las diferentes actividades humanas que ahí se realizan.

Por lo anterior, el manejo de cuencas para esta investigación es el proceso mediante el cual se coordinan diversas acciones encaminadas a la conservación y protección de los recursos físicos, biológicos y sociales, con el objetivo de preservar los beneficios ecológicos y económicos brindados por la cuenca, incluyendo el abastecimiento de agua.

### **4.3. EFECTOS AMBIENTALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA**

Es común encontrar el término de servicios ambientales como sinónimo de servicios ecosistémicos. Según Balvanera y Cotler (2007), los términos servicios ecosistémicos y servicios ambientales pueden utilizarse indistintamente, aunque difieren en su contexto. La utilización del término servicios ecosistémicos, hace referencia a un conjunto de organismos, condiciones abióticas y sus interacciones, donde los seres humanos se ven beneficiados, mientras que el término servicios ambientales es utilizado principalmente por tomadores de decisiones y otorga más peso al concepto de ambiente en el cual no se especifica las interacciones necesarias para proveer dichos servicios.

Ante el acelerado deterioro del medio natural, es trascendental la necesidad de buscar instrumentos que promuevan el mantenimiento a largo plazo de los servicios ecosistémicos y nos permitan el acercamiento al desarrollo sustentable, para ello además de identificar los componentes valorados del ecosistema, también se debe identificar los diferentes impactos, producto del uso de la tierra.

En las cuencas hidrográficas los impactos no ocurren en forma aislada si no que son el resultado de la sinergia producto de la integración de los efectos de diferentes usos del agua (Dourojeanni, 2007).

Muchos de los problemas ambientales, como la pérdida de vegetación, el aumento en la contaminación del aire, la lluvia ácida, el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, son resultado de la suma y combinación de múltiples actividades.

Los efectos acumulativos, son cambios en el medio ambiente causados por una acción en combinación con otras actividades presentes, pasadas y futuras (Hegmann, y otros, 1999).

Un efecto acumulativo en cuencas se ve influenciado por la dinámica y el transporte de agua. El arrastre de sedimentos debido a la erosión de las superficies que fueron desprovistas de vegetación, se considera un impacto acumulativo de cuencas hidrográficas. También la disminución de agua en las corrientes a causa de los cambios en la composición del bosque aguas arriba. En cada caso, el cambio se ve influenciado por el agua que fluye a través de una cuenca (Reid, 1998).

Los efectos acumulativos pueden producirse a partir de las siguientes situaciones:

- Al combinarse el impacto de una actividad con el impacto de alguna otra actividad, afectando a un receptor. Por ejemplo, el cambio de uso de suelo en combinación con su proyecto de transporte, podrían afectar las áreas naturales.
- La interacción de políticas en la creación de un proyecto sobre el mismo receptor. Por ejemplo, proyectos donde se establece una nueva fuente de empleo y una política de vivienda para los trabajadores, podría resultar una pérdida acumulada de espacio y mayor utilización de recursos.
- La interacción de impactos de las propuestas de la creación de un proyecto que afecta a un mismo receptor. Por ejemplo, la creación de un fraccionamiento, que lleva consigo muchos más proyectos, como la apertura de carreteras, locales comerciales y obras para acercar servicios, tiene una afectación mayor a los recursos de la zona.

Estos solo son algunos ejemplos de los efectos que se pueden presentar en un territorio.

- Los efectos acumulativos se producen cuando hay aglomeración espacial o solapamiento entre planes, propuestas y acciones, supresión o adición de acciones y/o alteración del paisaje en un área (Cooper, 2004).

- Construcción de redes de carreteras en terreno inestable combinado con períodos de precipitación alta, provoca deslizamientos de tierra y aumento de flujo de sedimentos, mayor escurrimiento, etc.
- Trastornos múltiples en una cuenca: Minería, tala inmoderada, sobrepastoreo, incendios forestales. Dan como resultado aumento de la erosión, degradación de la calidad del agua, provocando a su vez costos socioeconómicos.

En otras palabras, los efectos ambientales acumulativos son a menudo la culminación de los efectos que se producen a través de muchos en pequeña escala, actividades tales como la pérdida de hábitat debido a las perturbaciones lineales (por ejemplo, tuberías, líneas eléctricas, cruces de los ríos), la degradación de los humedales de una región, múltiples embalses de agua o desvíos, o la retirada gradual de agua de un sistema fluvial. (Noble, 2010).

La naturaleza de los efectos acumulativos de las cuencas tiene aspectos tanto científicos como institucionales. Los aspectos científicos se relacionan con los procesos naturales en diferentes espacios y tiempos, cómo las actividades afectan estos procesos y para determinar los impactos y riesgos resultantes. Los elementos institucionales se relacionan con cómo las actividades son evaluadas, permitidas y conducidas.

El efecto de las acciones individuales del uso de la tierra o las perturbaciones naturales en los procesos de cuenca pueden parecer relativamente menores cuando se consideran aisladamente, pero pueden ser importantes cuando se combinan con otras acciones de uso de la tierra que han ocurrido dentro de un área dada. Esta integración ha sido importante en la evolución del análisis de los efectos acumulativos, requiriendo que los manejadores de cuencas al evaluar impactos ambientales consideren los efectos pasados, presentes y futuros de las perturbaciones individuales.

Es necesaria una comprensión básica de los efectos acumulativos, y valorar la importancia de su evaluación, ya que es útil para muchas aplicaciones y es

particularmente necesaria para el diseño de proyectos o estrategias de uso del suelo que garanticen la sustentabilidad.

La función de una cuenca es alterada cuando uno de sus componentes valorados del ecosistema es afectado por diversos impactos. Los componentes valorados del ecosistema son aquellos elementos del ecosistema cuya función es elemental para el bienestar del mismo y por tanto son irremplazables, son aquellos aspectos del ambiente natural y humano que son más valiosos para la sociedad, como las áreas valiosas por su belleza natural, áreas con valor científico o histórico, especies raras o en peligro de extinción, hábitats importantes, cultura, calidad, espacios importantes para poblaciones indígenas, etc.

Joanna Treweek (1999), denomina a los componentes valorados del ecosistema como componentes importantes o valiosos del ecosistema, el valor puede ser expresado en términos de utilidad o beneficios que proporcionan a la sociedad. Dentro de los componentes están: componentes abióticos, unidades biogeográficas, eco regiones, hábitats, especies, poblaciones o comunidades, organismos individuales, ecosistemas y sitios especiales.

Refiere también a que los componentes del ecosistema deben ser sensibles a alguna actividad que se vaya a desarrollar teniendo en cuenta criterios adicionales como el rango de distribución, abundancia o densidad, estacionalidad de su presencia o actividad, etc.

Esta definición es buena sin embargo deja de lado el componente social, esos aspectos que están también dentro del ecosistema y que son importantes, como la cultura de las comunidades.

Debido a que los componentes valorados están inmersos en un ambiente que cambia constantemente, son altamente susceptibles. Si bien los componentes valorados del ecosistema pueden ser afectados por una acción humana, también son afectados por el resultado de la suma de más acciones, ellos son los receptores integradores de los impactos acumulativos.

La evaluación de los efectos acumulativos es un procedimiento sistemático para identificar y evaluar la importancia de los efectos de múltiples actividades. El análisis de las causas, las vías y las consecuencias de estos impactos es una parte esencial del proceso de evaluación (Cooper, 2004).

El desafío principal de una evaluación de efectos acumulativos es discernir de qué manera los impactos potenciales de un emprendimiento determinado, podrían combinarse, de forma acumulativa, con los impactos existentes y potenciales asociados a otras actividades humanas, así como a situaciones naturales de estrés tales como sequías o eventos climáticos extremos. Por ello es necesario identificar los componentes del ecosistema que son afectados directamente por la suma de estas acciones, pues de ellos dependen diversas funciones en la cuenca, tales como Integración y recepción de un sinnúmero de situaciones de estrés. Por ejemplo, los eventos climáticos extremos (sequías o inundaciones), temperatura (calor o frío extremo), o fluctuaciones naturales en una población de depredadores, todos afectan el estado de componentes biológicos (Global Water Partnership, 2009).

Las perturbaciones naturales en los procesos de cuenca pueden parecer relativamente menores cuando se consideran aisladamente, pero pueden ser importantes cuando se combinan con otras acciones de uso de la tierra que han ocurrido dentro de un área dada (Beschta & Reiter, 1995). Esta integración ha sido importante en la evolución del análisis de los efectos acumulativos, requiriendo que los especialistas se alejen de un enfoque en parámetros de evaluación única que no consideran los efectos pasados, presentes y futuros de las perturbaciones individuales.

La evaluación y predicción de los efectos acumulativos ha sido difícil de estudiar e interpretar desde hace tiempo (MacDonald L. , 2000). El proceso principal para llevar a cabo una evaluación de efectos acumulativos comprende: 1) Evaluación de las condiciones de antecedentes en la cuenca de interés; 2) recopilar y evaluar los cambios antropogénicos en la escala del sitio; 3) estado de la red de flujo; y 4)

transmitir esos productos a través de la red de caudales y evaluar su impacto en los recursos de interés.

## **SURGIMIENTO Y EVOLUCION DEL TÉRMINO EFECTOS ACUMULATIVOS**

El estudio de los efectos acumulativos viene proponiéndose desde hace muchos años, su importancia fue reconocida a mediados del siglo XVIII por George Marsh, quien observó el comportamiento de los efectos causados por la escorrentía y la erosión en Europa y Medio Oriente, y señaló que estas condiciones análogas se estaban desarrollando en América (Reid, 2010). En su libro *Man and Nature*, Marsh manifiesta lo siguiente:

*Los ríos que nacen en las tierras altas deforestadas, fluyen con poca corriente en época seca, y con mayor volumen de agua después de fuertes lluvias. Estos arrastran cantidades más grandes de sedimentos, provocando mayores problemas para la navegación del Hudson, el cual se está extendiendo hacia los lados del canal y a su vez los campos que ahí estaban los ubican más arriba invadiendo el bosque, esto representa un riesgo para el comercio de la ciudades ubicadas en las aguas superiores del río, entonces es necesario evitar la expansión que está invadiendo el bosque y los campos, pues esta, va más allá de las exigencias de una economía racional (Marsh, 1864).*

Debido a la creciente preocupación por los efectos presentados aguas abajo resultantes de la alta deforestación en las partes altas, en 1891 el Congreso de Estados Unidos aprobó la Ley de Reserva Forestal donde se autoriza al presidente proteger áreas forestales seleccionadas, las cuales con el tiempo se convirtieron en los primeros Parques Nacionales.

Sin embargo, el término “Efectos Acumulativos” no fue ampliamente utilizado y reconocido, sino hasta 1969 con la elaboración de directrices del Consejo de Calidad Ambiental (CEQ) de Estados Unidos para la aplicación en la Ley Nacional de Política Ambiental (NEPA). Debido a que observaron que la elaboración de una

evaluación de impacto ambiental de un proyecto y/o actividad aislada podría pasar por alto muchos más impactos. Por lo tanto, el CEQ especifico que el impacto general o “Acumulativo” también debía ser evaluado y lo definió como:

*“ ... El efecto sobre el medio ambiente que resulta del impacto creciente de la acción cuando se añade a otras acciones pasadas, presentes y futuras razonablemente previsibles. Los impactos acumulativos pueden resultar de acciones individualmente menores, pero colectivamente significativas que tienen lugar durante un período de tiempo” (Council on Environmental Quality, 1969).*

El CEQ no define específicamente el impacto de cuencas hidrográficas, pero refiere a cualquier impacto en el agua que fluye a través de un paisaje, ya sea por la afectación de los recursos relacionados al agua o porque algún cambio en los procesos de la cuenca genera un impacto, por ejemplo, los efectos sobre la fauna silvestre son derivados de impactos acumulativos sobre su hábitat.

Por otra parte, en Canadá, el tema de Evaluación de Efectos Acumulativos tomó importancia en la agenda de investigación en 1984 después de la creación del Consejo de Investigación de Evaluación Ambiental (CEARC por sus siglas en inglés). Desde su creación, el CEARC puso la evaluación de efectos acumulativos en su lista de prioridades por lo cual patrocino diversas investigaciones sobre el tema (Duinker & Greig, 2006). Así comenzó la evolución en la investigación de los efectos acumulativos, la cual continúa hasta la fecha (NSWA, 2017).

Derivado de la evidencia de la importancia de hacer un estudio de efectos acumulativos con los resultados de las investigaciones realizadas, en 1995 se vuelve obligatoria la realización de un estudio de efectos acumulativos en cualquier evaluación de impacto ambiental, exigido en la Ley de Evaluación Ambiental de Canadá (CEAA, 1999).

Más tarde, en 1999, esta misma Ley de Evaluación Ambiental de Canadá (Canadian Environmental Assessment Act, CEAA) publicó la guía de la buena práctica (Cumulative Effects Assessment Practitioners' Guide) donde habla de

cómo abordar los efectos ambientales acumulativos y proporciona asesoramiento para la elaboración de una Evaluación de Efectos Acumulativos a desarrolladores de proyectos. En esta guía define los efectos acumulativos de la siguiente manera:

“...cambios en el medio ambiente causados por una acción en combinación con otras actividades pasadas, presentes y futuras” (CEAA, 1999).

Esta definición es simple para poder incluir aquellos efectos acumulativos biológicos y físicos, tales como impactos sobre los suelos, la vegetación, la vida silvestre, los recursos hídricos, así como efectos acumulativos sociales y los impactos sobre la salud humana, la comunidad y los grupos indígenas (Canadian Environmental Agency, 2007).

A nivel global todas las investigaciones realizadas acerca de los efectos acumulativos han derivado en que desde hace al menos diez años en Estados Unidos, Canadá y Europa las Evaluaciones de los Efectos Acumulativos forman parte de los requisitos que deben ser cumplidos como parte del proceso de las Evaluaciones Ambientales (Gunn & Noble, 2009). De igual modo, en el ámbito internacional el Banco Mundial incluyó en la Evaluación Ambiental sectorial y regional a los efectos acumulativos como parte de los procesos que se deben considerar para en la realización de cualquier proyecto que se desee ejecutar (Banco Mundial, 1999).

Para Latinoamérica, el Banco Interamericano de Desarrollo en su Política de Medio Ambiente y Cumplimiento de Salvaguardias implementó, aunque de forma muy somera, que debe realizarse una evaluación de efectos acumulativos en cada una de las operaciones financiadas por el banco. En ella se deben considerar los impactos potenciales ambientales de naturaleza acumulativa, incluyendo los impactos sociales y culturales (Banco Interamericano de Desarrollo, 2006). Por ello, existen ya en Chile y Costa Rica evaluaciones de efectos acumulativos para proyectos hidroeléctricos.

La Norma de Desempeño 1 reconoce que los desarrolladores del sector privado deben considerar los EA dentro de su proceso de identificación y gestión de impactos y riesgos ambientales y sociales de sus proyectos, además de contar con mecanismos para identificar la magnitud y significancia de su contribución a dichos riesgos e impactos, e incluir medidas de mitigación apropiadas (Performance Standard 1, 2012).

En México la evaluación de impacto ambiental se realiza desde la década de los años 70. Durante el primer año de esta década se promulgó la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, pues en 1972 México participaría en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano de Estocolmo, a partir de este momento empezaron a gestarse mecanismos institucionales en el país para desarrollar métodos y mecanismos tendientes a evaluar impactos ambientales de diferentes actividades productivas.

Todo esto generó la promulgación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en 1988 y del Reglamento en Materia de Impacto Ambiental, donde se establece la necesidad de valorar los impactos de los proyectos.

El Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental menciona a los impactos acumulativos como una alteración que provoca un desequilibrio ecológico grave, además menciona que se deberá realizar una manifestación de impacto ambiental cuando un proyecto prevea impactos acumulativos.

La aplicación de la evaluación de impacto ambiental a cada uno de los proyectos ha permitido identificar y valorar los efectos sobre el ambiente físico, biológico, social y cultural, además de proponer medidas tendientes a evitar, minimizar o compensar los daños ocasionados; sin embargo, no se han considerado los impactos acumulativos, adversos y/o benéficos que todas ellas producen al medio en su conjunto.

Otro documento donde se habla específicamente de los efectos acumulativos es el de *Identificación de impactos acumulativos para los ordenamientos*, elaborado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Este documento es una metodología enfocada principalmente a definir y vincular Unidades de Gestión Ambiental (UGA) a través de sus flujos de agua y energía, considerando la configuración hidrográfica del territorio, es decir, las relaciones emisor-receptor entre UGA y los potenciales efectos acumulativos de las actividades productivas.

Las consideraciones de la LGEEPA en los impactos sinérgicos, acumulables y residuales, en conjunto con el manual metodológico para los ordenamientos del INECC mencionado anteriormente, perfilan hacia un enfoque que debe integrar evaluaciones de efectos ambientales que vayan más allá de los impactos que cada proyecto provoque en su entorno inmediato, sino sobre todo en los efectos en combinación con actividades ya existentes y además con actividades futuras posibles, haciendo posible así determinar restricciones para cada proyecto evaluado.

|

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En el mundo existe una amplia gama de metodologías para evaluar efectos acumulativos, métodos que van desde una lista de verificación cualitativa, que consiste principalmente en identificar una lista de efectos existentes en el sitio y asignar un valor, hasta aquellos más complejos y explícitos. El método más utilizado es el modelo ERA (Equivalent Roaded Area), desarrollado por el Servicio Forestal del USDA (United States Department of Agriculture) a principios de los años ochenta. Se trata de un modelo conceptual agrupado que cuantifica la perturbación total en la cuenca mediante el uso de coeficientes empíricos y curvas de recuperación para cada actividad (Cobourn, 1989). Este y otros métodos mayormente utilizados se describen a continuación:

**ALCES:** Un modelo que fue diseñado específicamente para predecir los efectos acumulativos. Este modelo ha estado en desarrollo durante más de diez años y fue diseñado para los bosques boreales de Alberta, Canadá. El modelo ALCES simula factores ambientales tales como el crecimiento y rendimiento del bosque, las características del hábitat de la fauna, la dinámica de comunidades vegetales y los parámetros de calidad del agua, así como las tendencias demográficas tales como la expansión de los asentamientos humanos, la expansión de la red de carreteras y las implicaciones económicas, pérdidas, alteraciones y finalmente desastres naturales como los incendios y ataque de plagas.

**CLAMS:** Se trata de otro modelo creado por el Servicio Forestal de Estados Unidos en colaboración con la Estación de Investigación del Noroeste del Pacífico y la Oregon State University.

Esta herramienta genera datos y modelos para simular el hábitat acuático, hábitat terrestre, del peligro de deslizamiento, el crecimiento y rendimiento del bosque y la regeneración del bosque. Economía y el potencial de recreo también se pueden evaluar.

ESI: El Earth Systems Institute (ESI), en colaboración con el Servicio Forestal del USDA, publicó un modelo de simulación. Las simulaciones ilustran gráficamente los efectos que tienen los incendios y las inundaciones en las cuencas, principalmente el tiempo de crecimiento de la masa forestal y la carga de sedimentos en los canales (USDA Forest Service , 2002). Los resultados de las simulaciones del paisaje proporcionan algunas herramientas conceptuales para la evaluación de los impactos acumulativos.

Mc Donald: El Dr. Lee MacDonald ha publicado un enfoque conceptual para el análisis de los efectos acumulativos de las cuencas hidrográficas (MacDonald L. , 2000). El método ofrece un marco integral para abordar el tema. El marco incluye tres fases interrelacionadas: alcance, análisis y gestión. McDonald hace notar que las fases se deben abordar de forma iterativa no necesariamente en secuencia estricta.

Dentro de la fase de evaluación hay cinco componentes:

1. Identificar explícitamente los temas y recursos de interés, incluyendo su ubicación. Presumiblemente, esto se hace usando la información existente, como mapas temáticos, localizaciones de especies en peligro de extinción, las designaciones de las cuencas hidrográficas sensibles, etc.
2. Definir la escala de tiempo de la evaluación. Esto puede ser algo arbitraria, sino que debe estar relacionado con las tasas de recuperación asumidos. Puede ser necesario incluir un enfoque estocástico para dar cuenta de fenómenos como inundaciones, incendios, etc., que tienen una alta probabilidad de ocurrencia.
3. Definir la escala espacial de la evaluación. Ésta debe estar relacionada con los procesos que afectan a los recursos de interés identificados. Por lo general, las escalas más grandes disminuyen la importancia del efecto, mientras que las escalas más pequeñas tienden a maximizar el efecto.

4. Identificar la magnitud relativa de riesgo para cada recurso, y ajustar el alcance de la evaluación de acuerdo con el costo probable de una respuesta incorrecta. El énfasis debe estar en efectos directos en lugar de efectos indirectos.
5. Selección del nivel de esfuerzo apropiado para la evaluación. La preocupación pública y los recursos financieros tendrán un efecto desproporcionado sobre esta decisión.

La fase de análisis también tiene cinco componentes:

1. Identificar los mecanismos clave de causa y efecto. Centrarse en los mecanismos clave y no quedarse anclados en el "infinitamente grande universo de los efectos indirectos e interacciones."
2. Estimación del área de distribución natural de la variabilidad y la condición relativa para el recurso (s) de preocupación. En general, las tendencias muestran una mayor variabilidad cuando se observa durante períodos de tiempo más largos. Subestimaciones del rango natural de variabilidad conduce a una sobreestimación de la importancia de los efectos acumulativos.
3. Identificar pasadas, presentes y futuras actividades en el área de interés. Esto dependerá de las escalas temporales y espaciales definidas en la fase de evaluación.
4. Evaluar el impacto relativo de pasado, presente y actividades futuras esperadas. Esto es esencialmente el corazón de la evaluación de los efectos acumulativos de las cuencas donde el pasado, las perturbaciones presentes y previstas se combinan con los procesos de causa y efecto previamente identificados para estimar los impactos acumulativos sobre los recursos de interés. Esto puede ir desde una evaluación cualitativa a algo más complejo que implica modelos de simulación por ordenador. Dada la incertidumbre inherente y la complejidad dentro de los sistemas naturales, este componente de la evaluación es generalmente más útil

para comparar escenarios alternativos en lugar de tratar de predecir con exactitud el futuro.

