



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**IMPACTO DE LAS ZANJAS BORDO EN LA  
HIDRODINÁMICA DEL SUELO Y LA BIOMASA  
DE UN AGOSTADERO, MIXTECA OAXAQUEÑA**

ISABEL VILLA MONTES

T E S I S  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

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

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe ISABEL VILLA MONTES, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis IMPACTO DE LAS ZANJAS BORDO EN LA HIDRODINAMICA DEL SUELO Y BIOMASA DE UN AGOSTADERO, MIXTECA OAXAQUEÑA y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 14 de JULIO de 2017



Firma del  
Alumno (a)



DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: IMPACTO DE LAS ZANJAS BORDO EN LA HIDRODINÁMICA DEL SUELO Y LA BIOMASA DE UN AGOSTADERO, MIXTECA OAXAQUEÑA, realizada por la alumna: Isabel Villa Montes, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ

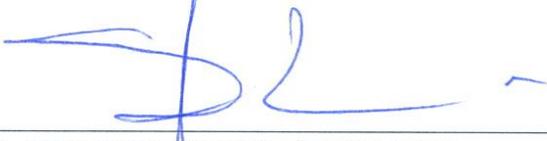
ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. DEMETRIO S. FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DRA. HELENA COTLER ÁVALOS

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
M.C. ERASMO RUBIO GRANADOS

MONTECILLO, TEXCOCO, MÉXICO

2017.

# IMPACTO DE LAS ZANJAS BORDO EN LA HIDRODINÁMICA DEL SUELO Y LA BIOMASA DE UN AGOSTADERO, MIXTECA OAXAQUEÑA

Isabel Villa Montes, MC

Colegio de Postgraduados, 2017

## RESUMEN

En la Mixteca Oaxaqueña, como en otras regiones del país, las zanjas bordo son una práctica común, que programas gubernamentales de protección al medio ambiente proponen para la conservación de suelo y agua. En el presente estudio se propone evaluar el impacto de esta práctica en términos de la hidrodinámica del suelo y la producción de biomasa en un agostadero de esta región; para el estudio se eligieron tres parcelas con zanjas y tres sin zanjas, en condiciones biofísicas similares. En las parcelas se realizó un levantamiento topográfico, para conocer el diseño de las zanjas bordo y los rasgos topográficos del terreno. La biomasa de pasto y el contenido de humedad se muestreo en transectos; para las parcelas con zanjas el muestreo se realizó entre zanjas, dentro de la zanja y en el bordo, en la época de lluvias y de estiaje. En dos de las parcelas, una con suelo profundo (Cambisol) y otra con somero (Leptosol), a través de un diseño de muestreo dirigido, se midió el contenido de humedad, capacidad de retención de humedad, humedad aprovechable, materia orgánica e infiltración básica. Los resultados indican que las zanjas bordo establecidas no cumplen criterios técnicos de diseño y su eficacia en la captación de escurrimientos es de regular a muy alta. Se observa que las zanjas bordo realizadas en los Cambisoles no tienen efecto en la producción de biomasa y en suelos someros hay mayor biomasa en la zanja bordo comparado con el testigo, con dominancia de zacate rosado (*Melinis repens (Willd.)*) considerada como una especie invasora que se desarrolla en zonas degradadas con un bajo valor nutricional para el ganado. Las zanjas bordo influyen en las propiedades hidrodinámicas del suelo únicamente dentro de las zanjas y en el bordo; mientras que entre zanjas no se observa efecto alguno. Dentro de la zanja de esta práctica con respecto al testigo se registra un cambio significativo en la capacidad de retención de humedad y en la humedad aprovechable, las zanjas favorecen la concentración y la infiltración básica.

**Palabras clave:** zanjas de infiltración, manejo, biomasa, propiedades hidrodinámicas.

# IMPACT OF CONTOUR TRENCHES IN SOIL HYDRODYNAMICS AND BIOMASS OF A GRAZING LAND, IN THE MIXTECA REGION IN OAXACA

Isabel Villa Montes, MC  
Colegio de Postgraduados, 2017

## ABSTRACT

In the Mixteca region in Oaxaca, as in other regions of the country, contour trenches are a common practice, which governmental environmental protection programs propose for the conservation of soil and water. In the present study, it is proposed to evaluate the impact of this practice in terms of soil hydrodynamics and biomass production in a grazing land in this region; for the study, three areas with contour trenches and three without contour trenches were chosen, under similar biophysical conditions. A topographic survey was carried out in order to know the design of the contour trenches and the topographic features of the terrain. Grass biomass and moisture content were sampled in transects; for the areas with contour trenches, sampling was performed between contour trenches, within the trench and on the edge, during the rainy and dry season. In two of the areas, one with deep soil (cambisol) and one with shallow soil (leptosol), through a directed sampling design, moisture content, moisture retention capacity, usable moisture, organic matter and basic infiltration were measured. The results indicate that the established contour trenches do not fulfill the technical design criteria and their efficiency in the catching of runoff goes from regular to very high. It is observed that the contour trenches in the Cambisols have no effect on biomass production, and in shallow soils there is more biomass in the contour trenches compared to the control area, dominated by pink grass (*Melinis repens* (Willd.)), considered as an invasive species that grows in degraded areas with a low nutritional value for livestock. contour trenches influence the hydrodynamic properties of the soil only within the trenches and at the edge; while between contour trenches no effect is observed. Within the contour trench with this practice, there is a significant change in the moisture retention capacity and in the usable moisture compared to the witness area, because the contour trenches favor concentration and basic infiltration.

**Key words:** infiltration ditches, management, biomass, hydrodynamic properties.

## **Agradecimientos:**

La universidad es un mundo de cultura y confianza, donde la recompensa del éxito es el reconocimiento intelectual, mientras que la industria es un mundo de contratos e inseguridad, donde la paga es la recompensa del trabajo y el triunfo mismo puede hacernos superfluos.

Salvador E. Luria

Al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y del Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT); al apoyo del consejo particular.

Este estudio no hubiera sido posible sin el interés del MC. Pedro D. Guerrero Cruz y del Sr. Ángel Guerrero Cruz quienes facilitaron el acceso a sus terrenos y en todo momento estuvieron en total disposición de los requerimientos del proyecto.

Al apoyo en campo de MC. Alejandra Reyes Carrillo, Ing. Carlos Palacios Espinosa, MC. Erasmo Rubio Granados y Sr. Pedro Blancas.

Al laboratorio de Génesis: MC. Patricio Sánchez Guzmán y Técnico Pedro por la gran ayuda en las determinaciones físicas y químicas de las muestras de cada horizonte de los perfiles de suelo. Al laboratorio de física y química de suelos: MC. Esmeralda y los técnicos Sr. Oscar y Sr. Carlos.

## CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo general .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>4</b>
<b>4.1</b>	<b>Suelo .....</b>	<b>4</b>
4.1.1	Textura, densidad aparente y materia orgánica .....	5
4.1.2	Contenido de humedad .....	6
4.1.3	Infiltración .....	8
<b>4.2</b>	<b>Degradación del suelo .....</b>	<b>11</b>
<b>4.3</b>	<b>Zanjas bordo.....</b>	<b>13</b>
<b>4.4</b>	<b>Antecedentes de evaluación de zanjas de bordo y zanjas trinchera .....</b>	<b>15</b>
<b>5.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Área de estudio .....</b>	<b>21</b>
<b>5.2</b>	<b>Inventario de prácticas de conservación de suelo y agua .....</b>	<b>24</b>
<b>5.3</b>	<b>Muestreo y seguimiento .....</b>	<b>24</b>
5.3.1	Parcelas de muestreo .....	25
5.3.1.1	Caracterización del suelo de las parcelas de muestreo .....	25
5.3.2	Sistema de zanjas bordo .....	27
5.3.2.1	Topografía.....	27
5.3.2.2	Dimensiones de las zanjas bordo .....	29
5.3.2.3	Capacidad de captación potencial de las zanjas bordo .....	31
5.3.2.4	Capacidad de almacenamiento real de las zanjas bordo .....	32
5.3.2.5	Índice topográfico de humedad.....	34
5.3.3	Contenido de humedad en el suelo .....	34
5.3.4	Propiedades hidrodinámicas del suelo.....	38
5.3.4.1	Infiltración .....	39
5.3.5	Estimación de biomasa .....	43
<b>5.4</b>	<b>Análisis estadístico .....</b>	<b>45</b>
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>46</b>
<b>6.1</b>	<b>Inventario de prácticas de conservación .....</b>	<b>46</b>
6.1.1	Dimensiones de las zanjas bordo (Inventario).....	48