5. Evaluar la validez y la sensibilidad de los efectos acumulativos previstos. La comparación de las predicciones con los datos medidos es el mejor método, pero está sujeta a error. Los análisis de sensibilidad y revisiones por pares externos también son buenas pruebas de validación.

Por último, la fase de ejecución y gestión cuenta con dos componentes:

1. Identificar las posibilidades de modificación, la mitigación, la planificación y la restauración. Este componente se puede utilizar para modificar las actividades propuestas o establecer prioridades para las actividades de restauración y/o mitigación.
2. Identificar las principales lagunas de datos y las necesidades de monitoreo. Este paso está destinado a informar las decisiones de gestión adaptable para mejorar las actividades de evaluación o de gestión.

ERA: El Servicio Forestal del USDA en California adoptó un modelo mecanicista de los efectos acumulativos (USDA Forest Service, 1998). En este método se consideran todos los usos de la tierra pasados y previstos a los cuales se les asigna un puntaje en términos de efecto. Las calificaciones de todos los usos de la tierra se suman y se compararan con los valores de un umbral preestablecido. Si el valor supera el umbral de efectividad, significa que hay una señal de alerta e indica la necesidad de una investigación de campo más detallada y una posible reducción en la actividad de uso de la tierra hasta que tenga una recuperación suficiente.

Un problema para la evaluación de efectos acumulativos y monitoreo de la eficiencia de obras y prácticas de conservación es la falta de información previa a la implementación de proyectos, para ello es usado el método de cuencas pareadas, el cual consiste en medir dos cuencas durante algún tiempo para poder definir mediante regresiones el tipo de relación que hay entre ambas.

Posteriormente, se aplica el manejo sobre una de ellas y se estima su valor previo al proyecto utilizando las regresiones elaboradas con la parcela no manejada (Gándara, 2011).

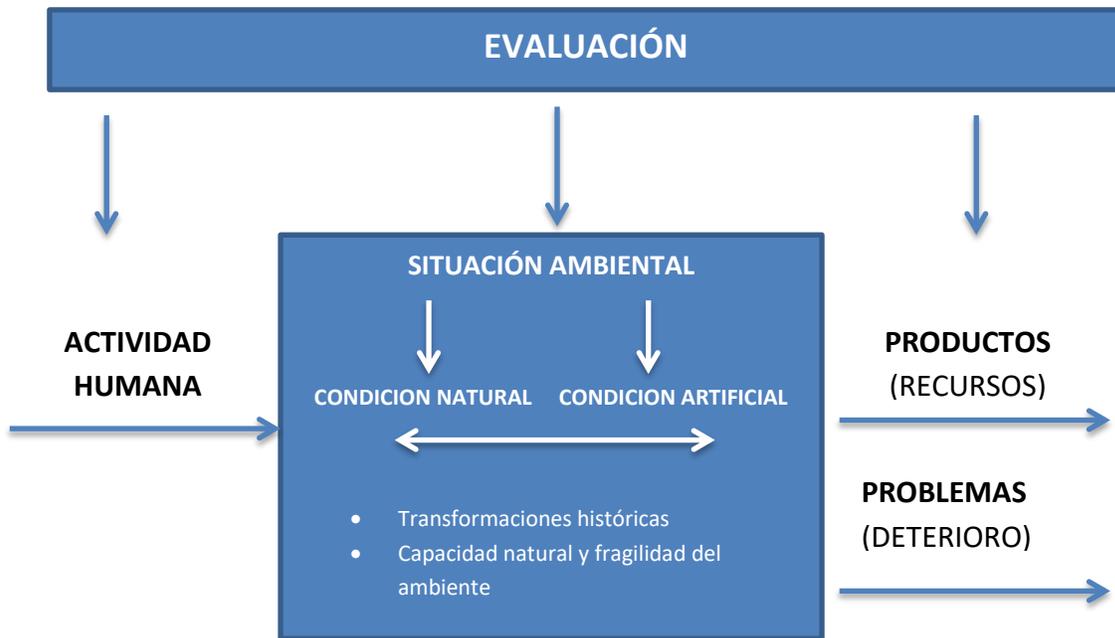
Para la evaluación de efectos acumulativos positivos en la unidad B2 de la microcuenca La Joya se utilizó la metodología McDonald, donde la primera etapa es la fase de evaluación, la cual se describe a continuación:

### **Fase 1: Evaluación.**

#### **Identificación de la necesidad de hacer una evaluación de efectos acumulativos**

La evaluación de efectos acumulativos permitió comparar las situaciones ambientales existentes con aquellas que surgieron como resultado de una acción en particular. La comparación de dos unidades de escurrimiento sirvió para identificar tanto los impactos positivos y los beneficios ambientales que surgen después de llevar a cabo un proyecto, como aquellos de carácter negativo que deben mejorarse para evitar la degradación ambiental.

En el siguiente esquema se muestra la vinculación que existe entre un proceso de evaluación de efectos acumulativos y las acciones humanas enfatizando la influencia en la toma de decisiones. Espinoza (2002) habla de cómo una evaluación permite el manejo de los recursos a través de prácticas eficientes.



**Figura 2. Evaluación de efectos acumulativos y procesos de transformación del medio ambiente (Espinoza, 2002).**

Para evaluar las obras y prácticas de conservación en la microcuenca la Joya, se decidió utilizar el método de cuencas pareadas el cual consiste en medir ambas unidades durante un tiempo determinado y verificar el tipo de relación existente entre ellas. Este método permite estimar el valor previo al proyecto establecido en una de ellas.

#### **Selección del sitio de evaluación de tecnologías de conservación.**

Uno de los objetivos del proyecto del CRCC fue el establecimiento de al menos 70 buenas prácticas para la conservación de agua, suelo y biodiversidad. Uno de los sitios donde se decidió intervenir debido a su alto grado de degradación es en la unidad de escurrimiento B (Arroyo La Joya), el cual nace en el Cerro Tábula en la parte norte de la microcuenca y corre de manera vertical hacia el sur (Campos, 2012). Esta unidad se divide a su vez en dos unidades B1 y B2, las obras y prácticas de conservación se ubican en la unidad B2, contigua a B1.

Dadas estas características se eligió este sitio para hacer la evaluación, una de ellas correspondiendo a la unidad de evaluación para este caso donde se han establecido obras y prácticas de conservación y la otra la cual tendrá el papel de

“testigo” donde no se tienen establecidas estas prácticas. Otra característica importante de este sitio es la ubicación de los sitios de salida para la implementación de los vertedores son de fácil acceso, reduciendo así costos de instrumentación y seguimiento.

Una vez ubicados los puntos de salida de ambas unidades de escurrimiento, se procedió a ubicarlo con el apoyo de un GPS, para posteriormente definir los parteaguas de ambas unidades de escurrimiento utilizando curvas de nivel equidistantes cada 10 metros.

### **Caracterización y análisis ambiental**

El objetivo principal de la evaluación de efectos acumulativos es asegurar que los recursos y elementos que se encuentran dentro de una cuenca se describan y evalúen para evitar su afectación.

Con la caracterización se determinará su situación actual, con todos sus aspectos sociales y biofísicos, así como las relaciones entre ellos. Los aspectos ambientales deben analizarse, en un sentido amplio, tanto en sus aspectos naturales como del ambiente, de valor paisajístico, de alteración de costumbres humanas y de impactos sobre la salud de la población.

Para la caracterización primero se analizó el medio biofísico de las unidades de escurrimiento estudiadas. A continuación, se presenta la descripción del proceso de cálculo de los diferentes parámetros para llevar a cabo la caracterización física.

### ***DESCRIPCIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS UNIDADES DE ESCURRIMIENTO***

La morfometría de las unidades de escurrimiento permite determinar las características de forma y comportamiento hidrológico. En esta investigación, la caracterización morfológica es una herramienta fundamental para asegurarnos de que las características que comparten son semejantes, y por tanto los efectos de manejo en una de ellas permitirán hacer comparaciones de diferentes parámetros a medir.

A continuación se describe el proceso de obtención de los parámetros físicos que se determinaron para las unidades de escurrimiento en estudio.

#### Área, perímetro y longitud del cauce principal

Una vez delimitado el parteaguas, se procedió al cálculo del área, perímetro y longitud del cauce de cada una de las unidades con apoyo del programa ArcGis.

#### Factor de forma de Horton (Kf)

Este índice nos permite definir la tendencia morfológica general, intenta medir cuan alargada puede ser la cuenca a través del análisis de la relación que existe entre el área de la cuenca y su longitud más extrema. Un factor de forma bajo, está menos sujeto a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma. Un valor superior a la unidad proporciona un grado alto de achatamiento y por consecuencia tenderá a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

La fórmula utilizada para calcular el factor de Forma es:

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Dónde:

Kf= Factor de forma (Adimensional)

A= Área de las unidades de escurrimiento (Km<sup>2</sup>)

L= Longitud de la cuenca (Km)

#### Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad es la relación existente entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo con la misma superficie de la cuenca. Este coeficiente define la forma de la cuenca, y se clasifica dentro de rangos que se muestran a continuación (FAO, 1985):

1 a 1-25. Corresponde a forma redonda a oval redonda.

1.25 a 1.5. Corresponde a forma oval redonda a oval oblonga.

1.5 a 1.75. Corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

El coeficiente de compacidad es determinado con la siguiente función:

$$Kc = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}}$$

Dónde:

Kc= Coeficiente de compacidad

P= Perímetro de las unidades de escurrimiento (km)

A= Área de la superficie de las unidades de escurrimiento (km<sup>2</sup>)

Proporción de elongación

Este es un parámetro más que muestra la forma de la cuenca, aquellas cuencas que presentan valores mayores a uno, presentan un área más larga que ancha que aquellas donde la proporción entre largo y ancho de la cuenca se acerca más a uno. Este parámetro al igual que el anterior proporciona una idea de la dinámica del agua en los drenajes y su potencial erosivo.

La expresión utilizada para determinar este parámetro es la siguiente:

$$Pe = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{Lc}$$

Dónde:

Pe= Proporción de elongación (Adimensional)

A= Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Lc= Longitud del cauce principal (km)

Curva hipsométrica

La curva hipsométrica representa las distintas cotas del terreno en función de la superficie de la cuenca que esta al menos a esa altitud. Dependiendo de la forma de la curva hipsométrica se puede saber el tipo de cuenca que es, si es una cuenca de meseta o una cuenca de valla aluvial. La curva hipsométrica permite cualificar el relieve.

El gráfico adimensional resultante es muy útil para el estudio de similitud entre dos cuencas.

Para el desarrollo de la curva se utiliza la siguiente ecuación:

$$H = \frac{\sum(c_i * a_i)}{A}$$

Dónde:

H= Altura media de la cuenca

$c_i$ = cota media del área  $i$  entre dos curvas de nivel

$a_i$ = área  $i$  entre dos curvas de nivel

A= área total de la cuenca

Los mapas creados hasta ahora contienen la información necesaria para calcular la curva hipsométrica con un procedimiento de grilla equivalente y mucho más preciso a través del formato *raster*.

Es importante conocer la distribución del área de ambas unidades de escurrimiento a distintos niveles topográficos a fin de comparar las características de almacenamiento y flujo entre unidades. La curva hipsométrica representa una distribución de área acumulada vs elevación.

La Figura 3 presenta de manera gráfica las curvas hipsométricas características de una cuenca joven, madura y en etapa senil.

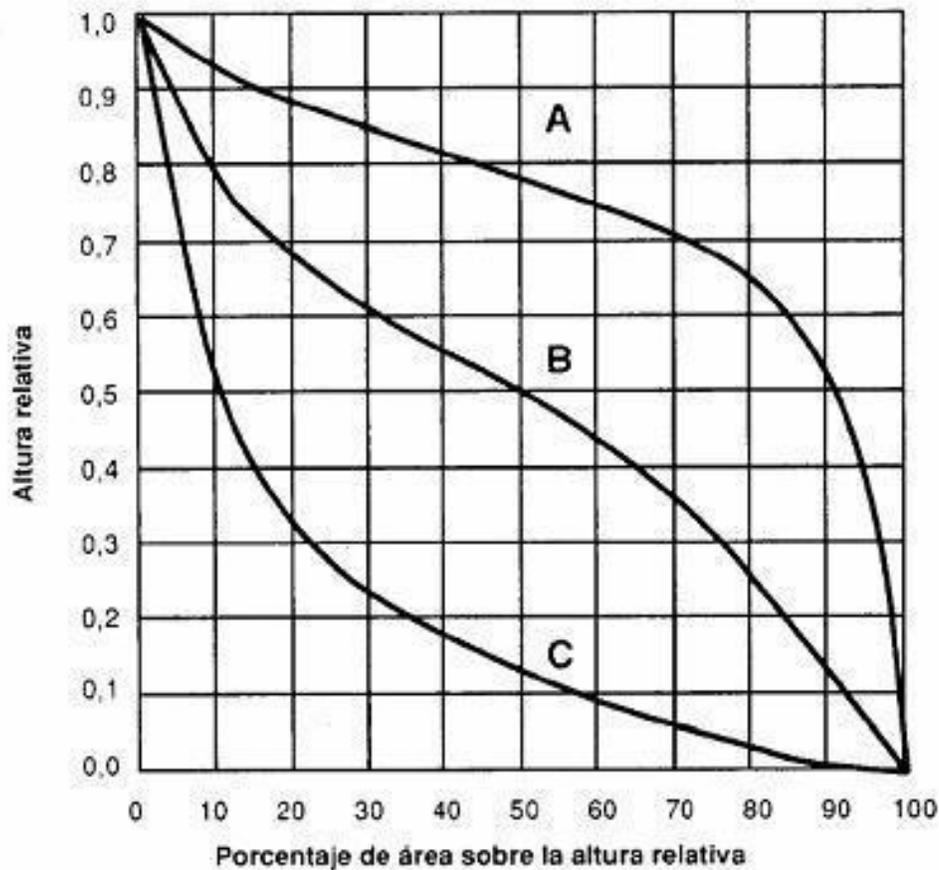


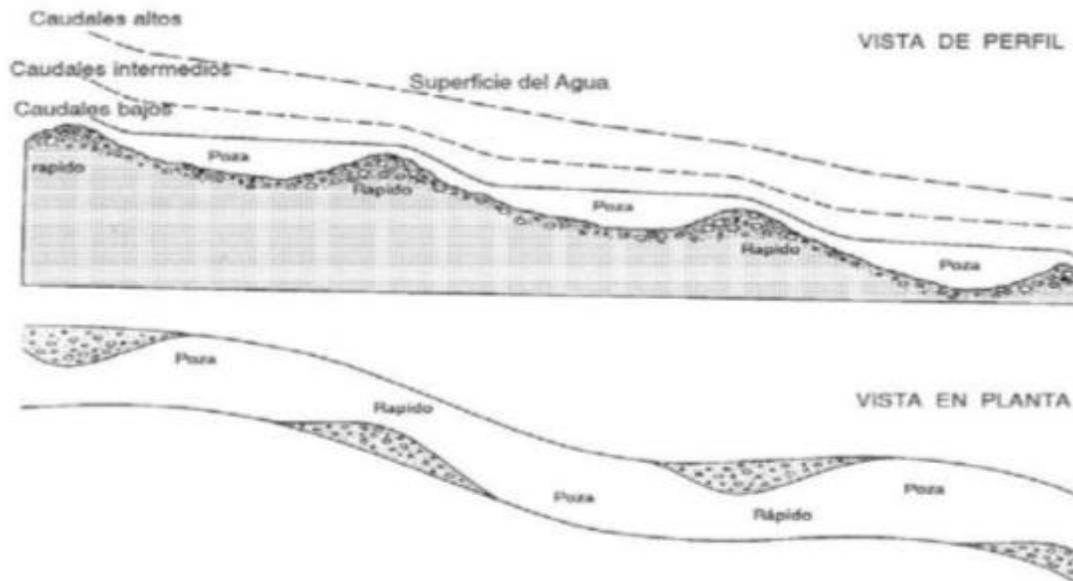
Figura 3. Curvas Hipsométricas modelo. A) Cuenca hidrográfica joven, B) Cuenca Hidrográfica Estable. C) Cuenca Hidrográfica madura (Strahler & Strahler, 1974).

#### Perfil longitudinal

El perfil longitudinal nos permite observar la pendiente a lo largo del cauce principal, en general los perfiles longitudinales de las corrientes presentan una forma cóncava y la pendiente va disminuyendo desde las zonas más inclinadas, que son las que presentan mayor erosión, hasta la parte baja, en zonas de sedimentación.

Este perfil resulta de graficar la longitud del cauce principal en función a la altitud. De acuerdo al resultado de la forma del perfil se pueden inferir diferentes rasgos de la respuesta hidrológica, por ejemplo, en cuencas con pendientes altas el gasto será más elevado por el efecto de la inclinación de la pendiente.

Con base en la forma del perfil altimétrico del río se pueden inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica, se ha observado que en cuencas con pendientes altas el cauce principal tiende a tener hidrógramas con gastos más elevados y más cortos que en cuencas con pendientes menores, por efecto de la inclinación de la pendiente presentan caudales más altos como se observa en la Figura 4.



**Figura 4. Tipos de caudales en base al perfil longitudinal (IMTA, 2013).**

#### Altura media de la cuenca

La elevación media de la cuenca es una característica resultante del promedio de elevaciones en una cuenca, este parámetro puede dar idea del clima de la cuenca. La elevación es referida al nivel del mar.

Para conocer la altitud media de las unidades de escurrimiento estudiadas recurrimos a los modelos digitales de elevación digital de cada uno de los escurrimientos.

#### Pendiente media de la cuenca

Es el valor medio del declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de la vertiente sobre la cual se ubica la cuenca.

Se calcula como media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante; es un índice de la velocidad media de la escorrentía y, por lo tanto, de su poder de arrastre erosivo. La ecuación para obtener este parámetro es la siguiente:

$$J = 100 \frac{\sum Li * E}{A}$$

Dónde:

J= Pendiente media de la cuenca

Li= Longitud de cada una de las curvas de nivel (km)

E=Equidistancia de las curvas de nivel (km)

A= Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)

En esta investigación para obtener la pendiente media de la cuenca en porcentaje, primero se obtendrá el modelo de elevación digital (DEM) a partir de las curvas de nivel equidistantes cada 15 metros en el software ArcGis, al archivo resultante se calculará la pendiente media de ambas unidades de escurrimiento.

**Pendiente media del cauce principal**

Establece la inclinación promedio que tienen las corrientes o ríos desde su nacimiento hasta su desembocadura, o en algunos casos, hasta su salida de la cuenca. Se convierte en una base para determinar aspectos importantes como la capacidad de arrastre de sedimentos de distintos tamaños, área de posible inundación en crecidas, tiempo de concentración, etc.

La pendiente media del cauce principal de la cuenca se puede estimar mediante la fórmula siguiente:

$$P = \left[ \frac{H}{L} \right] * 100$$

%P = Pendiente media

H = Desnivel entre la zona de emisión y el sitio MÁS ALEJADO de la cuenca (m)

L = Longitud a lo largo del cauce entre la zona de emisión y el sitio MÁS ALEJADO (m)

#### Orden de corrientes

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Existen varios métodos para realizar tal clasificación. En este caso se optó por el método de Horton, el cual se fundamenta en los siguientes criterios: Se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden uno se unen, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden  $i$  se unen, resulta una corriente de orden  $i+1$ . Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden.

Según Strahler (1974) una corriente puede tener uno o más segmentos. Un canal es una unión arbitraria de segmentos. Dicho autor ordena las corrientes de acuerdo los siguientes criterios:

1. Los segmentos que se originan en un nodo externo son definidos como tramos de primer orden. Los segmentos que están unidos a una fuente (los que no tienen tributarios), son definidos como de primer orden.
2. Cuando dos segmentos del mismo orden,  $i$ , se unen en un nodo interior dan lugar a un segmento de orden superior,  $i+1$ , aguas abajo. Cuando se unen dos corrientes de orden  $\omega$  crean una corriente de orden  $\omega+1$ .
3. Cuando se unen dos tramos de distinto orden en un nodo interior dan lugar a un tramo que conserva el mayor de los órdenes. Cuando se unen dos tramos de distinto orden, el orden del segmento resultante es el máximo orden de los segmentos que la preceden. Cuando a una corriente se le une otra de menor orden, la primera continua y conserva su número de orden.
4. El orden de la cuenca,  $\omega$ , es el de la corriente de mayor orden.
5. Posteriormente se procede a determinar la distribución del número de segmentos de cada orden (orden de las corrientes) que existe en la cuenca, el orden de un segmento es designado con la letra (U).

6. Se procede a determinar el número de segmentos de un orden dado, el cual se denota con (Nu).
7. Se procede a calcular la relación de bifurcación (Rb) que se determina por la proporción existente entre el número de segmentos de un orden dado y los de orden inmediato superior.

#### Ley de bifurcación

Se considera que una variación en las relaciones de bifurcación existente entre los cauces de un orden a otro, se interpreta como el efecto de los controles climáticos, sedimentológicos (litológicos) y estructurales (tectónicos) sobre la cuenca, es decir que una cuenca hidrográfica con clima, litología y estado de desarrollo uniformes, la relación de bifurcación tiende a permanecer constante de un orden al siguiente (Strahler & Strahler, 1974).

Se define como la relación entre el número de cauces (N) de orden i y el número de cauces de orden i+1 (N<sub>i+1</sub>). Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Rb = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

Dónde:

Rb= Relación de bifurcación

N<sub>i</sub>= Numero de corrientes de orden i

N<sub>i+1</sub>= Numero de corrientes de orden siguiente

La relación de bifurcación permite comprender algunas variaciones geocológicas que se producen en el territorio de la cuenca, fundamentalmente cambios importantes en el sustrato rocoso y de los grupos de suelos dominantes. Las cuencas cuya relación de bifurcación permanece constante, indican homogeneidad en las características geocológicas anteriores. La relación de bifurcación generalmente es entre 3 y 5 cuando son cuencas con variaciones considerables en sus características geocológicas.

### Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. Para su cálculo se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con otros parámetros propios de la cuenca.

El tiempo de concentración es una de las variables más importantes a determinar en la planificación de usos del suelo y en la conservación de suelos y aguas o gestión de recursos hídricos (Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2013).

A continuación, se presenta la fórmula de Pizarro mediante la cual se obtuvo el parámetro, se seleccionó esta, por ser una ecuación eficiente y fácil de emplear.

$$tc = 13.548 \left( \frac{L^2}{H} \right)^{0.77}$$

Dónde:

tc= Tiempo de concentración (min)

L= Longitud del cauce principal (km).

H= Diferencia de alturas, desnivel (km).

### Densidad de drenaje

Este índice relaciona la longitud de la red de drenaje y el área de la cuenca sobre la cual drenan las corrientes hídricas.

$$Dd = \frac{\text{Longitud corrientes (km)}}{\text{Area cuenca (km}^2\text{)}}$$

### Densidad de corrientes

La densidad de corrientes es la relación que existe entre el número de corrientes y el área de drenaje. Se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Dc = \frac{N_c}{A}$$

## *DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FISICO*

### Clima

La fuente de información para este apartado fue obtenida a partir de los datos de precipitación y evaporación de las normales climatológicas de las estaciones circundantes, estimando con ellas la clasificación climática de acuerdo con Koppen modificada por Enriqueta García.

### Edafología

De acuerdo con la clasificación edafológica elaborada por Barrientos (2013), para la zona de estudio se tienen las siguientes unidades edafológicas:

#### Leptosol

Son suelos que están limitados por la profundidad de la roca continua dura coherente dentro de los primeros 10 cm de profundidad de la superficie. Se presentan principalmente en zonas montañosas, pero pueden ocurrir en otras áreas como superficies planas de roca dejadas desnudas.

#### Regosol

Los regosoles son suelos procedentes de material no consolidado, excluyendo depósitos aluviales recientes, sin horizontes de diagnóstico más que un horizonte A ócrico; carentes de propiedades hidromórficas de los primeros 30cm. de profundidad, carentes de las características que son de diagnóstico para vertisoles y andosoles; cuando se tiene textura gruesa, carentes de laminillas de acumulación de arcilla, de las características de horizontes B cámbico u óxico o de material albico.

#### Cambisol

Son suelos que tienen un horizonte B cámbico, sin otros horizontes de diagnóstico que un horizonte A ócrico o úmbrico, un horizonte cálcico o uno gypico. El horizonte B cámbico puede faltar cuando hay presente un horizonte A úmbrico de más de 25cm de espesor; carente de salinidad elevada, carente de características de diagnóstico de vertisoles o andosoles; son suelos carentes de un régimen de

humedad arido y carentes de propiedades hidromórficas en los primeros 50 cm de profundidad. Los cambisoles verticos son cambisoles que muestran propiedades vérticas; los cambisoles húmicos son cambisoles con un horizonte A úmbrico o mólico situado sobre un horizonte B cámbico con un grado de saturación.

#### Uso del suelo

El uso del suelo actual en la zona de estudio es un indicador que permite identificar el deterioro de la cobertura vegetal, debido al desplazamiento de las actividades humanas en las áreas de vegetación natural. En esta investigación el uso del suelo y la cobertura vegetal es de especial interés, pues se analizó el cambio en porcentaje de cobertura para ambas unidades de escurrimiento desde el inicio de los trabajos de conservación hasta la actualidad.

Debido a la superficie del área de estudio, las condiciones del terreno no se ven reflejadas en la cartografía disponible, por ello se hicieron mapas de uso del suelo y vegetación propios, de modo que se tenga mejor representación del terreno. Para explicar los cambios que se han tenido con la implementación de las obras y prácticas de conservación, se tomó una imagen satelital de una fecha previa a la construcción de obras y una imagen reciente y con ellas se elaboraron los mapas de uso del suelo y vegetación actuales y previos a las obras.

Los mapas de uso del suelo se hicieron utilizando imágenes satelitales en color verdadero, con fechas en marzo de 2011 y octubre de 2016 obtenidas de Google Earth, las cuales posteriormente se georreferenciaron en ArcGis utilizando 4 puntos de control. Los polígonos de los usos del suelo se definieron por fotointerpretación en pantalla en función de la apariencia, coloración y textura, digitalizando y capturando los registros de uso del suelo de cada polígono. Así mismo se hizo un recorrido de campo para verificar los polígonos obtenidos

El proceso anterior se describe en la siguiente Figura:



**Figura 5. Diagrama de flujo para generar una capa de uso de suelo y vegetación por unidad de escurrimiento.**

#### **Acciones de conservación y restauración de suelo y vegetación**

Uno de los aspectos más importantes para la investigación es la ubicación de las principales obras y prácticas de conservación, para posteriormente asociarlas a la variación de los diferentes parámetros a medir en las unidades de escurrimiento.

Para complementar la información colectada y generada con los mapas de uso de suelo de las dos épocas de análisis, se obtuvo además un mapa de obras de conservación construidas en la Unidad B2.

Para ello se hicieron una serie de recorridos de campo para recopilar la referencia espacial de las diferentes obras que se encuentren en la unidad de escurrimiento, esto con el apoyo de un GPS, para posteriormente descargar la información y procesar los datos con los cuales se pudo elaborar el mapa de obras y prácticas de conservación.

## Fase 2: Análisis

Las obras y prácticas de conservación en la microcuenca la Joya fueron implementadas con la finalidad de revertir o disminuir los problemas de erosión presentes en la zona.

Fue necesario hacer una estimación de la funcionalidad de estas obras y prácticas por lo cual se definieron cuatro parámetros principales a medir los cuales se enlistan a continuación:

- Cobertura vegetal  
Se analizó el cambio en cobertura vegetal derivado de la implementación de obras y prácticas de conservación.
- Comportamiento hidrológico  
Se midieron los escurrimientos para algunos eventos de precipitación y se compararon aspectos como gasto, volumen, tiempo pico, entre otros.
- Producción de sedimentos  
Se estimó la diferencia en producción de sedimentos de la unidad de escurrimiento con obras de conservación contra la unidad sin obras de conservación.
- Humedad del suelo
- Percepción y participación de la población.

### Análisis de cobertura vegetal

#### *Recopilación de la información*

La información cartográfica, se obtuvo del sistema Google Earth, dicha imagen corresponde a una fecha previa a la implementación de las obras y prácticas de conservación y la de mejor calidad fue con fecha de marzo de 2011, también se seleccionó otra imagen para hacer la comparación de cobertura, la imagen reciente seleccionada corresponde a octubre de 2016.

### **Procesamiento**

Las imágenes digitales se procesaron en el software ArcGis, para posteriormente ser corregidas y referenciadas. A continuación, se procedió a la digitalización de ambas imágenes observando las diferencias en cobertura.

### **Tipos de cobertura**

Mediante el análisis digital de imágenes, interpretación y corroboración en campo, fue posible diferenciar los patrones y cambios en cobertura vegetal previos a la implementación de obras con las condiciones actuales.

### **Comportamiento hidrológico**

El clima determina la cantidad de precipitación y el impacto de esta sobre un sitio depende de la intensidad, la duración y la distribución espacial. Así como de factores fisiográficos como la forma del terreno la morfometría, la pendiente el tipo de suelo y la geología, principalmente.

El primer paso para medir el caudal es el aforo de las unidades de escurrimiento, para lo cual es necesario un vertedero, él se entiende como una abertura por donde se desliza un líquido. Por las características del sitio se seleccionó la instalación de un vertedero triangular, pues las descargas son pequeñas, es decir no exceden una lámina de 60 cm.

Para la instalación del vertedero se instaló primero un canal de concreto de 2.9 m de largo, 1.7 m de ancho y 1.5 m de altura. Al final de cada canal se colocó el vertedor, el cual consta de una hoja metálica de 1.7 m de ancho por 1 m de altura con una altura al pico de salida de 42 cm, con una salida triangular de 90°. El modelo de vertedor se muestra a continuación:

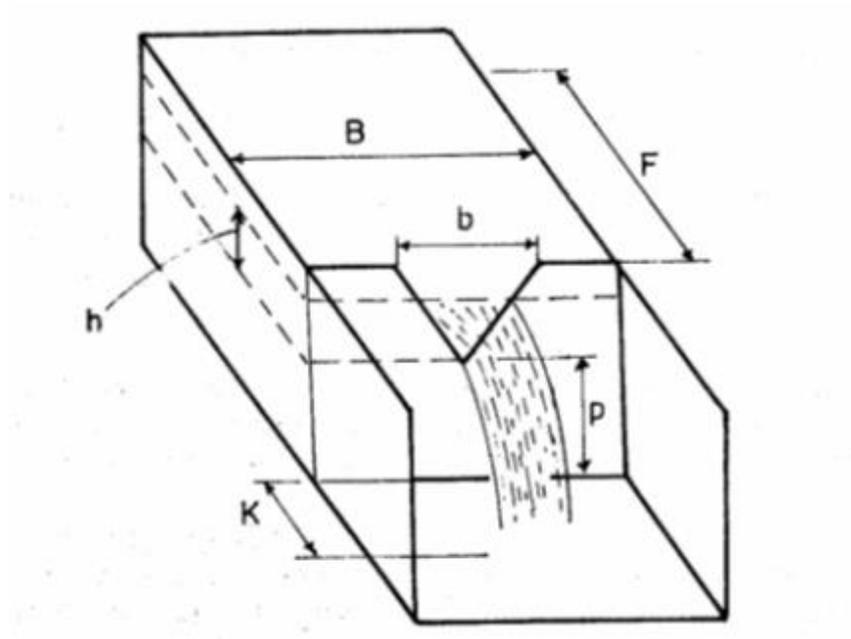


Figura 6. Esquema de la geometría del vertedero instalado en las unidades de escurrimiento B1 y B2





**Figura 7. Instalación de vertedor en unidad de escurrimiento B1.**

Una vez instalados ambos vertedores se hizo la instalación y colocación de los medidores de flujo en un costado, antes de la salida del vertedor. El equipo utilizado para medir el nivel de flujo fue un Levelogger solinst con compensación barométrica.





**Figura 8. Instalación de levelogger en las unidades de escurrimiento.**

En cada evento de precipitación, dependiendo de la cantidad y duración se presentó escurrimiento el cual fue medido por los levelogger y compensado por el barologger, dando como resultado un nivel expresado en metros. La fórmula para calcular el caudal a partir de los datos de nivel obtenido es la siguiente:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \mu \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{2.5}$$

Donde:

Q= caudal (m<sup>3</sup>/s)

g= aceleración de la gravedad m/s<sup>2</sup>

μ= coeficiente de descarga

Θ= ángulo interno del vertedor

H= carga hidráulica (m)

### **Producción de sedimentos**

La estimación de la producción de sedimentos se hizo mediante el uso de la Ecuación Universal Modificada de Pérdida del Suelo (MUSLE), desarrollada por Williams (1975), es un modelo de parámetros agrupados que estima el rendimiento de sedimento de cuencas para un evento pluvioso único. Utiliza un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluviosa del USLE.

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

Dónde:

Y= Rendimiento de sedimento de la cuenca en t.

Q= Volumen de escurrimiento por tormenta en metros cúbicos (m<sup>3</sup>)

q<sub>p</sub>= Velocidad máxima de caudal en m<sup>3</sup>/s

K= Factor de susceptibilidad de erosión del suelo (erodabilidad).

L= Factor de longitud de la pendiente.

S= Factor de magnitud de la pendiente.

C= Factor de cobertura vegetal.

P= Factor de prácticas de apoyo de conservación del suelo.

La aplicación de esta ecuación para la presente investigación es de tipo paramétrico porque se pretende evaluar las pérdidas de suelo por erosión laminar y comparar los resultados en dos tipos de manejo.

#### **Calculo del factor K**

La susceptibilidad de los suelos a erosionarse depende del tamaño de las partículas del suelo, del contenido de materia orgánica, de la estructura del suelo en especial del tamaño de los agregados de la permeabilidad.

Para obtener resultados de textura reales se hicieron 10 muestreos de suelo de aproximadamente 1 kg., distribuidos en ambas unidades de escurrimiento, de cada muestra se obtuvieron resultados de textura y materia orgánica, para después buscar los valores a los que corresponde dicho resultado en la siguiente Tabla:

**Tabla 1. Valores de erosionabilidad de los suelos (K) estimado en función de la textura y el contenido de materia orgánica (Morgan, 1985)**

Textura	% de materia orgánica		
	0.0-0.5	0.5-2.0	2.0-4.0
Arcillo arenosa	0.014	0.013	0.012
Arcillo limosa	0.025	0.023	0.019
Arena	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.010
Arena fina migajosa	0.024	0.020	0.016
Arena migajosa	0.012	0.010	0.008
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena muy fina migajosa	0.044	0.038	0.030

<b>Limo</b>	0.060	0.052	0.042
<b>Migajón</b>	0.038	0.034	0.029
<b>Migajón arcillo arenosa</b>	0.027	0.025	0.021
<b>Migajón arcillo limosa</b>	0.037	0.032	0.026
<b>Migajón arcillosa</b>	0.028	0.025	0.021
<b>Migajón arenosa</b>	0.027	0.024	0.019
<b>Migajón arenosa fina</b>	0.035	0.030	0.024
<b>Migajón arenosa muy fina</b>	0.047	0.041	0.033
<b>Migajón limoso</b>	0.048	0.042	0.033
<b>Arcilla</b>	0.013-0.029		

### *Longitud y grado de pendiente LS*

Este factor considera la longitud y el grado de pendiente. La pendiente media del terreno se obtiene dividiendo la diferencia de elevación del punto más alto del terreno al más bajo entre la longitud del mismo. Esto es:

$$S = \frac{H_f - H_i}{L} * 100$$

Dónde:

S= Pendiente media del terreno (%)

Hf= Altura más alta del terreno (m)

Hi= Altura más baja del terreno (m)

L=Longitud del terreno (m)

Para calcular LS (el factor de grado y longitud de la pendiente) se puede utilizar la siguiente formula:

$$LS = (\lambda)^m (0.0138 + 0.00965S + 0.00138S^2)$$

Dónde:

LS= Factor de grado y longitud de la pendiente

$\lambda$ = Longitud de la pendiente

S= Pendiente media del terreno

m= Parámetro cuyo valor es 0.5

En esta investigación este cálculo se hizo con el apoyo del programa ArcGis, para el cálculo partimos del modelo digital del terreno (DEM), posteriormente se rellenaron los errores que pudiera tener el DEM con la herramienta fill dem.

- Se comenzó calculando la inclinación de las pendientes del terreno en grados con la herramienta Slope.
- Posteriormente con la capa generada se multiplicó por 0.0174532925 para obtener otra capa donde la inclinación de las pendientes esté en radianes, que es con la que se trabajó dado que así lo requiere el modelo.
- Para el cálculo de las longitudes de pendientes se usaron algunas herramientas de la caja Hydrology tools, primero para generar una capa de direcciones de flujo (flow direction) a partir del DEM corregido. Después a partir de las direcciones de flujo se creó una capa de acumulación de flujo (flow accumulation).
- Posteriormente para no sobreestimar los valores de longitud de pendiente (L) (que podrían dar resultados exagerados de erosión) se restringió la longitud de la pendiente a un límite de 150 mtrs de acuerdo con LEYTON (2007). Para esto se hizo una reclasificación de la capa *raster* que representa la acumulación de flujo: Se asigna valor 0 a todos los píxeles cuyo valor inicial fuese superior a 6 y asignamos valor 1 a todos aquellos cuyo valor inicial fuese inferior a 6.
- Se multiplicó la capa resultante por la capa inicial de acumulación de flujo con el fin de obtener una capa *raster* donde los valores de longitud de pendiente inferiores a 6 píxeles (150 metros) tengan valor 1 y los valores superiores a ese límite aparezcan representados por valor 0. Después se generó otra capa donde a los píxeles con valores de acumulación de flujo menores a 6 asignamos valor 0 y a los que tengan una acumulación de flujo mayor a 6 se le asignó el valor 6 (el límite que hemos puesto).
- Finalmente se sumaron las últimas dos capas resultantes y así se obtuvo una capa con las distintas longitudes de pendientes y el límite de 150 mts.

- Una vez hecho esto aplicamos la fórmula de Moore & Burch (1986) para el cálculo del factor LS con la calculadora *raster*:

$$LS = (\text{Flujo acumulado} * \text{Tamaño de celda}/22.13)^{0.4} * (\text{Seno de la pendiente en radianes}/0.0896)^{1.3}$$

### **Factor C: Vegetación**

El factor de protección (C) se estima dividiendo las pérdidas de suelo de un lote con un tipo de vegetación y las pérdidas de suelo de un lote desnudo. Los valores de C son menores que la unidad y en promedio indican que a medida que aumenta la cobertura del suelo el valor de C se reduce y puede alcanzar valores similares a 0.

Para la asignación de los distintos valores del factor vegetación se utilizó el mapa de uso del suelo y vegetación generado anteriormente para que el resultado sea más fehaciente.

Para asignar los valores a la capa nos apoyamos con la siguiente Tabla de valores:

**Tabla 2. Factor C utilizando tipo de vegetación (Lianes, Marchamalo, & Roldán, 2009).**

<b>Tipo de cobertura</b>	<b>Factor C</b>
<b>Agricultura</b>	0.70
<b>Agricultura densa</b>	0.01
<b>Agua</b>	0.00
<b>Asentamiento</b>	0.00
<b>Asentamiento urbano</b>	0.00
<b>Bosque de encino</b>	0.001
<b>Bosque de montaña</b>	0.002
<b>Bosque de pino</b>	0.007
<b>Bosque de pino-encino</b>	0.001
<b>Café</b>	0.09
<b>Canal</b>	1.00
<b>Pastizal inducido</b>	0.10
<b>Pastizal cultivado</b>	0.04
<b>Vegetación riparia</b>	0.01
<b>Sabana</b>	0.01
<b>Selva caducifolia</b>	0.01
<b>Selva perennifolia</b>	0.001

### **Factor P: prácticas de conservación**

Como última alternativa para reducir la erosión de los suelos se tiene el uso de las prácticas de conservación de suelos para no alcanzar las pérdidas de suelo máximas permisibles.

El factor P se estima comparando las pérdidas de suelo de un lote con prácticas de conservación y un lote desnudo y el valor que se obtiene varía de 0 a 1. Si el valor de P es cercano a 0, entonces hay una gran eficiencia en la obra o práctica seleccionada y si el valor es cercano a 1, entonces la eficiencia de la obra es muy baja para reducir la erosión. En la zona de estudio, específicamente la Unidad B2, tiene implementadas diversas obras de conservación, de las cuales se hizo un mapa con área de influencia de cada una de ellas y se le asignó el valor correspondiente.

Los valores de P que se utilizan para diferentes prácticas y obras como el surcado al contorno, surcos con desnivel, surcos perpendiculares a la pendiente, fajas al contorno, terrazas de formación sucesiva construidas en terrenos de diferentes pendientes y las terrazas de banco se tomaron de la siguiente Tabla de valores:

**Tabla 3. Factor de P (SAGARPA, 2001)**

<b>Práctica</b>	<b>Valor de P</b>
<b>Surcado al contorno</b>	0.75-0.90
<b>Surcos rectos</b>	0.80-0.95
<b>Franjas al contorno</b>	0.60-0.80
<b>Terrazas (2-7 % de pendiente)</b>	0.50
<b>Terrazas (7-13 % de pendiente)</b>	0.60
<b>Terrazas (mayor de 13 %)</b>	0.80
<b>Terrazas de Banco</b>	0.10
<b>Terrazas de Banco en contrapendiente</b>	0.05

### *Registro de la producción de sedimentos*

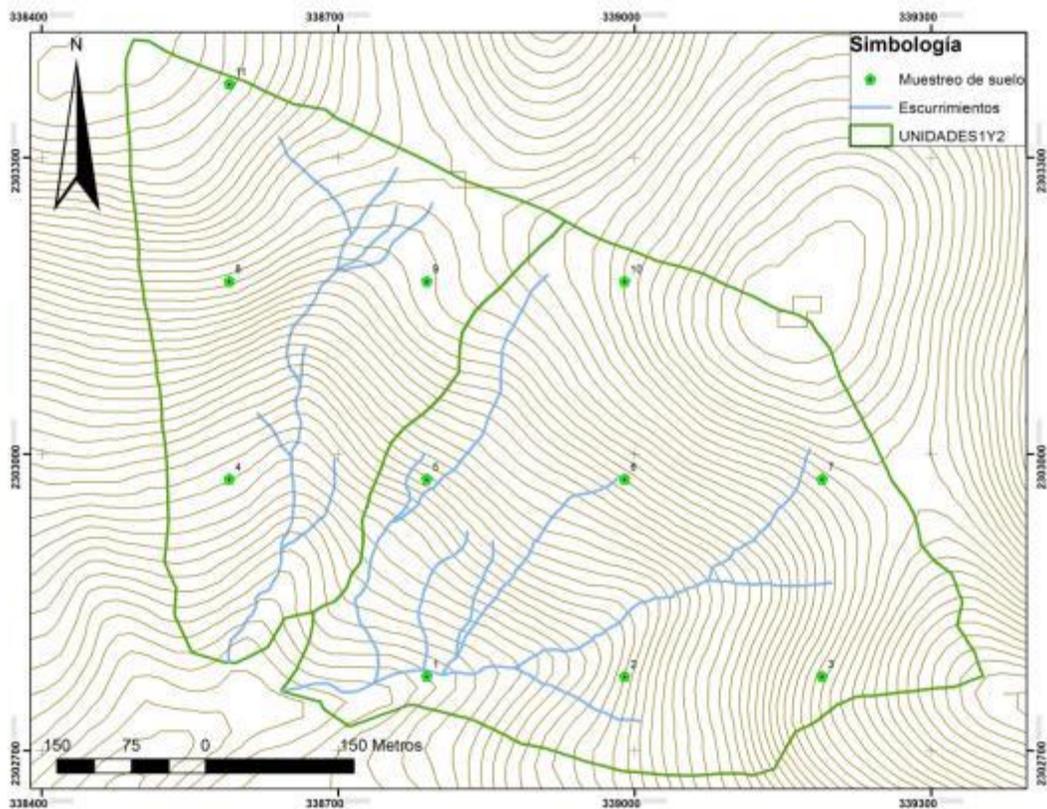
Durante cada evento de lluvia se genera sedimento superficial, por ello se registró en cada evento de precipitación la cantidad de sedimento almacenado en cada canal vertedor de las unidades de escurrimiento.