<b>6.2</b>	<b>Descripción de las parcelas de muestreo .....</b>	<b>49</b>
6.2.1	Parcela A y testigo (AT).....	50
6.2.2	Parcela B y testigo (BT) .....	54
6.2.3	Parcela C y testigo (CT) .....	58
<b>6.3</b>	<b>Características del sistema Zanjas Bordo.....</b>	<b>61</b>
6.3.1	Pendiente del fondo de las zanjas .....	63
6.3.2	Capacidad de almacenamiento de agua en las zanjas bordo.....	64
6.3.3	Espaciamiento entre zanjas bordo .....	65
6.3.4	Eficacia de las zanjas bordo en la captación de agua .....	70
6.3.5	Índice topográfico de humedad en las parcelas de muestreo.....	71
<b>6.4</b>	<b>Contenido de humedad en el suelo .....</b>	<b>73</b>
<b>6.5</b>	<b>Propiedades hidrodinámicas del suelo .....</b>	<b>77</b>
6.5.1	Infiltración .....	79
<b>6.6</b>	<b>Producción de biomasa .....</b>	<b>87</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>92</b>
<b>9.</b>	<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>92</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del agua y funciones del suelo. ....	4
Figura 2. Relación lluvia, escurrimiento y capacidad de infiltración. ....	9
Figura 3. (1) sección esquemática del perfil de infiltración, (2) contenido de humedad a través del perfil. ....	10
Figura 4. Sistema de zanjas bordo. ....	14
Figura 5. Prácticas de captación de agua de lluvia o zanjas de infiltración. ....	18
Figura 6. Localización de la cuenca rancho dolores. ....	21
Figura 7. Datos climáticos, estación huajuapán de león (DGE), clave 20275. ....	22
Figura 8. Lluvia diaria (2014-2016), estación meteorológica esime huajuapán de león, de la red de estaciones meteorológicas automáticas (emas). ....	23
Figura 9. Parcelas de muestreo y perfiles de suelo. ....	26
Figura 10. (1) método de levantamiento en cuadrícula y (2) método de levantamiento transversal. ....	27
Figura 11. Toma de datos en campo con GPS PROMARK™ 3. ....	28
Figura 12. Perfil transversal tipo de una zanja bordo. ....	30
Figura 13. Perfil transversal para la estimación de dimensiones del bordo. ....	30
Figura 14. Perfil longitudinal, zanja 04 de parcela A. ....	32
Figura 15. Perfil transversal para el cálculo de <i>sr</i> . ....	34
Figura 16. Transectos de muestreo de humedad en las parcelas de muestreo. ....	35
Figura 17. Perfil de muestreo de humedad. ....	35
Figura 18. Medición en campo del contenido de humedad, fieldscout tdr 300 y varillas. ....	36
Figura 19. Sitios de muestreo para determinar las propiedades del suelo parcela A y AT. ....	39
Figura 20. Sitios de medición de la velocidad de infiltración en campo. ....	40
Figura 21. Infiltrómetro de doble anillo y su instalación en campo. ....	40
Figura 22. Instalación de las secciones en las zanjas bordo de las parcelas A y C y medición de la velocidad de infiltración. ....	42
Figura 23. Hietogramas de eventos con intensidad máxima de lluvia en los años 2014, 2015 y 2016. ....	43