Una parte importante en el registro de la información fue la instrumentación para poder llevar a cabo esta actividad, primero se hizo el diseño del vertedor que permitiera el almacenamiento de sedimento, para ello se instaló un vertedor triangular, para medir el gasto y los sedimentos almacenados.

Para poder estimar los kilogramos perdidos por hectárea se hicieron muestreos de suelo en ambas unidades de escurrimiento, los cuales se describen a continuación.

### *CALCULO DEL FACTOR K*

Para la evaluación del factor erodabilidad se tomaron los rasgos físicos solicitados por el modelo, para ello se hicieron 11 muestreos de suelo distribuidos en ambas unidades de escurrimiento, los puntos de muestreo se muestran en la siguiente Figura:



**Figura 9. Sitios de muestreo de suelo.**

Las muestras obtenidas se analizaron en laboratorio, para textura se siguió el método de bouyucos en el cual el proceso fue: pesar 50 g de suelo seco, se pasa a un Erlenmeyer adicionando 10 mL de dispersante, se dejó reposar durante unos minutos y se agitó por 2 horas. La suspensión del suelo se vertió en el cilindro de 1000 mL, con agua destilada llevar el nivel del agua hasta la marca inferior del cilindro con el hidrómetro dentro, se agitó vigorosamente y se sumergió el hidrómetro a los 40 segundos se tomó la lectura del hidrómetro y la temperatura, dejamos el recipiente quieto que no se perturbe la solución y pasadas 2 horas se volvieron a tomar las medidas.



**Figura 10. Análisis de textura del suelo**

Además del vertedor otra parte fue la instalación de estaciones climatológicas para registrar los eventos de precipitación y la cantidad precipitada, y comparar esta cantidad con la cantidad de sedimentos entre otras más variables medidas.

Las estaciones instaladas fueron Vantage Pro2 inalámbrica, la cual mide presión barométrica, humedad interior, humedad exterior, punto de rocío, lluvia, temperatura interior, temperatura exterior, velocidad de viento y dirección de viento.



**Figura 11. Estación climatológica Vantage Pro2.**

Las estaciones se instalaron en tres puntos a lo largo de las unidades de escurrimiento, una en la parte más alta, otra en la parte media y una finalmente en la parte baja, esto para observar alguna diferencia en precipitación y temperatura y de haberla formar un gradiente.



**Figura 12. Estación instalada en unidades de escurrimiento de la microcuenca La Joya.**

El procedimiento que se siguió para el registro de estos sedimentos se describe en seguida:

- a) En cada evento de precipitación, se corrobora que existiera sedimento almacenado en los vertedores.
- b) En caso afirmativo, este se extrajo con contenedores de volumen conocido ( $0.0019 \text{ m}^3$ ).
- c) Se hizo el conteo del número de contenedores que se necesitaron para vaciar cada vertedor y se sacó el volumen total de sedimento descargado por unidad de escurrimiento.

### **Humedad del suelo**

La humedad del suelo se estimó con el método de reflectometría, el cual se basa en la relación existente entre la humedad del suelo y su constante dieléctrica, el agua contiene una constante dieléctrica mucho más alta que la del suelo, por lo que la constante dieléctrica del suelo húmedo dependerá principalmente de su contenido de humedad. La constante dieléctrica del suelo se mide aplicando al

suelo una onda electromagnética de alta frecuencia y midiendo la velocidad de propagación, a mayor humedad, menor será la velocidad de la onda (Dasberg & Dalton, 1985).

Esta medición se hizo con una sonda fieldScout-TDR-300 (Figura 13), la cual contiene un sensor de dos varillas que se introducen en el suelo, son de acero inoxidable, por el tipo de suelo (suelos someros) se usaron las varillas de 12 cm de longitud, las sondas se conectan al aparato de medida mediante un cable coaxial.



**Figura 13. Sonda TDR-300 para medición de humedad en las unidades de escurrimiento de la microcuenca La Joya.**

Para definir los puntos de muestreo de humedad, se partió del mapa de uso de suelo y vegetación, para primero definir transectos y posteriormente puntos de muestreo. Los transectos se definieron de manera vertical en función del relieve, una vez definidos los puntos de muestreo, se procedió a tomar las muestras en cada uno de estos puntos, los muestreos se hicieron de manera mensual para poder observar los cambios en contenido de humedad de ambas unidades en distintas épocas del año. La información del contenido de humedad en el suelo sirvió como base para la elaboración de mapas de humedad mensuales.

#### **Percepción y participación de la población**

Las obras y prácticas de conservación del área de estudio se han desarrollado con apoyo de la comunidad de la Joya y son ellos quienes en conjunto con el CRCC

han decidido qué y dónde estarán los diferentes proyectos de conservación. Por esta razón es importante conocer y reflejar con medios tangibles la información que tradicionalmente se transmite de manera oral. Los métodos visuales como los mapas facilitan la incorporación de este tipo de fuentes de información, consiguiendo fomentar la participación de un mayor número de personas, a la vez que aumenta el dialogo y la negociación.

La percepción de la población acerca de la evolución de su territorio posterior a la implementación de las diferentes obras y prácticas de conservación, resulta un parámetro sustancial para evaluar la eficiencia de dichas obras. Para esto, se ha seleccionado como herramienta de apoyo a la cartografía participativa, la cual tiene como principal característica que la comunidad es la encargada de hacer los mapas de su territorio, pues nadie mejor que ella conoce su entorno. Quien habita el territorio es quien lo conoce y esos conocimientos se pueden plasmar en un mapa. Los mapas generados a través de la cartografía participativa serán reflejo de la percepción que tiene la comunidad sobre su territorio es la que conoce mejor sus recursos, relaciones sociales, potenciales y límites.

### *Historia oral*

Para la obtención de datos antecedentes de la degradación de la zona de estudio, se hicieron entrevistas no dirigidas a diferentes actores de la microcuenca, permitiendo la espontaneidad del sujeto entrevistado. El objetivo de la entrevista fue indagar sobre el proceso, evolución y resultados de las obras y prácticas de conservación establecidas en el área de estudio. De manera particular interesaba conocer el impacto de las obras y prácticas de conservación, el tipo de resultados obtenidos con la implementación de las mismas, el grado de convencimiento sobre la implementación de ellas y el grado de involucramiento de los actores en el proyecto.

- a) Temas a abordar en la entrevista
  - Cuáles fueron las causas de degradación de la zona.

- Como era el paisaje en la zona de estudio en el periodo más antiguo que se recuerde.
- Como fue la implementación de los diferentes proyectos de obras y prácticas de conservación.
- Cuál era la opinión que tenía de las diferentes prácticas previo a su implementación.
- Qué resultados ha observado desde la implementación de las obras y prácticas de conservación.

b) Marco poblacional y elección del tipo de muestra y determinación de su tamaño.

En el área de estudio no hay población establecida, sin embargo, la comunidad de la Joya tiene inferencia sobre este territorio, pues pertenece a las tierras de uso comunal del ejido al que la población de la Joya pertenece. Se seleccionaron a personas de edad avanzada y con conocimiento del área de estudio, esto con el fin de recabar información de mayor antigüedad posible, para poder hacer una reconstrucción de cómo ha sido el uso y aprovechamiento del territorio y sus recursos naturales. En la joya se hicieron 5 entrevistas y con uno de los actores seleccionados se hizo un recorrido por el área de estudio, durante el cual se fue contando y reconstruyendo la evolución del territorio.

c) Recolección de la información

Para la recolección de la información, se hicieron diversas visitas a la comunidad durante el mes de junio de 2016, el primer acercamiento fue con Doña Rosa, miembro del grupo operativo del CRCC, posteriormente se entrevistó a Don Roberto y Doña Elizabeth, quienes además de tener amplio conocimiento del territorio, adoptaron con éxito una de las prácticas de conservación, el huerto familiar, por medio de ellos se tuvo un acercamiento a otro actor Don José, quien es poseedor de amplio conocimiento de la zona, pues goza del uso de este territorio y además de esto su vivienda colinda con el área de estudio. Finalmente se acordó un recorrido por el área de estudio con Don Agustín, también habitante

de la comunidad de la Joya y con conocimiento sobre el estado de la zona y su evolución por, por lo menos 50 años.

d) Revisión de la información e interpretación de resultados.

En esta fase después de aplicadas las entrevistas, se procedió a revisar la información e interpretarla de acuerdo con su estructura y los objetivos de la investigación.

### ***Cartografía participativa***

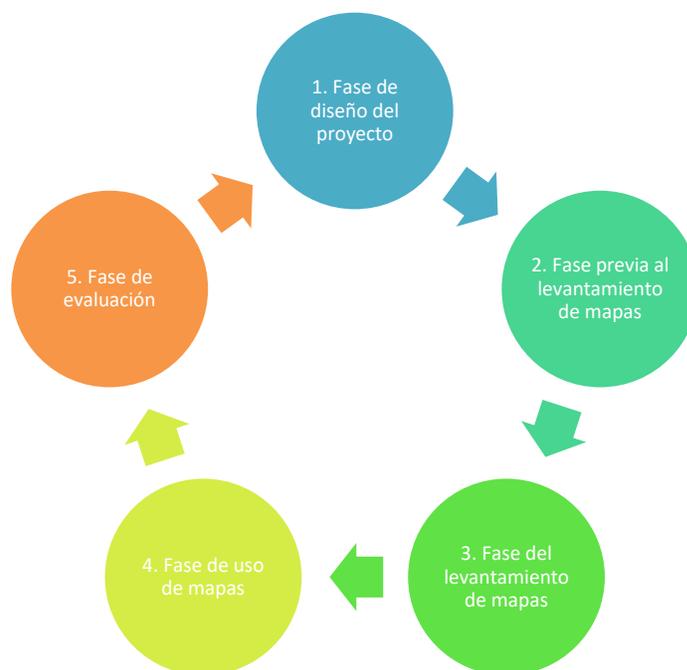
La comunidad elaboró dos mapas, uno del pasado y uno de situación actual, a través de ellos la comunidad pudo reflexionar y descubrir su territorio y el cambio que ha tenido con la implementación de las obras y prácticas de conservación.

En el mapa del pasado se hizo un ejercicio de memoria colectiva, con el cual el objetivo principal fue reconocer el territorio que la comunidad considera históricamente suyo y con ello hacer un repaso de lo que ha ocurrido en la comunidad. En el mapa del presente se reflejó la situación actual, pudiendo con este hacer una comparación con el pasado para visualizar los cambios ocurridos y con ello imaginar una meta a la cual se puede llegar.



**Figura 14. Taller de cartografía participativa con habitantes de la Joya.**

La metodología que se siguió es la propuesta por el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA, 2010), la cual consta con de cinco fases que se pueden observar en la siguiente Figura:



**Figura 15. Enfoque del FIDA relativo a la cartografía participativa**

Las etapas para la implementación de cartografía participativa constan de las siguientes fases:

1. Fase de diseño: Análisis de la situación, determinación de problemas relativos a la gestión de los recursos naturales, asignación de recursos.  
En esta primera etapa se identificaron y seleccionaron a los pobladores involucrados en la actividad de cartografía participativa, así como los instrumentos de apoyo y herramientas cartográficas.
2. Fase previa al levantamiento de mapas: Validación del diseño, confirmación de los instrumentos, determinación de las necesidades, seguimiento, capacitación adquisición de materiales.  
Se hizo una validación del diseño de la actividad por los facilitadores que participen, así como el enfoque.
3. Fase de levantamiento de mapas: Preparación de la comunidad, definición de los propósitos, capacitación de la comunidad, elaboración del mapa, evaluación de la información. Establecimiento del mecanismo de seguimiento.

En esta etapa se hizo la divulgación del proyecto entre la comunidad, además se definió la fecha para la capacitación para la producción de la cartografía a las personas que participaron en la actividad

4. Uso de mapas y adopción de decisiones: apoyo de iniciativas en materia de gestión de los recursos naturales, comunicación a las partes interesadas, influencia en la planificación.

Se obtuvo una comparación de cómo percibe la población la evolución de su territorio con el uso e implementación de obras y prácticas conservacionistas, además se identificaron las obras y prácticas que, según su apreciación, tienen mayor impacto.

5. Evaluación: evaluación por la unidad de gestión del proyecto, evaluación por las comunidades, evaluación administrativa.

Se pudo definir el seguimiento y evaluación del proyecto por parte de la población e interesados, durante todas las fases.

Esta actividad sirvió para identificar cualquier tema que pueda ayudar a tomar conciencia del territorio y su uso. No solo será la generación de mapas, sino también de una herramienta para la prevención y resolución de conflictos en torno al uso de la tierra y sus recursos naturales mediante el dialogo de los participantes.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Fase 1: Evaluación

En este apartado se presentan los datos del sitio de investigación, la caracterización ambiental y morfométrica, así como la distribución de las diferentes obras y prácticas de conservación establecidas en la unidad de escurrimiento B2.

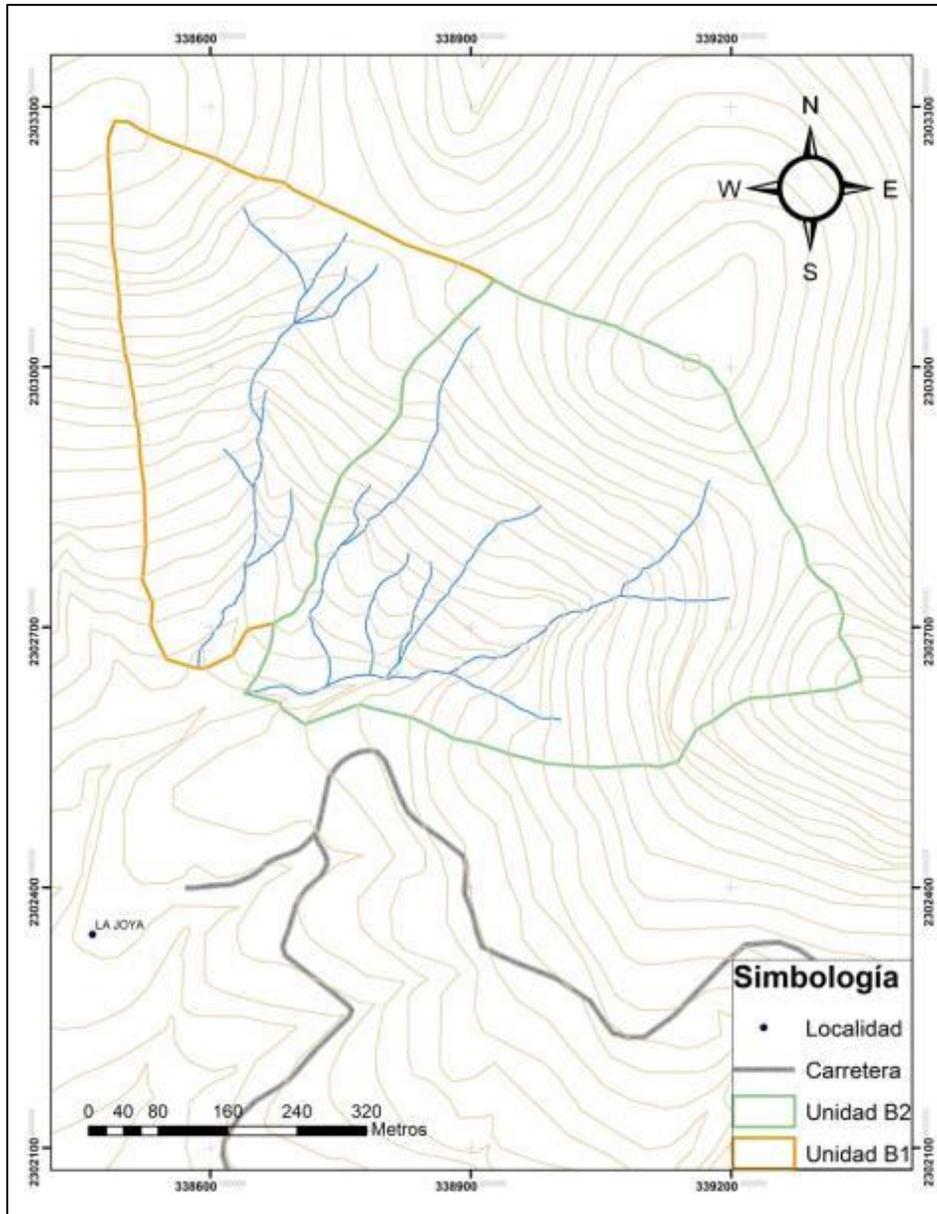
#### Caracterización del área de estudio

##### **UBICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES DE ESCURRIMIENTO**

La delimitación de la zona de estudio se elaboró de forma manual con apoyo del modelo de elevación digital y el *shape* de curvas de nivel correspondientes a la zona de estudio. Primero se identificaron los puntos de salida de las unidades de escurrimiento B1 y B2 y se tomó su respectiva coordenada con apoyo de un GPS, posteriormente, esta información se descargó en el programa *ArcGis* y a partir de estos puntos y con apoyo del DEM y curvas de nivel se procedió a digitalizar los parteaguas de ambas unidades.

Se seleccionaron dos unidades de escurrimiento cercanas una de la otra, se eligieron porque en una de ellas están establecidas las obras y prácticas de conservación y en la otra no.

En la Figura 16 se presenta la ubicación de las unidades de escurrimiento y se puede observar la cercanía con la carretera principal de la zona y la población más cercana, estos aspectos la hacen de fácil acceso, facilitando la toma de información, vigilancia y cuidado de equipos utilizados.



**Figura 16. Ubicación de las unidades de escurrimiento seleccionadas para evaluar obras y prácticas de conservación.**

Una vez definidos los parteaguas de las unidades de escurrimiento se calcularon los datos básicos, área, perímetro y longitud del cauce principal, los cuales se enlistan en la siguiente Tabla:

Tabla 4. Parámetros físicos de las unidades de escurrimiento B1 Y B2 requeridos para determinar las características morfológicas.

Nombre y unidades del parámetro	Unidad sin obras de conservación	Unidad con obras de conservación
Superficie (ha)	15.4	24.6
Longitud del cauce principal (m)	610.22	639.78
Perímetro (km)	1.74	2.03

**DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LAS UNIDADES DE ESCURRIMIENTO**

Morfometría	Unidad Sin	Clasificación	Unidad Con	Clasificación
Perímetro (km)	1.74	-	2.03	-
Longitud del cauce principal (m)	610.22	Corto	639.78	Corto
Ancho de la unidad (m)	470.8	-	624.4	-
Elevación media (msnm)	2521.32		2519.27	
Área (Ha)	15.4	Muy pequeña	24.6	Muy pequeña
Altitud máxima (msnm)	2612	-	2634	-
Altitud mínima	2382	-	2381	-
Desnivel	230	Bajo	253	Bajo
Factor de forma (Kf)	0.38	Ni alargada ni ensanchada	0.49	Ligeramente ensanchada
Coefficiente de compacidad (Kc)	1.24	Redonda a oval redonda	1.14	Redonda a oval redonda
Proporción de elongación (Pe)	0.72	Poco alargada	0.81	Poco alargada
Pendiente media de la unidad (%)	35.9	Escarpado	41.3	Escarpado
Pendiente media del cauce principal (%)	37.6	-	39.5	-
Orden	3	Medio	3	Medio
Relación de bifurcación (Rb)	2.75		3	
Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	7.33		8.33	
Densidad de corrientes (Nc/km <sup>2</sup> )	64.9		44.7	
Tiempo de concentración (min)	19.63	Rápido	19.6227	Rápido

Al analizar las características morfométricas de las unidades de escurrimiento B1 y B2 de la microcuenca la Joya, podemos observar en primer lugar las pendientes

del cauce principal 37.6 y 39.5, y las pendientes medias de las unidades de 35.9 y 41.3 respectivamente, resultados que pueden ser asociados a quebradas torrenciales y relieve escarpado. Los valores antes señalados favorecen la capacidad de arrastre de sedimentos e incrementan la velocidad del caudal en caso de tormentas. Llama la atención el valor elevado de densidad de drenaje para ambas unidades de escurrimiento, reflejo de unidades bien drenadas que generan una buena respuesta hidrogeomorfológica, indica también presencia de materiales erosionables, suelos impermeables con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal. Lo anterior coincide con el resultado obtenido de factor de forma de Horton con valores de 0.38 para la unidad B1 y 0.49 para la unidad B2, estos valores pudieran generar rapidez en la concentración de aguas superficiales, el orden de corrientes es tres para ambas unidades, este valor corresponde a un orden medio (Figura 17).

Finalmente, el tiempo de concentración enfatiza los resultados anteriores, ya que los valores obtenidos son 19.63 min para la unidad B1 y 19.62 min para la unidad B2, ambos valores son muy similares e indican un tiempo de concentración rápido.

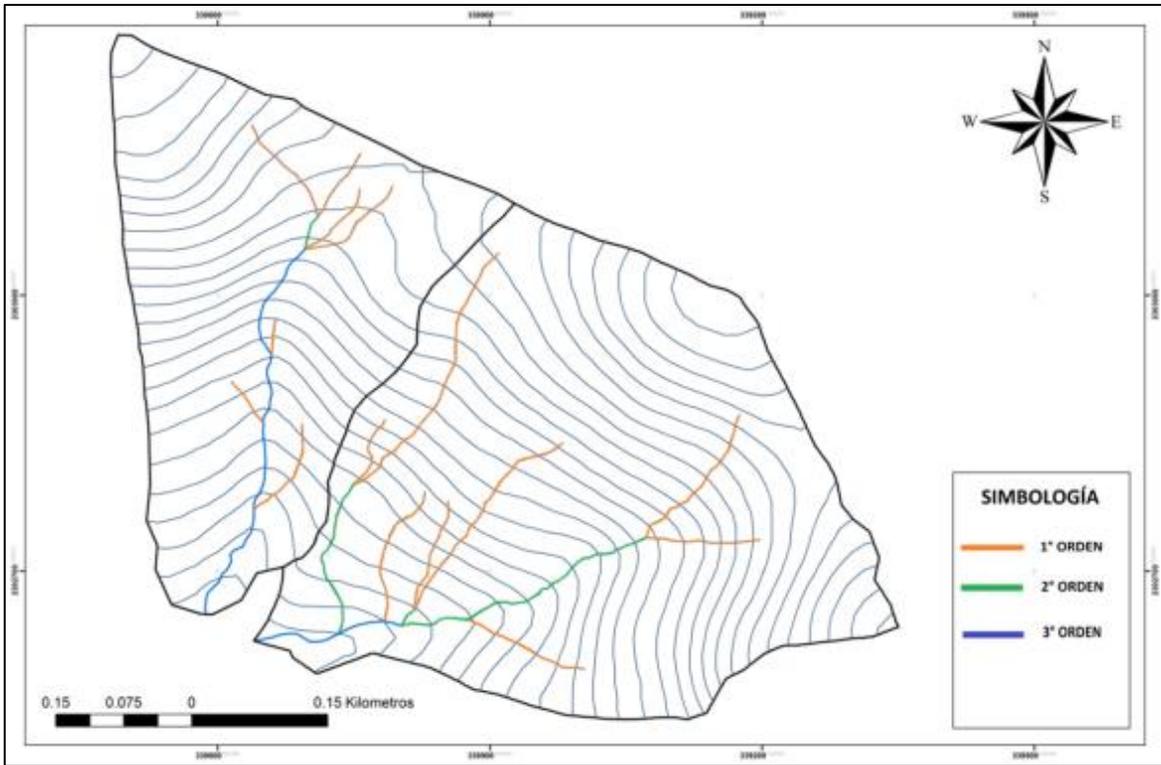


Figura 17. Orden de corrientes unidades B1 y B2.

### CURVA HIPSOMÉTRICA

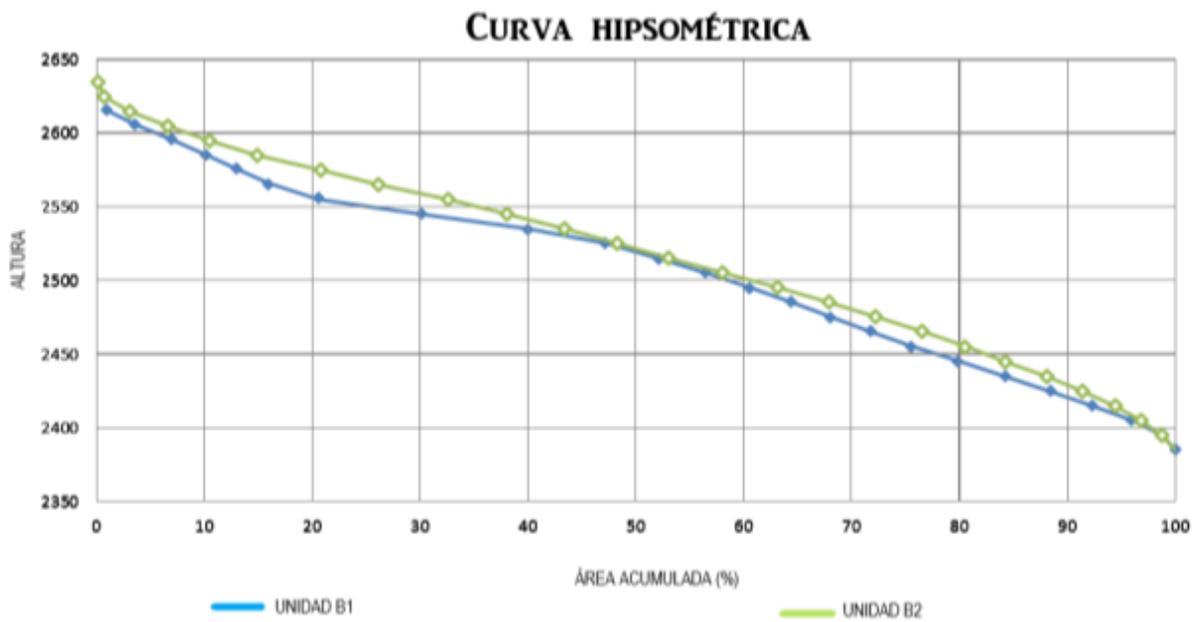
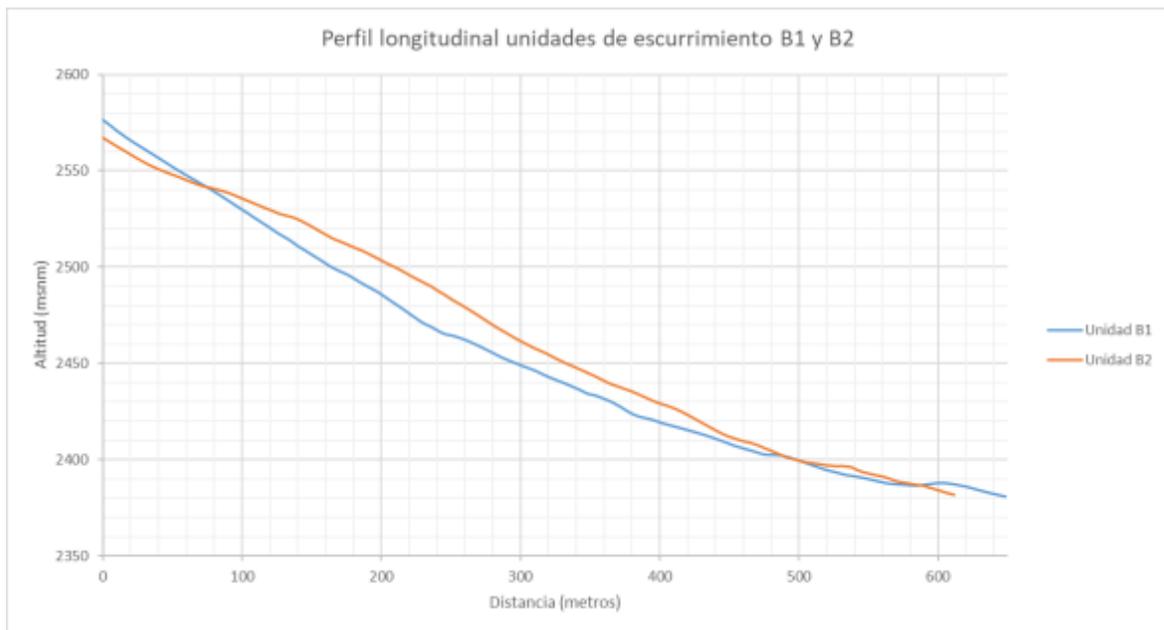


Figura 18. Curvas hipsométricas unidades de escurrimiento B1 (control) y B2 (con manejo).

Como puede observarse en la gráfica anterior, ambas unidades se encuentran en etapa de equilibrio o intermedia entre la fase de equilibrio relativo o madurez y la fase de desequilibrio o juventud, obviamente en evolución hacia la etapa de madurez. Esto implica un potencial erosivo de atención y cuya evidencia es posible apreciar observando las cárcavas existentes y el azolve que se deposita en los vertedores después de cada evento de precipitación.

### PERFIL LONGITUDINAL



**Figura 19. Perfiles longitudinales unidades de escurrimiento B1 (control) y B2 (con manejo).**

La velocidad del flujo del agua en los cauces está estrechamente relacionada con la energía cinética, la cual es el agente que genera la morfogenética fluvial. De ella depende la capacidad de erosión y transporte fluvial y de acumulación aluvial.

Para las unidades B1 y B2 podemos observar que sus afluentes tienden hacia un perfil en equilibrio, es decir, la energía es justa para transportar la carga de materiales, pero no presenta zonas muy inclinadas o irregulares.

## DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

### Clima

El clima en las unidades de escurrimiento se caracteriza por un verano cálido. La temperatura media anual es de 16.1°C. Los meses más calurosos son abril y mayo, alcanzando temperaturas máximas de 36°C, en tanto los más fríos son los meses de diciembre y enero, en los que se registran temperaturas mínimas de -2°C.

La precipitación media anual es de 602.2 mm. Los datos de precipitación y temperatura promedio para la comunidad de la Joya se pueden observar en el siguiente climograma:

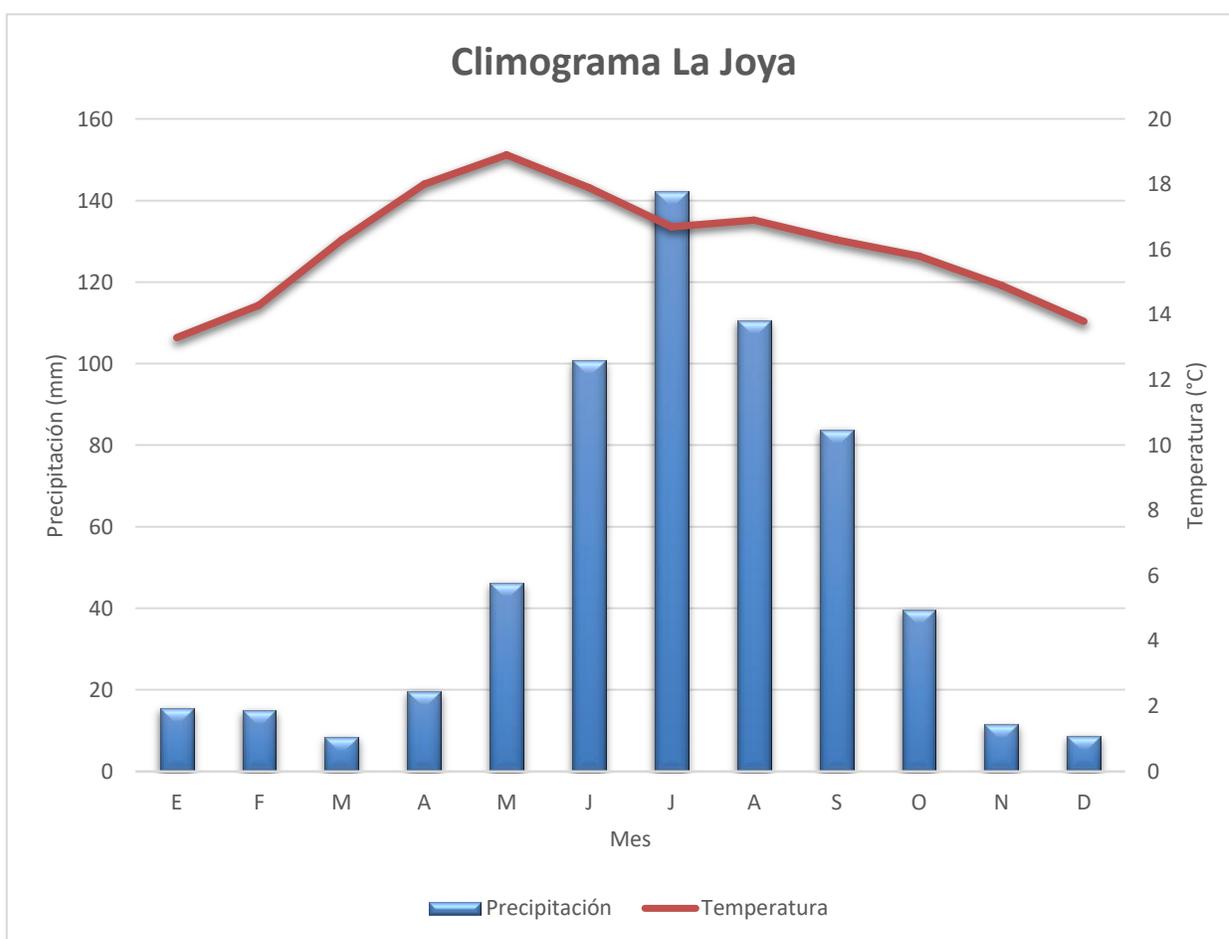
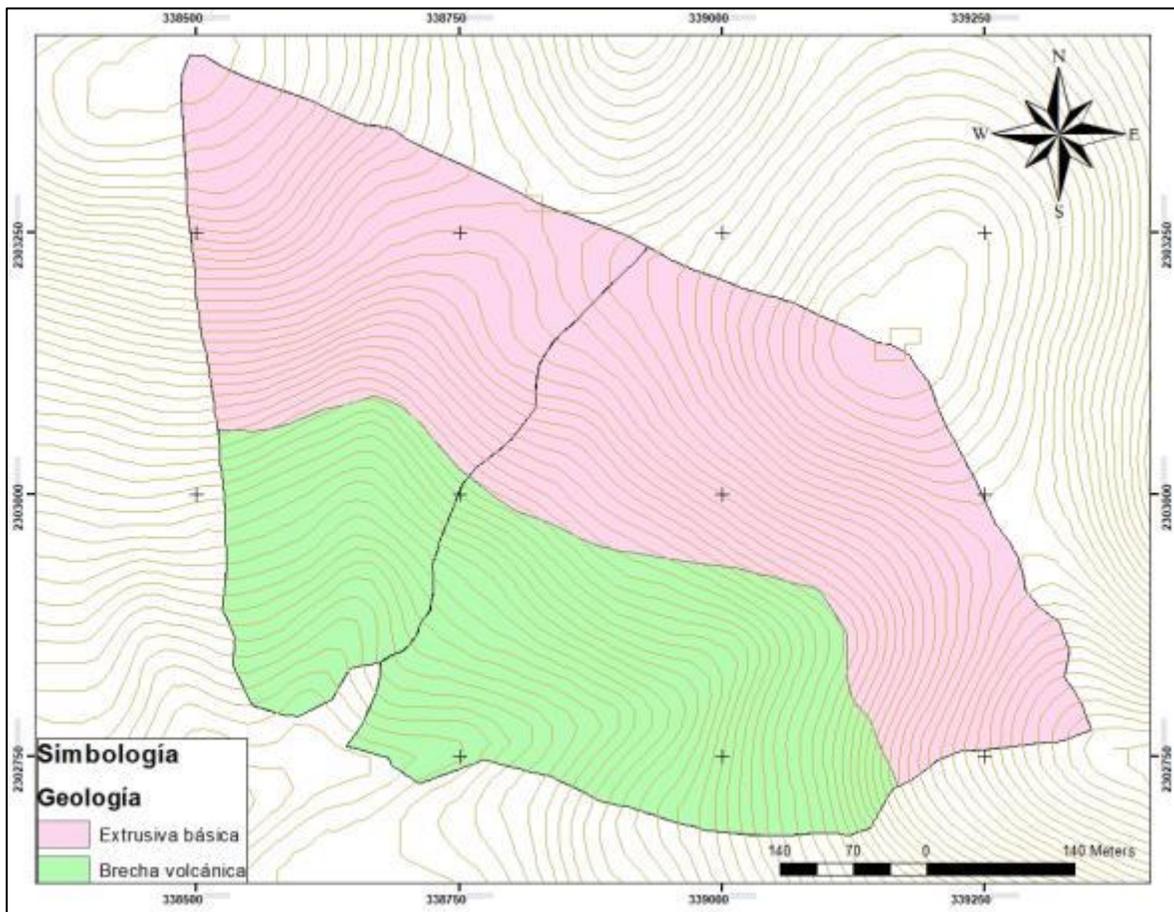


Figura 20. Climograma del sitio La Joya.

Según el climograma anterior se puede observar que el clima para el sitio de estudio es BSk, que corresponde a un clima semiseco templado con verano cálido, también se puede observar que carece del fenómeno de canícula o sequía intraestival, ya que la precipitación forma una campana.

### Geología

Las unidades de escurrimiento se ubican sobre dos tipos de roca, ambas de tipo ígneo, lo cual corresponde a que la zona es un antiguo cráter volcánico, se puede observar su distribución en la siguiente Figura:



**Figura 21. Mapa geológico de las unidades de escurrimiento B1 y B2.**

En la parte más elevada podemos encontrar roca extrusiva básica, formada por el enfriamiento de la lava, la cual al enfriarse rápidamente forma rocas volcánicas de grano fino como el basalto, hacia la parte media y baja de las unidades de

escurrimiento hay un cambio de roca, la brecha volcánica, constituida por la descomposición de rocas volcánicas que fueron cementadas por la lava de las erupciones.

### Edafología

Los tipos de suelos en la microcuenca La Joya varían a pesar de la homogeneidad de las rocas y su origen volcánico y esto se debe a que la microcuenca se encuentra inmersa en el cono de un volcán. De acuerdo con Barrientos (2013), en la zona de estudio predominan los suelos de tipo cambisol, leptosol y regosol (Figura 22). Los cambisoles son suelos jóvenes con un horizonte subsuperficial un tanto incipiente, pero con posibilidad de albergar vida y estimular el crecimiento de organismos, son suelos carentes de un régimen de humedad árido y propiedades hidromórficas en los primeros 50 cm de profundidad.

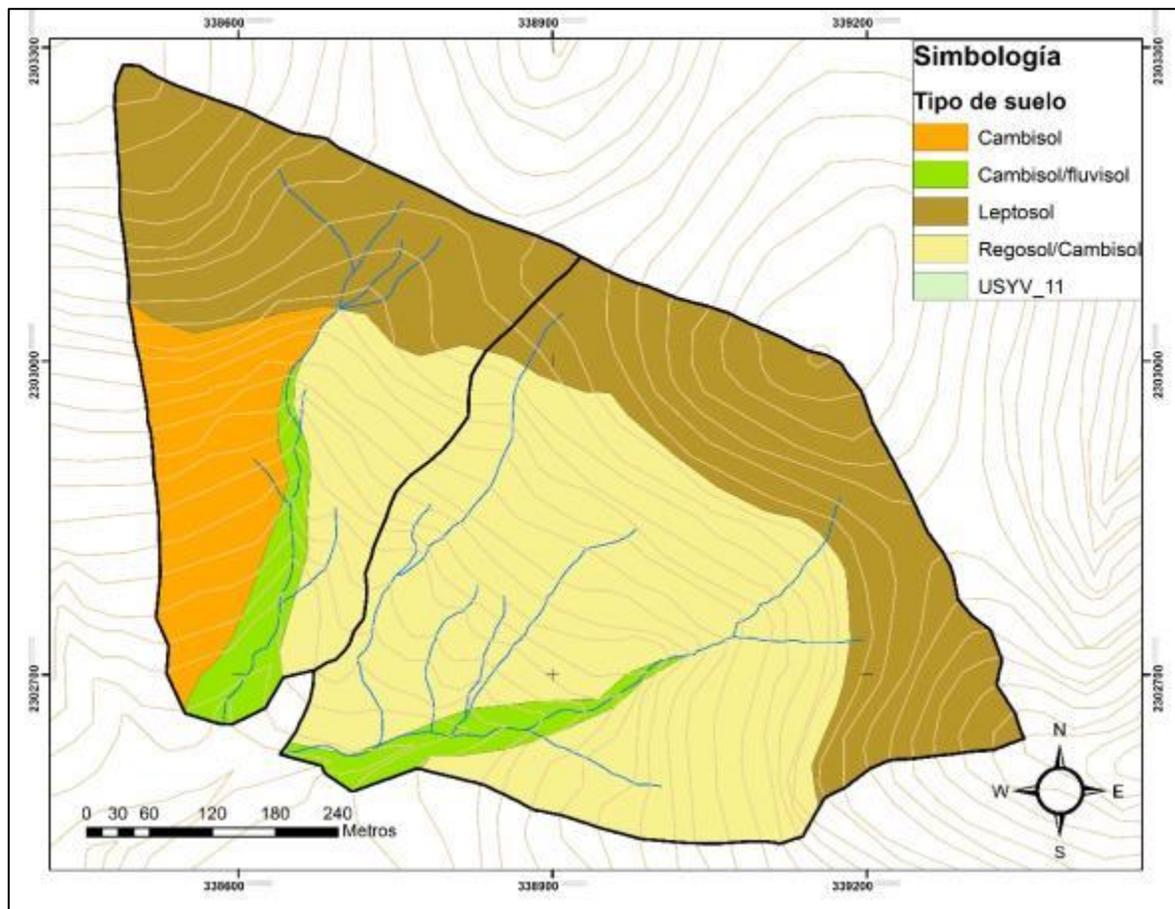


Figura 22. Mapa edafológico de las unidades de escurrimiento B1 y B2.