Figura 24. Sitios de muestreo de vegetación. ....	44
Figura 25. Localización de prácticas de conservación en la cuenca rancho dolores. ....	47
Figura 26. Zanjas bordo (1), presa filtrante de piedra acomodada (2) y presa de tierra compactada (3).....	47
Figura 27. Localización de las parcelas de muestreo.....	50
Figura 28. Parcelas de muestreo A (1) y AT (2), fotografías vistas de noreste-suroeste.....	51
Figura 29. Perfil de suelo de las parcelas de muestreo A y AT. ....	52
Figura 30. Parcelas B (1) y BT (2), fotografías vistas norte-sur.....	55
Figura 31. Perfil de suelo de parcelas de muestreo B y BT.....	56
Figura 32. Parcela C (1) y CT (2), fotografías vistas noreste-suroeste.....	59
Figura 33. Perfil de suelo de parcelas de muestreo A, B y C. ....	60
Figura 34. Secciones transversales promedio de las zanjas bordo en las parcelas de muestreo... 64	
Figura 35. Comparación de los espaciamientos observados y estimados entre zanjas, parcelas A, B y C .....	67
Figura 36. Eficacia de las zanjas bordo para captar escurrimientos .....	71
Figura 37. Índice topográfico de humedad de las parcelas de muestreo (A, AT, B, BT, C y CT). ....	72
Figura 38. Distribución del contenido de humedad en las parcelas con práctica y testigo, en dos épocas.....	74
Figura 39. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada en las parcelas A y C. ....	81
Figura 40. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada de una sección de la zanja bordo en las parcelas A y C. ....	82
Figura 41. Curva de infiltración (entre zanjas) parcela A y hietogramas de los eventos seleccionados. ....	84
Figura 42. Curva de infiltración (entre zanjas) parcela C y hietogramas de los eventos seleccionados. ....	86
Figura 43. Cantidad de biomasa por sitio de muestreo, de las parcelas C y CT.....	89

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Coordenadas geodésicas de las estaciones de la RGNA (ITRF2008, época 2010.0)	28
Cuadro 2.	Contenido volumétrico de humedad ( $\theta_v$ ), tdr y método estándar.....	37
Cuadro 3.	Modelos de predicción de contenido de humedad volumétrica corregido. ....	38
Cuadro 4.	Dimensiones de secciones de zanjas bordo en las parcelas A y C.....	41
Cuadro 5.	Características de eventos de precipitación para los años de estudio. ....	42
Cuadro 6.	Número de muestras de biomasa en las parcelas de muestreo.....	44
Cuadro 7.	Prácticas de conservación de suelo y agua por predio inventariado. ....	48
Cuadro 8.	Dimensiones de las zanjas bordo por predio inventariado (media y desviación estándar).....	49
Cuadro 9.	Descripción del perfil de suelo para las parcelas A y AT.....	52
Cuadro 10.	Análisis físico del perfil de suelo, parcelas A y AT.....	53
Cuadro 11.	Análisis químico del perfil de suelo, parcelas A y AT.....	54
Cuadro 12.	Descripción del perfil de suelo, parcela B y BT.....	56
Cuadro 13.	Análisis físico del perfil de suelo, parcelas B y BT.....	57
Cuadro 14.	Análisis químico del perfil de suelo, parcelas B y BT.....	57
Cuadro 15.	Descripción del perfil de suelo, parcela C.....	60
Cuadro 16.	Análisis físico del perfil de suelo, parcelas C y CT.....	61
Cuadro 17.	Análisis químico del perfil de suelo, parcelas C y CT.....	61
Cuadro 18.	Dimensiones de las zanjas y bordos por parcela.....	62
Cuadro 19.	Pendiente medida del fondo de las zanjas en la zona de estudio.....	63
Cuadro 20.	Dimensiones ajustadas de las zanjas por parcela y reducción en la capacidad de almacenamiento. ....	65
Cuadro 21.	Características del área de captación de las zanjas bordo en las parcelas de estudio. ....	69
Cuadro 22.	Eficacia de las zanjas bordo en la captación de agua.....	70
Cuadro 23.	Efecto de las zanjas bordo en el contenido de humedad por sitio y parcelas de muestreo.....	76
Cuadro 24.	Efecto de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas del suelo, parcela A, C, AT y CT (media y desviación estándar).....	78