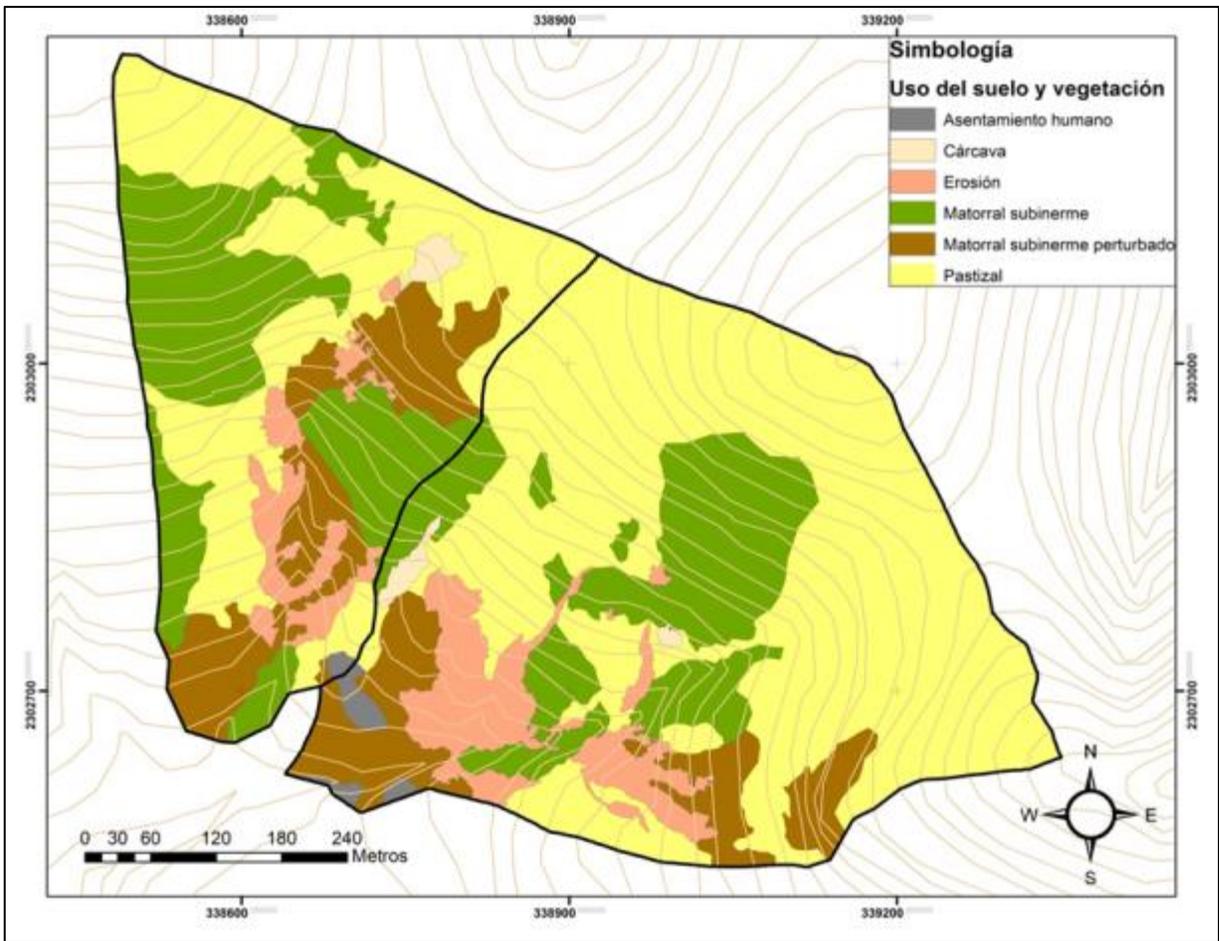
El siguiente grupo de suelos que encontramos en la parte más elevada es el leptosol, el cual corresponde a un suelo delgado, aparece normalmente en zonas altas y con topografía escarpada, particularmente en áreas fuertemente erosionadas, como es el caso. Son suelos poco atractivos para el establecimiento de cultivos, lo ideal es mantenerlos bajo bosque, por ello la importancia de la reforestación y conservación en esta área.

Hacia la parte media de ambas unidades de escurrimiento predomina el tipo de suelo regosol, este tipo de suelo se desarrolla sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina, son comunes en zonas áridas y en regiones montañosas, el uso de este tipo de suelos varía según las condiciones, en casos donde existe riego se puede utilizar para pastoreo, sin embargo, en las condiciones del área, es preferible mantenerlos bajo bosque para evitar si erosión.

Por ultimo hacia las zonas donde se ubican las corrientes principales de las unidades B1 y B2, encontramos suelos con características de cambisoles pero también con características de fluvisoles, los cuales se asocian a condiciones fisiográficas muy concretas, condicionadas por la estructura geomorfológica de ambientes ligados a la acción del agua, una de las características de los fluvisoles es el aporte más o menos continuo de sedimentos por parte de las avenidas de agua, por tanto su desarrollo edafo-genético es escaso.

#### Uso del suelo y vegetación

Para identificar los usos del suelo actuales, se hizo una clasificación propia debido a que el área de estudio es muy pequeña y las fuentes oficiales proporcionan información a escala mayor, La clasificación se hizo a partir de una imagen satelital en color real y posteriormente se corroboró la información obtenida con recorridos de campo. En la Figura 20 se puede observar el mapa de uso del suelo y vegetación de las unidades B1 y B2 de la microcuenca La Joya, donde predomina la superficie de pastizal en ambas unidades seguido del matorral sub-  
inermé.



**Figura 23. Mapa de uso del suelo y vegetación de las unidades de escurrimiento B1 y B2.**

Las superficies y porcentajes de los diferentes usos del suelo y vegetación se describen en la Tabla 5, cabe señalar que el estado del pastizal para la unidad B2 que cuenta con obras de conservación respecto a la unidad B1, es cualitativamente más prominente, derivado de los trabajos de recuperación de suelos que han propiciado un impacto favorable en el estado de los diferentes tipos de vegetación.

Tabla 5. Superficie y porcentaje de los usos de suelo y vegetación de las unidades B1 y B2.

Descripción	Superficie (ha) y % por unidad			
	Unidad testigo		Unidad con manejo	
	ha	%	ha	%
<b>Matorral subinerme</b>	5.28	34.28	4.62	18.75
<b>Matorral subinerme perturbado</b>	2.73	17.73	2.46	9.98
<b>Pastizal</b>	6.11	39.70	14.87	60.39
<b>Erosión</b>	1.07	6.98	2.24	9.12
<b>Cárcava</b>	0.158	1.06	0.17	0.72
<b>Asentamiento humano</b>	0.04	0.29	0.24	1.01
<b>Total</b>	15.4 ha	100	24.6 ha	100

#### Acciones de conservación y restauración de suelo y vegetación

Con información proporcionada en por el CRCC y recorridos de campo se integró un mapa y su correspondiente base de datos sobre los trabajos de conservación establecidos en la unidad de escurrimiento B2 durante los pasados 7 años.

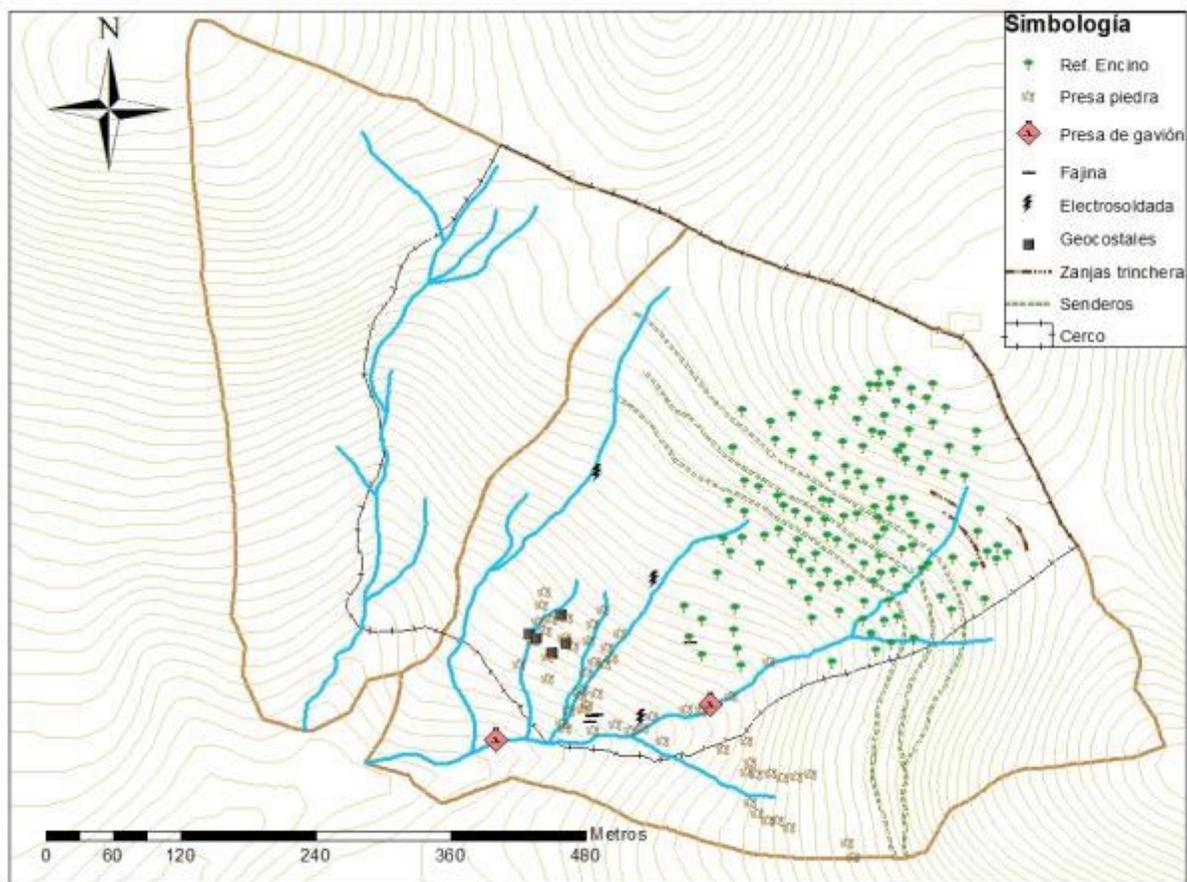


Figura 24. Mapa de ubicación de las obras y prácticas de conservación de suelos y agua en las unidades de escurrimiento B1 y B2.

### REFORESTACIÓN

La reforestación se efectuó asociada a diferentes sistemas de preparación, como primera reforestación se establecieron líneas de nopal (*Opuntia* sp), para posteriormente establecer reforestación con encino (*Quercus* sp). El estado de estas prácticas se muestra en la siguiente Figura:



**Figura 25. Reforestación con Encinos (*Quercus* sp) en la unidad B2 de la microcuenca La Joya**

Las prácticas de reforestación fueron respaldadas con más obras respondiendo a las necesidades que hay en la microcuenca la Joya de tratar áreas degradadas con afloramiento de material parental, de modo que se aumentara la infiltración del agua de lluvia y la retención de humedad del suelo, con la finalidad de asegurar una mayor sobrevivencia de las reforestaciones realizadas, además con la asociación de obras de conservación se pretendía reducir los índices de mortandad en las diferentes plantaciones.

### **ZANJAS TRINCHERAS**

Esta obra se constituyó en la parte alta de la unidad de escurrimiento B2, con la finalidad de captar agua, almacenarla y propiciar su infiltración en el suelo, recargar el acuífero y disminuir la erosión, en la unidad B2 se cuenta con tres zanjas trincheras continuas.



**Figura 26. Zanja trinchera al límite de capacidad.**

### ***TINAS CIEGAS***

En la parte alta de la unidad de escurrimiento B2 se hicieron diversas excavaciones siguiendo la curva de nivel, para capturar la escorrentía y permitir su infiltración, ayudar a mantener la humedad para ser aprovechada por las reforestaciones establecidas y controlar la erosión laminar.



**Figura 27. Modelo de tina ciega.**

### ***CERCO DE EXCLUSIÓN***

Uno de los problemas principales en la zona es el sobrepastoreo, por ello como medida de conservación se implementó un cerco de exclusión, con el cual se ha evitado la amenaza a la conservación y regeneración de la vegetación, este cerco abarca en mayor medida la unidad B2, la cual contiene las diferentes obras y prácticas de conservación.



**Figura 28. Cerco de exclusión de pastoreo.**

### ***SENDEROS INTERPRETATIVOS***

Con la finalidad de recorrer el área con mayor facilidad y seguridad se establecieron tres senderos interpretativos de forma lineal, los cuales además de permitir a los visitantes observar las diferentes obras y apreciar las señaléticas con descripción de los trabajos que se tienen, sirven también como reductores de avenidas de agua, y promotores de la infiltración de agua, pues se puede observar

una mayor humedad en el suelo y crecimiento de especies a los lados de los senderos.



**Figura 29. Senderos interpretativos, unidad B2.**

Adicionalmente, se elaboraron distintas obras, donde el objetivo principal era la disminución de escurrimiento superficial, mejorar la infiltración, disminuir la erosión y el socavamiento en cárcavas existentes, las distintas obras de conservación en materia hidráulica se describen a continuación:

### ***PRESA DE GAVIÓN***

Se tienen dos presas de gavión establecidas permanentemente en las cárcavas más prominentes, estas presas están elaboradas con alambre galvanizado y el objetivo principal es disminuir la velocidad de escurrimiento y su poder erosivo, retener azolves y estabilizar estas cárcavas evitando su crecimiento en profundidad y anchura, cabe señalar que una de ellas, al llegar a su límite de retención de azolve ha permitido atenuar una barranca, permitiendo el paso peatonal y vehicular.



Figura 30. Presa de gavión, en la unidad de escurrimiento B2.

### ***PRESA DE MALLA ELECTRO SOLDADA***

En la unidad B2 se cuenta con tres presas de malla electro soldada para controlar la erosión de cárcavas. Estas presas son similares a las presas de gaviones, solo que estas no son prefabricadas, sino que se armaron en el lugar, siguiendo las características de las cárcavas.

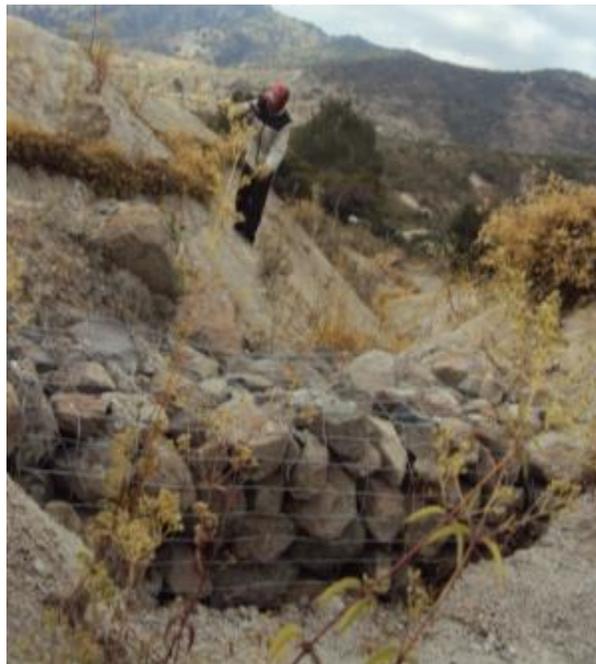


Figura 31. Establecimiento de presa de malla electrosoldada.

### ***PRESA DE PIEDRA ACOMODADA***

Aprovechando las rocas en el sitio de estudio, se establecieron alrededor de cien presas de piedra acomodada, las cuales se colocaron transversalmente a la dirección del flujo y su función principal es para el control de la erosión en cárcavas.



**Figura 32. Presas de piedra acomodada en la unidad de escurrimiento B2.**

### ***PRESA DE GEOCOSTALES***

En la parte central de la unidad B2 se colocaron cinco presas de geocostales, especialmente para estabilizar algunas zonas de cabeza de cárcava, y reducir escurrimiento.



**Figura 33. Presas de geocostales en la unidad de escurrimiento B2.**

### **FAJINAS**

Esta obra se estableció en una de las laderas de una cárcava, aprovechando ramas de especies propias del lugar, el objetivo es disminuir la erosión superficial, disipar la esorrentía superficial y reducir la velocidad del flujo hídrico.

### **Fase 2: Análisis**

En esta etapa se identificó la variabilidad de los resultados obtenidos de los parámetros seleccionados para mostrar la efectividad de las obras y prácticas de conservación establecidas en la unidad B2 de la microcuenca La Joya, además de identificar las actividades pasadas, presentes y futuras que ocasionan los diferentes cambios y con los resultados evaluar el efecto acumulativo resultante en la unidad de escurrimiento B2.

### **Análisis de cobertura vegetal**

Uno de los aspectos más importantes en esta investigación es el análisis de los cambios derivados del establecimiento de las diferentes obras y prácticas de conservación en la zona de estudio, por esto, se elaboraron dos mapas de uso del suelo y vegetación, uno previo al establecimiento de obras con apoyo de imagen satelital con fecha abril de 2011 y uno de fecha reciente octubre de 2016, este análisis se hizo para ambas unidades de escurrimiento B1 y B2, sin embargo la

unidad de escurrimiento B1 muestra cambios visibles, por lo cual se presentan a continuación los mapas de los cambios observados en la unidad B2, correspondiente a la unidad con manejo, los mapas se muestran a continuación:

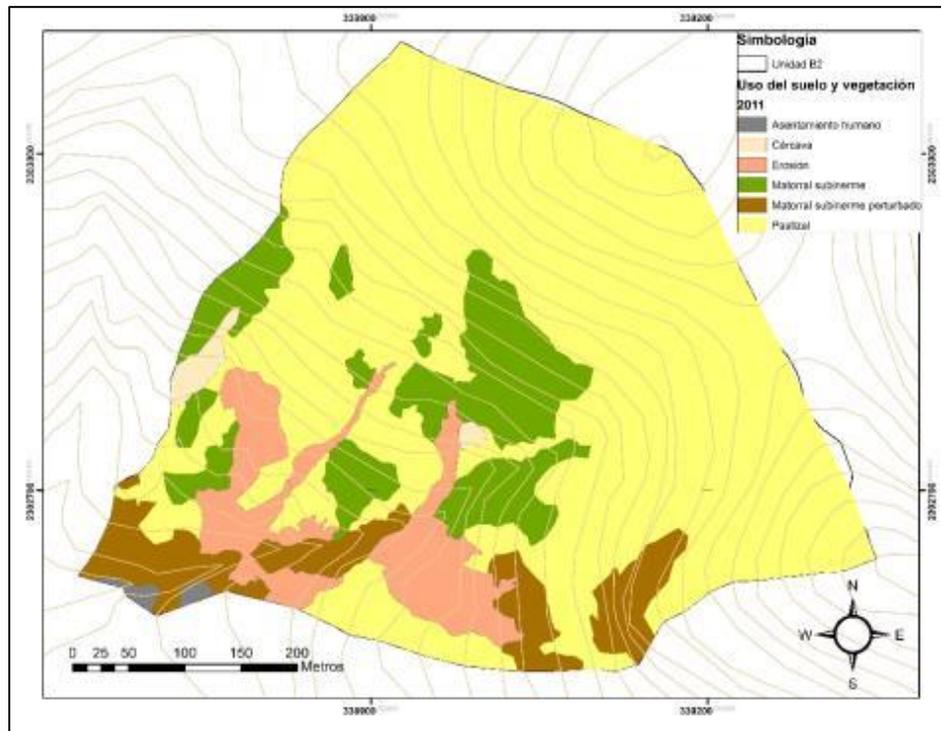
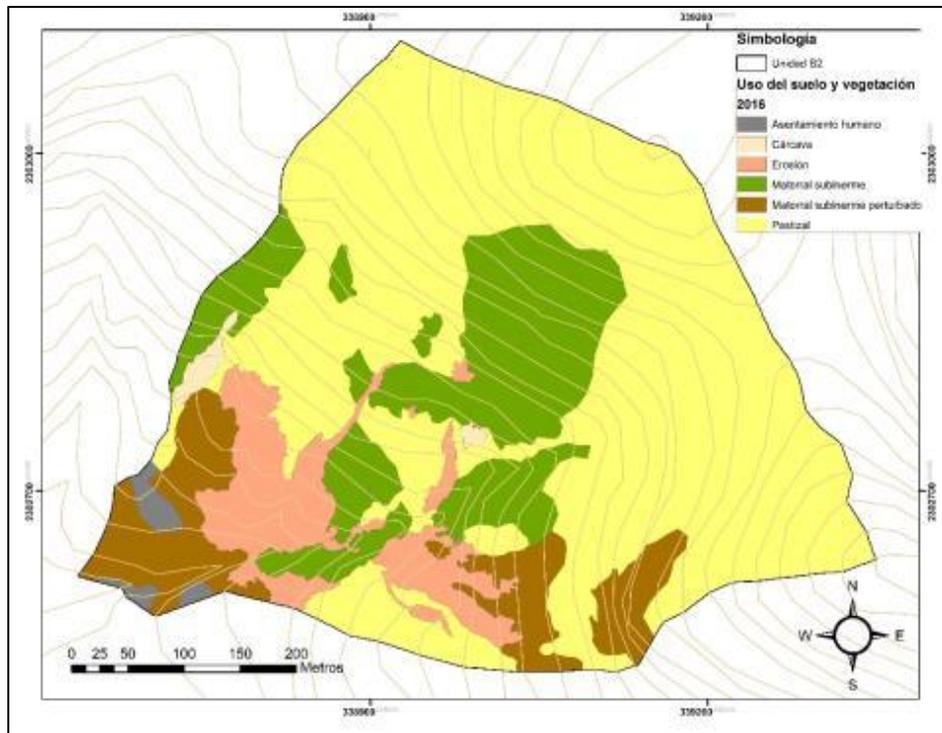


Figura 34. Mapa de uso del suelo y vegetación 2011.



**Figura 35. Mapa de uso del suelo y vegetación 2016.**

El análisis de los cambios en tipo de vegetación que la unidad de escurrimiento B2 ha experimentado con el establecimiento de las obras y prácticas de conservación se pueden observar en la tabla 5, donde se puede ver un aumento en la superficie de matorral subinerme y matorral subinerme perturbado, extendiéndose sobre algunas áreas de pastizal, también ha aumentado el área de asentamiento urbano aunque en menor medida.