Cuadro 25.	Efectos de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas de los suelos de las parcelas A y C.....	80
Cuadro 26.	Exceso de lluvia por evento en la parcela a .....	83
Cuadro 27.	Variación del volumen escurrido por metro lineal en las zanjas bordo de la parcela A .....	85
Cuadro 28.	Efecto de las zanjas bordo en la producción de biomasa en las parcelas de muestreo. ....	88
Cuadro 29.	Efecto de las zanjas bordo en la producción de biomasa en las parcelas. ....	90
Cuadro 30.	Zanjas bordo y presas de tierra por predio, superficie y lámina potencial de captación. ....	104
Cuadro 31.	Presas filtrantes de piedra acomodada. ....	105
Cuadro 32.	Presas de tierra compactada .....	105

## 1. INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo es un problema ambiental complejo que afecta la seguridad alimentaria, la disponibilidad de agua y la conservación de la biodiversidad (Bouma y McBratney, 2013; McBratney *et al.*, 2014), ya que, es un conjunto de procesos que disminuyen la capacidad productiva actual y futura del suelo para sostener la vida (Oldemann, 1988; Warren, 2002). Además, reduce la capacidad del suelo para funcionar dentro de los ecosistemas naturales, o con manejo, para sostener la productividad biológica, mantener calidad del medio ambiente y promover la salud vegetal y animal (Herrick, 2000).

Ante esta problemática se ha desarrollado y fomentado el manejo sustentable de tierras como una intervención estratégica en la prevención o reducción de la degradación del suelo, entendido como un manejo integral que genere beneficios para la población y el medio ambiente (Stocking, 2009). Este manejo promueve el mantenimiento de las funciones ecológicas y contribuye a la conservación y productividad de las tierras (Gisladottir y Stocking, 2005).

Con este enfoque se han establecido prácticas de conservación de suelo y agua, en zonas con riesgo de degradación o donde existe escasez de agua. Una de las principales prácticas que se construyen en la actualidad en México son zanjas de infiltración, financiadas por programas gubernamentales (Cotler *et al.*, 2015) o por fundaciones. Un tipo de zanjas de infiltración que se implementan son las zanjas bordo, que se definen como una técnica de producción-recolección de agua en laderas, que se subdividen en  $n$  unidades (Flores, 2012), se construyen como continuos en curvas a nivel y el suelo excavado se coloca aguas abajo de la zanja para formar el bordo (CONAFOR, 2014).

Esta práctica se realiza principalmente para reducir la longitud de la pendiente (Anschütz *et al.*, 1997); captar el agua que escurre y propiciar su infiltración (Pizarro *et al.*, 2008); conservar humedad para favorecer la producción de biomasa y la forestación en ambientes degradados (Singh *et al.*, 2013); prevenir la erosión laminar, impedir la formación de cárcavas y mejorar la calidad del agua (CONAFOR, 2014).

Las zanjas de infiltración se recomiendan en: climas áridos y semi-áridos; con pendientes de 5 hasta 40%; en zonas con escasa vegetación natural (pastos y matorrales) y con problemas de

erosión laminar hídrica; suelos poco profundos (menos de 20 cm) y de textura arenosa a franca; y sitios donde domina el escurrimiento superficial sobre el sub-superficial (Cotler *et al.*, 2015).