**Tabla 6. Diferencias en superficie de uso del suelo y vegetación de la unidad de escurrimiento B2 para los años 2011 a 2016.**

Uso del Suelo	Superficie	
	Abril 2011	Octubre 2016
<b>Matorral subinerme</b>	3.272	4.620
<b>Matorral subinerme perturbado</b>	1.989	2.460
<b>Pastizal</b>	16.795	14.876
<b>Erosión</b>	2.201	2.247
<b>Cárcava</b>	0.238	0.177
<b>Asentamiento humano</b>	0.106	0.249

### Comportamiento hidrológico

Se registraron cuatro eventos de precipitación con valores coherentes y racionales, de los cuales se obtuvieron dos hidrogramas mostrados a continuación:

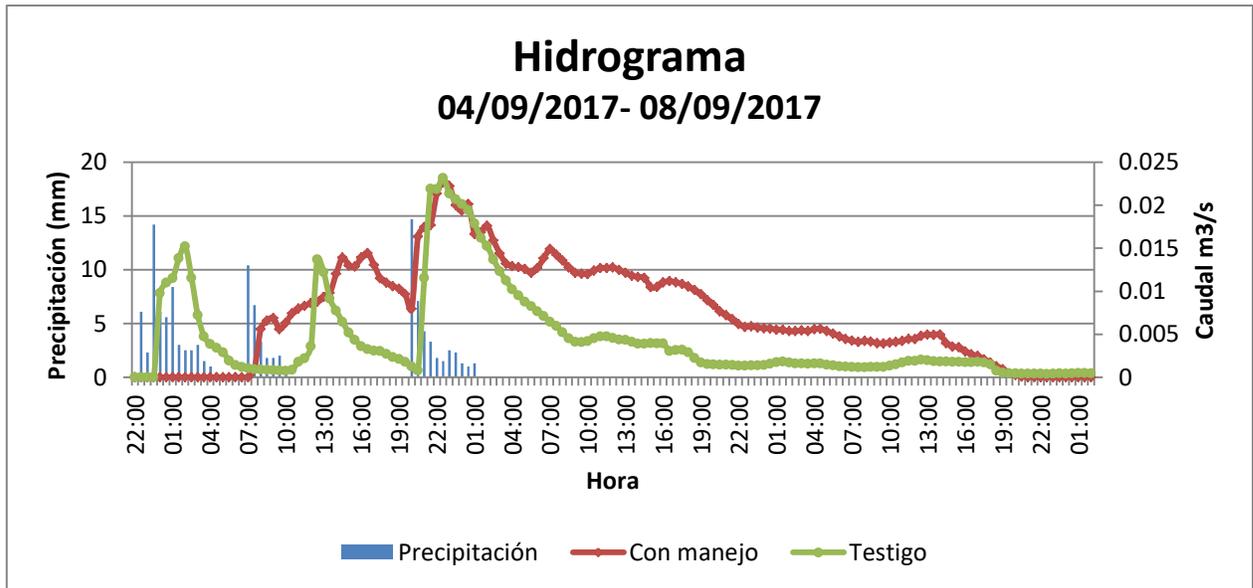


Figura 36. Hidrograma precipitaciones del 4 de septiembre al 08 de septiembre de 2017, en unidades de escurrimiento B1 y B2.

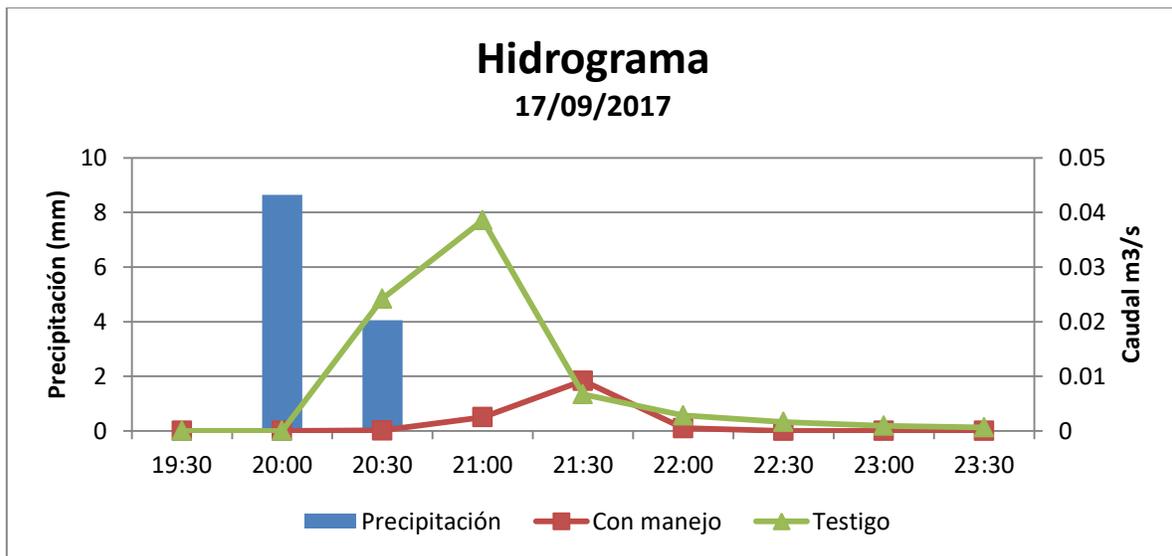


Figura 37. Hidrograma de precipitación del 17 de septiembre, en unidades de escurrimiento B1 y B2.

De los hidrogramas se obtuvieron los siguientes datos de gasto y escurrimiento (Tabla 7) para ambas unidades.

**Tabla 7. Datos de precipitación, volumen y escurrimiento para las unidades B1 (control) y B2 (con manejo)**

	Evento 1		Evento 2		Evento 3		Evento 4	
	Control	Con manejo						
<b>Precipitación (mm)</b>	55.2		27		41.1		12.7	
<b>Area</b>	15.4	24.6	15.4	24.6	15.4	24.6	15.4	24.6
<b>Gasto pico- Qp (m3/s)</b>	0.0152	0	0.0137	0.0144	0.0226	0.0231	0.0385	0.0091
<b>Tiempo pico- Tp (hr)</b>	2.5	0	2.5	9	2	2.5	1	1.5
<b>Tiempo de retraso - Tr</b>	3.5	-	5.5	9.5	2.5	2.5	1	1.5
<b>Volumen m3</b>	8500.8	13579.2	4158	6642	6329.4	10110.6	1955.8	3124.2
<b>Volumen escurrido m3</b>	190.447	0	164.918	429.668	855.77	1573.143	137.88	22.201
<b>Coeficiente de escurrimiento</b>	0.02240342	0	0.03966282	0.06468955	0.13520555	0.15559344	0.07049801	0.00710614
<b>Volumen infiltrado</b>	8310.353	13579.2	3993.082	6212.332	5473.63	8537.457	1817.92	3101.999

De la tabla anterior se puede observar la cantidad total de precipitación captada para cada una de las unidades de escurrimiento, donde los tiempos pico, es decir el tiempo que tarda la cuenca en responder en forma de escurrimiento es mayor en la unidad con manejo, esto por acción de las obras de conservación de suelos y agua establecidas en esta unidad. Llama la atención que para el primer evento de precipitación, donde las unidades se encuentran se encuentran sin humedad, la unidad con manejo no presenta escurrimiento, es decir el total del agua precipitada es consumida. Además el tiempo de retraso, es menor en la unidad control, ósea que el tiempo que tarda desde la precipitación máxima y el escurrimiento máximo es más corto respecto a la unidad con manejo.

## Producción de sedimentos

Los datos y lecturas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 8. Resultados de muestras de textura.**

Muestra	Color	1° lec	Temp	Fc	2° Lec	Temp	Fc	Aren	Arcil	Limos	Textura	
1	verdoso claro	12	19.5	0	8	20	0.18	70	20.45	9.55	100	Franco areno-arcilloso
2	Horchata	18	19.5	0	11	20	0.18	55	27.95	17.05	100	Franco areno-arcilloso
3	café	19	19.5	0	14	20	0.18	52.5	35.45	12.05	100	Franco areno-arcilloso
4	beige	15	19.5	0	12	19	-0.22	62.5	29.45	8.05	100	Franco areno-arcilloso
5	café	15	19.5	0	11	20	0.18	62.5	27.95	9.55	100	Franco areno-arcilloso
6	café	15	19.5	0	10	20	0.18	62.5	25.45	12.05	100	Franco areno-arcilloso
7	café	18	18.5	-0.22	13	20	0.18	55.55	32.95	11.5	100	Franco areno-arcilloso
8	café	17	18	-0.44	10.5	19.5	0	58.6	26.25	15.15	100	Franco areno-arcilloso
9	café	17	18	-0.44	11	19	-0.22	58.6	26.95	14.45	100	Franco areno-arcilloso
10	café	14	18	-0.44	8	19	-0.22	66.1	19.45	14.45	100	Franco arenoso

De acuerdo con la tabla de valores de erodabilidad descrita en la metodología, los valores de los suelos muestreados de acuerdo con su textura y contenido de materia orgánica son los siguientes:

**Tabla 9. Valores de K para los suelos muestreados en las unidades de estudio.**

Muestra	Textura	Valor
1	Franco areno-arcilloso	0.027
2	Franco areno-arcilloso	0.027
3	Franco areno-arcilloso	0.027
4	Franco areno-arcilloso	0.025
5	Franco areno-arcilloso	0.027
6	Franco areno-arcilloso	0.025

<b>7</b>	Franco areno-arcilloso	0.027
<b>8</b>	Franco areno-arcilloso	0.027
<b>9</b>	Franco areno-arcilloso	0.027
<b>10</b>	Franco arenoso	0.027
<b>11</b>	Franco arenoso	0.027

Una vez obtenidos estos datos, correspondientes a K se asignaron a cada una de las unidades de suelo en el mapa en ArcGis, para posteriormente sacar el valor de K ponderado por unidad de escurrimiento.

### ***FACTOR TOPOGRÁFICO LS***

Uno de los componentes para la evaluación de este factor es el modelo de elevación digital, en el cual se observan las variaciones de elevación propias de las unidades de escurrimiento.

A partir de este se obtuvo el mapa de pendientes del cual se calculan las diferencias

Estos valores se compararon con los obtenidos en la medición de sedimentos en cada vertedor.

### ***Registro de la producción de sedimentos***

Para el caso de la producción de sedimentos también se obtuvieron por evento la cantidad de sedimentos depositados en los vertedores de ambas unidades de escurrimiento. En la Tabla 2 se presenta la información que se obtuvo para cada evento por microcuenca.

#### **Año 2016**

Observando los datos y comparándolos entre ambas unidades se identifica que en la unidad B1 donde no se tienen obras ni prácticas conservacionistas, es la que presenta en promedio los mayores contenidos de sedimentos en el escurrimiento. Y por el contrario, en la unidad B2 debido al manejo con obras que se realiza en la

cuenca de aportación es que tiene los menores contenidos de sedimentos. Sin embargo notamos un sesgo en los datos a partir del 27 de agosto de 2016, esto debido a la mala implementación de una reforestación en la unidad B2.

**Tabla 10. Información de producción de sedimentos por evento de precipitación cuantificada por unidad de escurrimiento durante el 2016.**

Fecha	Sedimentos m3	
	Unidad B1	Unidad B2
<b>29/07/2016</b>	0.33	0.46
<b>10/08/2016</b>	0.17	0.04
<b>14/08/2016</b>	0.82	0.15
<b>19/08/2016</b>	0.21	0.75
<b>20/08/2016</b>	1.34	1.00
<b>21/08/2016</b>	0.42	0.67
<b>22/08/2016</b>	1.46	1.26
<b>24/08/2016</b>	1.13	1.07
<b>25/08/2016</b>	1.24	1.05
<b>27/08/2016</b>	1.5	1.84
<b>29/08/2016</b>	1.50	1.50
<b>31/08/2016</b>	0.6	0.9
<b>04/09/2016</b>	1.8	1.97
<b>16/09/2016</b>	0.33	0.4
<b>24/09/2016</b>	1.2	0.89

Se registraron 15 eventos de precipitación con producción de sedimentos en los cuales se midió una mayor producción en la mayoría de los casos, en la unidad de escurrimiento B1, misma que no cuenta con algún tipo de práctica de conservación, existe un sesgo a partir del 27 de agosto, después de la implementación de un proyecto de reforestación en la unidad B2. Esto es más visible en la siguiente gráfica:

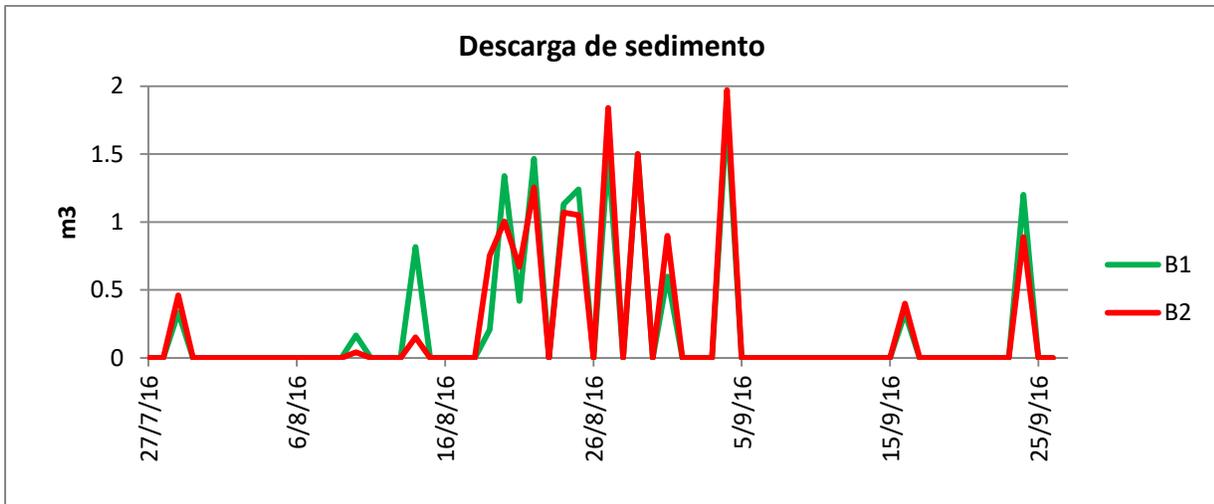


Figura 38. Grafica de descarga de sedimento de las unidades de escurrimiento B1 (control) y B2 (con manejo).

Por supuesto que en lo referente a la producción de sedimentos se tuvo una respuesta similar en ambas unidades de escurrimiento, la acción de las obras fue evidente en los primeros eventos de precipitación al producirse mayor cantidad en la unidad B1, contra la B2, la cual contiene las obras y prácticas de conservación. El sesgo se dio por la implementación del proyecto de reforestación, sin embargo la diferencia en producción de sedimentos no significativa, teniendo en cuenta que el área de la unidad B1 es menor, es decir por unidad de superficie la unidad B1 registro mayor cantidad de sedimento descargado, como se puede observar en la siguiente Figura:

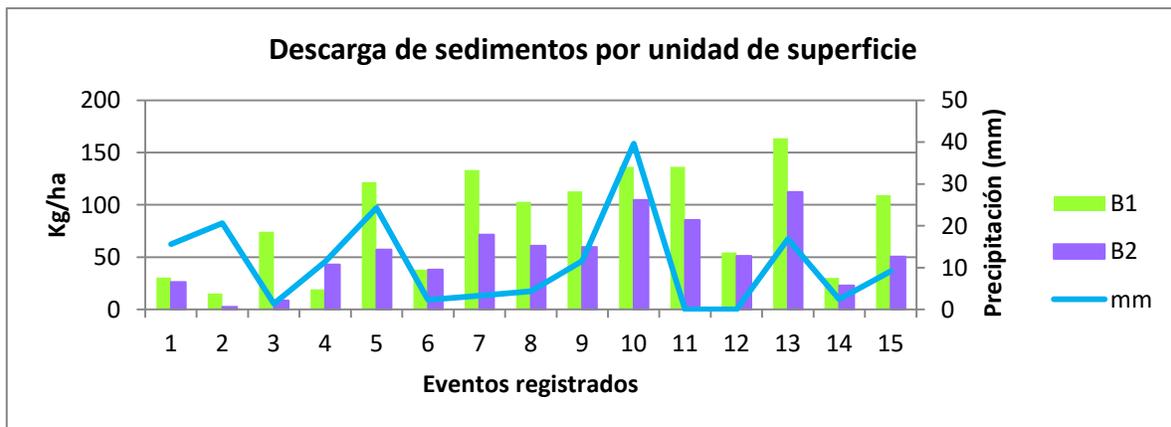


Figura 39. Descarga de sedimento por unidad de superficie.

El total de sedimento descargado en un año por unidad de superficie en la unidad con obras es de 794.3 kg/ha/año contra 1277.35 kg/ha/año, por lo que se observa una eficiencia de 37.8% en reducción de producción de sedimentos por la utilización de obras y prácticas de conservación.

#### **Variación temporal de la humedad volumétrica en suelo en temporada húmeda y de estiaje en las unidades de escurrimiento B1 y B2.**

Se hicieron muestreos de humedad de suelo en diversos puntos de transectos definidos en las unidades B1 y B2, la medición se hizo con el método de reflectometría antes mencionado, de los resultados se hicieron modelos visualizados en mapas de distintas épocas del año, con la finalidad de observar cómo se comporta la humedad y si las obras y prácticas tienen algún efecto sobre la humedad del suelo.

En las siguientes figuras se puede observar el comportamiento de la humedad en diferentes épocas del año, desde el mes de octubre de 2016, la época al final del periodo de lluvias, posteriormente febrero y abril cuando el suelo ha perdido el mayor porcentaje de humedad y septiembre donde se muestran datos del periodo de lluvias. En todos se puede observar que el almacenamiento de la humedad es mayor en la unidad donde se ubican las obras.

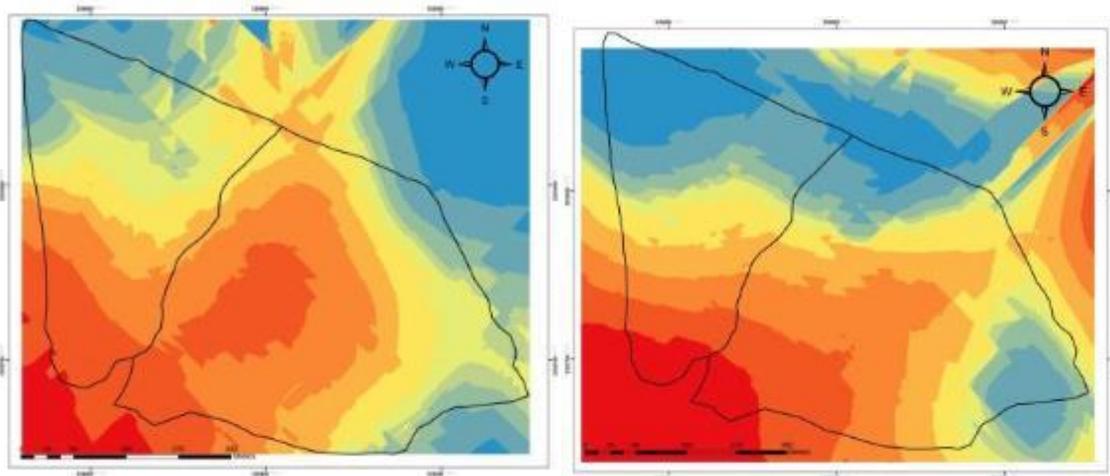


Figura 40. Distribución de humedad octubre 2016 y febrero 2017

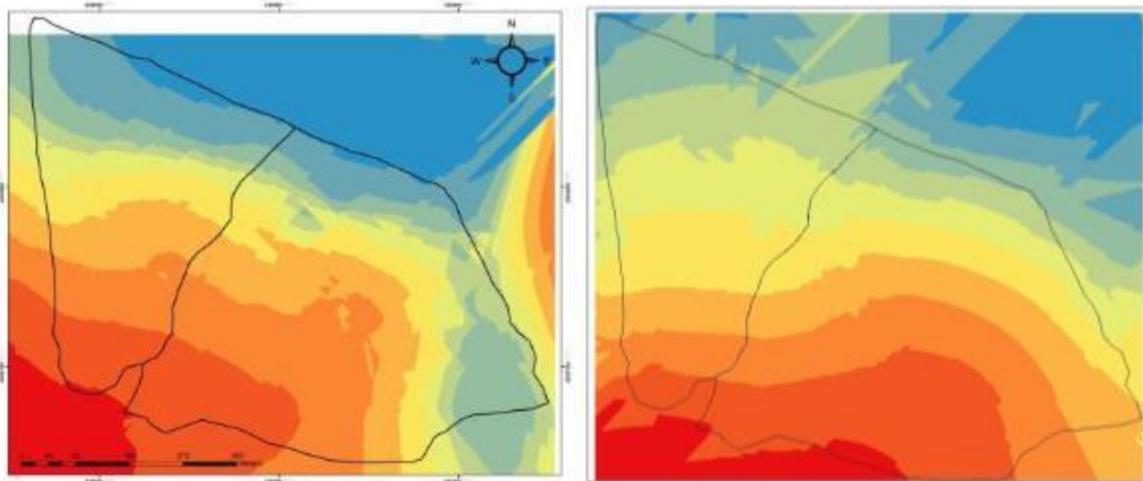
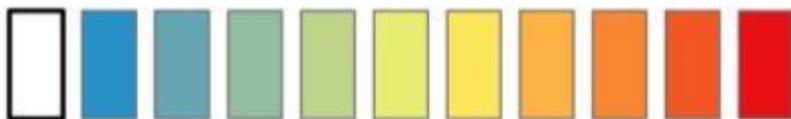


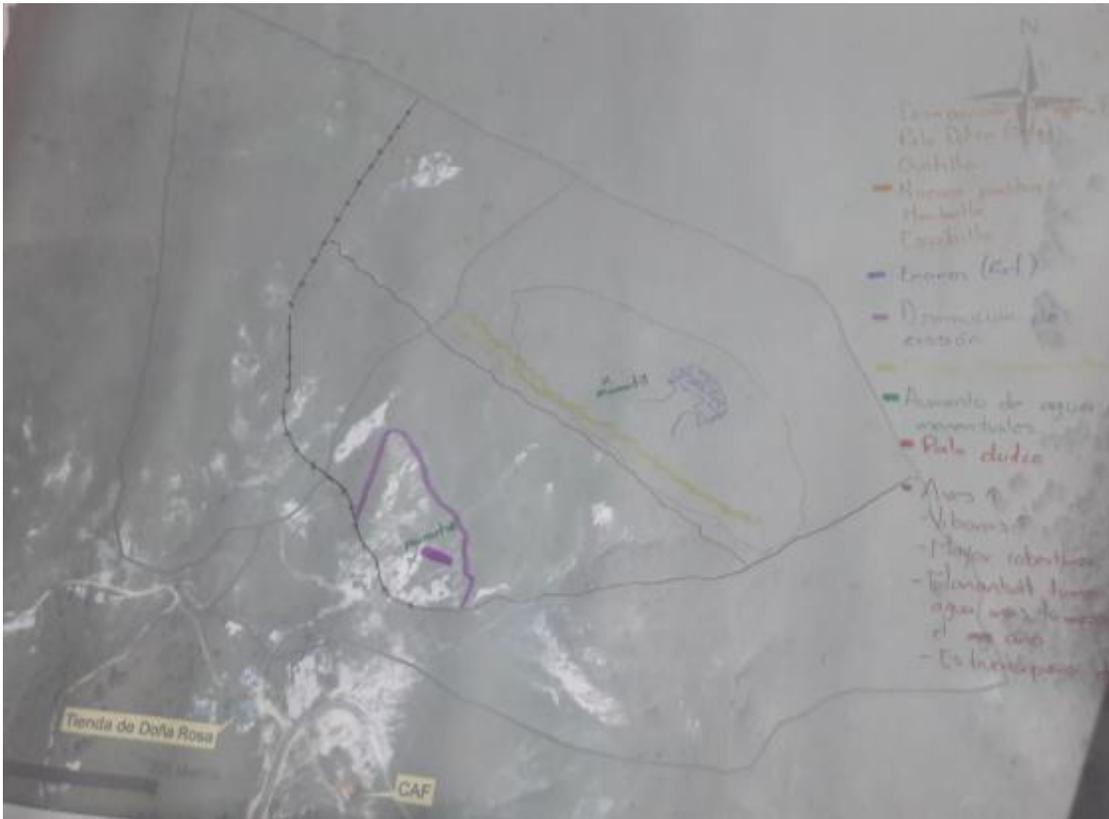
Figura 41. Distribución de humedad abril 2017 y septiembre 2017.



### Percepción y participación de la población

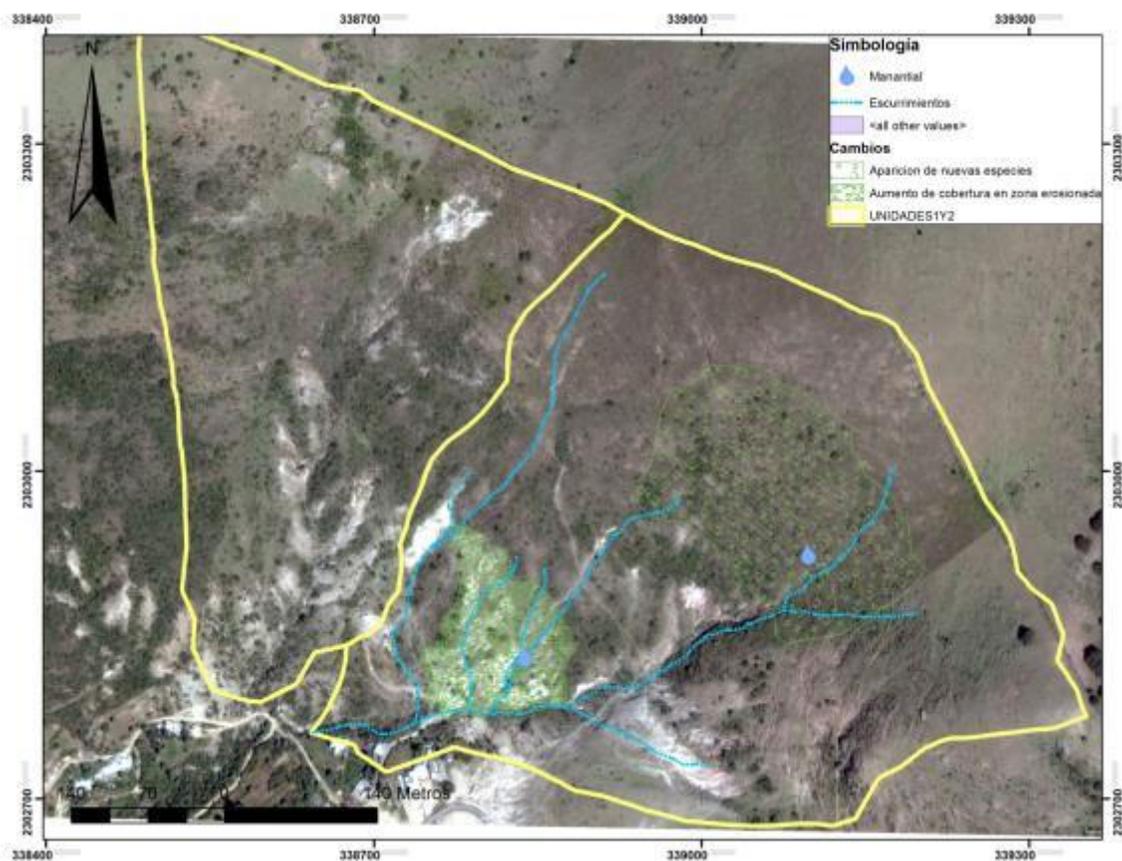
El resultado principal del trabajo fue el mapa de los distintos cambios que los pobladores de la Joya han observado después de la implementación de obras y prácticas de conservación, los pobladores lograron plasmar a través de mapas los conocimientos cognitivos que tienen acerca de su territorio y sus cambios. El

mapa final de las unidades de escurrimiento, muestra la importancia y resultados de la implementación de obras de conservación.



**Figura 42. Mapa elaborado por la comunidad de la Joya.**

La actividad de la comunidad se concluyó con la presentación de los resultados, en el que se muestra lo elaborado en el taller de cartografía ya digitalizado en ArcGis. En él se muestran los cambios que la comunidad ha percibido a partir de la implementación de las obras y prácticas de conservación, principalmente la presencia de especies vegetales que ya no se habían observado desde hace años y algunas con importancia medicinal como el ocotillo, además de un aumento significativo de agua en los manantiales, pues refieren los manantiales permanecen productivos por más tiempo en el año, lo cual para ellos resulta de gran utilidad para el aprovechamiento de este recurso en diferentes actividades de la vida diaria.



**Figura 43. Mapa de cartografía participativa digitalizado**

En la figura anterior se muestran los principales cambios que señaló la comunidad de la Joya, estas se describen a continuación.

<b>Cambios</b>	<b>Descripción</b>
<b>Aparición de nuevas especies</b>	<p>Los pobladores señalaron que con la implementación de obras de conservación han aparecido especies que ya no se observaban como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocotillo</li> <li>• Nuevas especies de pastos</li> <li>• Membrillo</li> <li>• Escobilla</li> </ul>
<b>Aumento de cobertura</b>	<p>Los pobladores señalan que en esta zona ha aumentado la cobertura, pues anteriormente el suelo se encontraba</p>

	desnudo, ahora perciben un aumento en la cobertura en esta zona en hasta un 40%.
<b>Manantiales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor cantidad de agua.</li> <li>• Mejor calidad para consumo humano.</li> <li>• Presentan contenido de agua por más tiempo en el año.</li> </ul>
<b>Escurrimiento</b>	Los escurrimientos presentan mayor afluencia de agua en la temporada de lluvia.

Tomando como base todos los resultados obtenidos en esta investigación se presenta a continuación una explicación diagramática de los efectos acumulativos de las obras y prácticas establecidas en la unidad manejada (Fig. X).

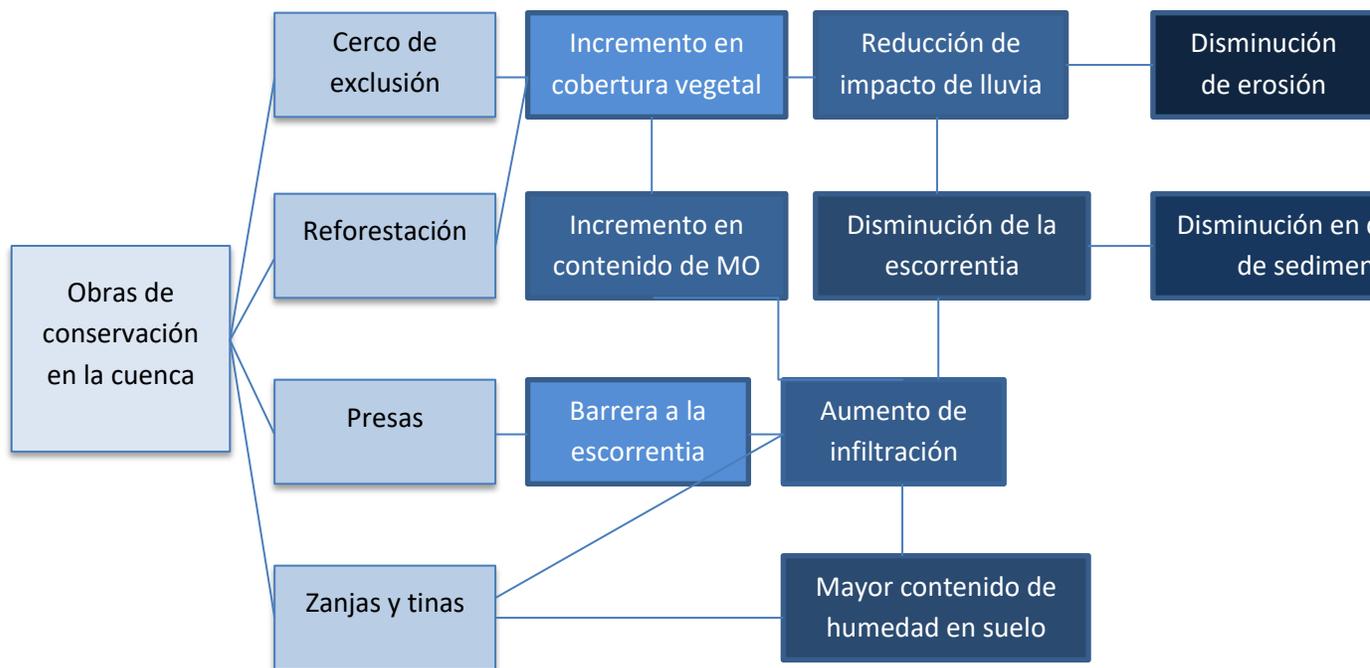


Figura 44. Efectos acumulativos identificables y medibles en la unidad manejada de la microcuenca La Joya

El diagrama muestra algunas de las relaciones más importantes surgidas a partir del establecimiento de obras y prácticas de conservación, en él se encuentran las de mayor significancia; el cerco de exclusión, la reforestación de las diferentes especies vegetales, la construcción de presas para la conservación de suelos y agua y las zanjas y tinas ciegas, donde el efecto notable a más corto plazo es el incremento en cobertura vegetal, lo que produce a su vez una reducción del

impacto de la lluvia, y un incremento en materia orgánica, generando así una disminución en la erosión y disminución de la escorrentía, esta disminución de escorrentía es apoyada además por las distintas presas y las zanjas trincheras, y la suma del efecto de estas obras produce un aumento en la infiltración por tanto un mayor contenido de humedad en el suelo.

Los efectos que se midieron ayudan a mejorar los procesos de intercambio de materia y flujo de energía a través de la vinculación de elementos estructurales del ecosistema y mejorando las funciones que existen en la cuenca, como la captación de agua, mejoramiento de la infiltración para tener un mayor almacenamiento del agua, aumento en cobertura vegetal y con ello mayor captación de CO<sub>2</sub>, todas estas funciones además de mejorar el ecosistema, apoya también la función socioeconómica ya que mejora la calidad de los recursos naturales que suministran a la población para el desarrollo de actividades productivas y provee de un espacio para el desarrollo social y cultural de la población de la Joya.

Lo más importante es saber que, además de los resultados gráficos obtenidos y que se pueden apreciar en la imagen, la información que no se aprecia es el grado de conciencia sobre conservación que ha derivado de la observación de resultados de las obras en su territorio.

El papel de las comunidades humanas en el funcionamiento de la biodiversidad modela en gran medida el mejoramiento o degradación de los recursos naturales. Ante la gravedad de la crisis ambiental la creación de conciencia de conservación en pequeñas comunidades como la de la Joya a través de la observación y demostración de resultados, es de gran importancia para la generación de cambios que encaminen a la sustentabilidad.

## CONCLUSIONES

La conservación de suelos, agua y biodiversidad debe buscar la mejora de sus funciones y con ello conservar la calidad para el bienestar del ecosistema y la sociedad. El éxito en los diferentes proyectos de conservación y el manejo adecuado de cuencas generará un efecto acumulativo positivo que será reflejado en la cobertura vegetal, la disminución en la producción de sedimentos, la humedad en los suelos, entre otras. Sin embargo el aspecto más importante para lograr el éxito en cualquier práctica, es la participación de la población.

Así-mismo, para realizar propuestas que permitan la rehabilitación y conservación en una cuenca es necesaria la implementación de herramientas de participación, teniendo contacto directo con la población y que ésta tenga una plena conciencia de que cada acción generara un efecto positivo o negativo en su cuenca.

Por otra parte, los diferentes parámetros físicos medidos son una herramienta fundamental para evaluar el efecto acumulativo de cada acción en una cuenca, Y son un medio que permite identificar las diferencias que resultan del manejo de cuencas y cuantificar comparativamente los resultados.

El análisis de cambios en la cobertura vegetal permitió identificar un aumento en las zonas de matorral y una reducción de las zonas degradadas derivado de los trabajos de reforestación y exclusión de pastoreo.

La producción de sedimentos fue mayor en la unidad carente de obras de conservación (B1), además de observarse partículas más gruesas respecto a la unidad con presencia de obras y prácticas de conservación.

El análisis de la humedad del suelo se hizo con apoyo de Sistemas de Información Geográfica, donde se consiguió representar el contenido de humedad en el suelo y visualizarlo en un mapa, donde se puede apreciar el efecto de las obras de conservación en el contenido de humedad de la unidad de escurrimiento B2 para las diferentes épocas del año.

Además, es necesario contar con el equipo adecuado que permita hacer las diferentes mediciones para obtener datos confiables y exactos, el equipo con el que cuenta la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas facilitó y mejoró la calidad en resultados de los parámetros medidos.

Es necesario medir parámetros básicos de vegetación, infiltración, flujo de escurrimientos, humedad y producción de sedimentos previo a la implementación de obras y prácticas de conservación y estas mismas mediciones realizarlas posterior a su establecimiento, obteniendo así el efecto generado.

La experiencia muestra una clara correlación entre el nivel de participación de la población y la eficiencia de los proyectos establecidos en la unidad manejada y con ello, se ha obtenido una visión de efectos acumulativos positivos. Como se ha evidenciado en diferentes proyectos de manejo de cuencas en el mundo, los proyectos que han tenido éxito son aquellos donde ha habido una efectiva participación de la población en su diseño y ejecución.

Se recomienda continuar con la medición de los parámetros aquí considerados para tener un efectivo monitoreo e identificación de otros efectos acumulativos. La propuesta de Centro regional de Capacitación en Cuencas sobre la restauración de laderas mediante unidades CONSABIO resulta ser una alternativa importante apoyada por los resultados de esta investigación.

## Bibliografía

- ARAUCO. (2012). *Protocolo de monitoreo de calidad y cantidad de agua asociado a operaciones forestales*. Santiago: ARAUCO "Sembremos el futuro".
- Balvanera, P., & Cotler, H. (2007). Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica*, 84-85: 8-15.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2006). *Política de Medio Ambiente y Cumplimiento de Salvaguardias*. BID.
- Banco Mundial. (1999). *Políticas Operacionales 4.01. Manual de Operaciones*. World Bank.
- Barrientos, G. (2013). *Propuesta de prácticas de conservación de suelos en ambientes semiáridos: Caso microcuenca La Joya (Querétaro- Guanajuato)*. Santiago de Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Beschta, R. L., & Reiter, M. L. (1995). The effects of forest practices on water. En R. L. Beschta, M. L. Reiter, J. R. Boyle, C. C. Chambers, W. P. Gibson, & S. V. Gregory, *Cumulative effects of forest practices in Oregon* (págs. 14-19). Corvallis: Oregon State University.
- Black, P. E. (1997). Watershed Functions. *Journal of the American Water Resources Association*, 1-11.
- Campos, S. E. (2012). *PROPUESTA DE INDICADORES PARA LA EVALUACIÓN DEL PROYECTO "CREACIÓN DEL CENTRO REGIONAL DE CAPACITACIÓN EN CUENCAS"*. Santiago de Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Canadian Environmental Agency. (2007). *Addressing Cumulative Effects under the Canadian Environmental Assessment Act*. Ontario : Operational Policy Statement.
- CEAA. (1999). *Cumulative Effects Assessment Practitioners' Guide*. Hull: Canadian Environmental Assessment Agency.
- Chang, M. (2003). *Forest hydrology: An introduction to water and forests* (Tercera ed.). United States of America: CRC Press.
- Cobourn, J. (1989). Application of cumulative watershed effects (CWE) analysis on the Eldorado National Forest in California. . *American Water Resources Association*, 449-460.
- Cooper, L. M. (2004). *Guidelines for Cumulative Effects Assessment in SEA of Plans* . London: Imperial College London.
- Cotler, H., González, D., & Machorro, J. (2015). *Identificación de impactos acumulativos para los ordenamientos ecológicos territoriales*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático .

- Council on Environmental Quality. (1969). *National Environmental Policy Act*. Council on Environmental Quality.
- Dasberg, S., & Dalton, F. (1985). Time Domain Reflectometry Field Measurements of Soil Water Content and Electrical Conductivity. *Soil Sci*, 49(2), 293-297.
- Davies, H., & Hanley, P. (2010). *State of the Watershed Report*. Regina: Saskatchewan Watershed Authority.
- Dourojeanni. (2006). *Conceptos y Definiciones sobre Gestión Integrada de Cuencas*. Santiago de Chile: CONAMA.
- Dourojeanni. (2007). Cambios en las formas de abordar la gestión ambiental. *Evaluación Ambiental por Cuencas* (pág. 52). México: CONAGUA.
- Duinker, P. N., & Greig, L. A. (2006). The Impotence of Cumulative Effects Assessment in Canada: Ailments and Ideas for Redeployment. *Environmental Management*, 153-161.
- Espinoza, G. (2002). *Gestión y fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. Santiago: Centro de Estudios para el Desarrollo.
- FAO. (1985). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma: FAO.
- FAO. (2007). *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Guatemala: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2009). *¿Porqué invertir en ordenación de las cuencas hidrográficas?* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2011). *Prácticas de conservación de suelos y agua para la adaptación productiva a la variabilidad climática*. Santiago: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FIDA. (2010). *El enfoque adaptativo del FIDA relativo a la cartografía participativa*. Roma: Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola.
- Gándara, A. S. (2011). *Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Garrido, A., Damián, J. L., & Guadarrama, C. E. (2014). *Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México*. México: INECC.
- Global Water Partnership. (2009). *MANUAL PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS*. Londres: Gráfica Mosca.

- Gunn, J., & Noble, B. (2009). Conceptual and methodological challenges to integrating SEA and cumulative effects assessment. *Environmental Impact Assessment*, 154-160.
- Hatton, T. P. (2002). *The role of trees in the water salt balances of catchments*. Australia: Joint Venture Agroforestry Program and CSIRO.
- Hegmann, G., C. Cocklin, R. C., S. Dupuis, A. K., L. Kingsley, W. R., Spaling, H., & Stalker, D. (1999). *Cumulative Effects Assessment Practitioners Guide*. Quebec: Canadian Environmental Assessment Agency .
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. M. (2013). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- IMTA. (2013). *Evaluación de impactos ambientales de tecnologías conservacionistas utilizando el método de cuencas pareadas*. Jiutepec: SEMARNAT.
- Lianes, E., Marchamalo, M., & Roldán, M. (2009). Evaluación del factor C de la Rusle para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del Río Birris, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 217-235.
- Lichtenberg, E. (2001). *Adoption of soil conservation practices: A revealed preference approach*. The University of Maryland, College Park: Working papers. Department of Agricultural and Resource Economics.
- Louwagie, G., Gay, S. H., & Burrell, A. (2009). *Addressing soil degradation in EU agriculture: relevant processes, practices and policies*. SoCo Project. Luxemburg: JRC Scientific and Technical Reports.
- MacDonald, L. (2000). Evaluating and Managing Cumulative Effects: Process and Constraints. *Environmental Management*, 299-315.
- MacDonald, L. (2000). Evaluating and Managing Cumulative Effects: Process and Constraints. *Environmental Management Vol. 26* , 299-315.
- MacDonald, L. H. (2000). Evaluating and Managing Cumulative Effects: Process and Constraints. *Environmental Management*, 299-315.
- Marsh, G. P. (1864). *Man and Nature*. New York: C. Scribner & co.
- Moore, I., & Burch, G. (1986). Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal* 50, 1294-1298.
- Noble, B. (2010). *Introduction to Environmental Impact Assessment: A Guide to Principles and Practice*. Don Mills: Oxford University Press.
- NSWA. (2017). *ANNUAL REPORT 2016 -2017*. Alberta: North Saskatchewan Watershed Alliance.

Performance Standard 1. (2012). *Assessment and Management of Environmental and Social Risks and Impacts*. World Bank Group.

Pineda, R., Segura, O., & González, L. (2015). Aprendiendo del manejo de cuencas para el ordenamiento de áreas naturales para aumentar la resiliencia socio-ambiental: El caso de la microcuenca La Joya. En J. Hermesse, O. Servais, S. Schmitz, A. Tobar, & M. Montes, *Ordenamiento territorial en la prevención de desastres*. (págs. 201-213). Bélgica: Presses Universitaires de Louvain.

Reid, L. M. (1993). *Research and Cumulative Watershed Effects*. Albany, California: Pacific Southwest Research Station.

Reid, L. M. (1998). Cumulative watershed analysis. En R. J. Naiman, & R. E. Bilby, *River ecology and management: Lessons fro the Pacific coastal ecoregion* (págs. 476-501). N. Y. : Springer.

Reid, L. M. (2010). Understanding and Evaluating Cumulative Watershed Impacts. En W. J. Elliot, I. S. Miller, & L. Audin, *Cumulative Watershed Effects of Fuel Management in the Western United States* (pág. 299). Colorado: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

SAGARPA. (2001). *Estimación de la erosión del suelo*. Distrito Federal: SAGARPA.

Strahler, A. N., & Strahler, A. H. (1974). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega.

Treweek, J. (1999). *Ecological impact assessment*. Oxford: Blackwell Science Ltd.

USDA Forest Service . (2002). *Landscape dynamics and forest management*. Rocky Mountain Research Station: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

USDA Forest Service. (1998). *Cumulative off-site watershed effects analysis*. San Francisco: Forest Service, U.S.

Williams, J. R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*, 965-974.