Para evaluar el impacto de zanjas de infiltración se han propuesto diferentes metodologías a distintos niveles, desarrollando herramientas y métodos para recopilar y analizar los conocimientos biofísicos y socioeconómicos (Pizarro *et al.*, 2008, Schwilch *et al.*, 2011, Cotler, *et al.* 2013, Singh *et al.*, 2013), sin embargo, la investigación de los efectos que genera la implementación de las zanjas bordo requiere de información a largo plazo para evaluar su sostenibilidad.

Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas del suelo y en la producción de biomasa. Los resultados permitirán establecer criterios para orientar, por su pertinencia técnica, la implementación de esta práctica en la región.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas del suelo y en la producción de biomasa.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar la eficacia de diseño de las zanjas bordo para captar escurrimientos.
- Analizar el impacto de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas de los suelos.
- Medir los efectos de las zanjas bordo en la producción de biomasa.

## **3. HIPÓTESIS**

Las zanjas bordo que se establecen en zonas semiáridas modifican las propiedades hidrodinámicas del suelo y favorecen la producción de biomasa.

## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 Suelo

El suelo es un cuerpo natural formado por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se encuentra sobre la superficie de la tierra, ocupa un lugar en el espacio y se compone por horizontes o capas que se distinguen del material parental por las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia, o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2014). Su formación ocurre a través de procesos de intemperismo físico, químico y biológico (Blum *et al.*, 2006), con la interacción de factores como clima, material parental, topografía, vegetación y tiempo (Phillips *et al.*, 2008; Bockheim *et al.*, 2014).

Como resultado de los procesos de formación, el suelo adquiere propiedades físicas, químicas y biológicas particulares, las cuales, permiten el desarrollo de funciones ecológicas, como soporte para el crecimiento de las plantas, producción de alimentos y forrajes; capacidad de filtrar, amortiguar y transformar materiales entre la atmósfera, la cubierta vegetal y manto freático. Los suelos influyen en el ciclo del agua, así como en el intercambio de gases entre sistema terrestre y atmosférico. El suelo es un hábitat biológico y una reserva genética para una gran variedad de organismos (Blum *et al.*, 2006; Bouma y McBratney, 2013) (Figura 1).



Figura 1. Ciclo del agua y funciones del suelo.

Fuente: Connolly, (1998) y Blum *et al.*, (2006)

En este contexto es importante considerar la capacidad del suelo para mantener la productividad de las plantas, los animales, y para conservar o mejorar la calidad del agua (Karlen *et al.*, 1997), ya que, un manejo adecuado permite equilibrar la presión sobre el recurso. Además, es necesario determinar que tan bien funciona el suelo sometido a manejo, a través de indicadores e índices que evalúen las propiedades del suelo (Bastida *et al.*, 2008).

Existen un gran número de indicadores e índices para evaluar tanto suelos naturales como agroecosistemas (Bastida *et al.*, 2008), algunos de los principales indicadores se presentan a continuación: **indicadores físicos estáticos:** textura (arena, limo arcilla %) y profundidad (m); **indicadores dinámicos:** densidad aparente ( $\text{gcm}^{-3}$ ), capacidad de retención de agua (cm de agua, en el rango de 33>1500 kPa), rugosidad, conductividad hidráulica a saturación (flujo de agua en la columna de suelo  $\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ ), pérdida de suelo (mm), compactación (resistencia a la penetración MPa), porosidad (% volumen de poros en el suelo), estabilidad de agregados, infiltración ( $\text{cm h}^{-1}$ ) (Schoenholtz *et al.*, 2000; Dexter, 2004).

**Indicadores químicos:** carbono orgánico (%), materia orgánica (%), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de saturación de bases (PSB), nitrógeno total, saturación de aluminio, conductividad eléctrica (CE) (Schoenholtz *et al.*, 2000). **Indicadores biológicos** propuestos: producción de biomasa (g), cobertura (%), biomasa microbiana, respiración, actividad biológica y enzimática, los cuales, son altamente sensibles a los cambios, más que los indicadores físicos y químicos (Bastida *et al.*, 2008).

La retención, infiltración y disponibilidad de agua son universalmente importantes para el seguimiento de todas las funciones del suelo. La capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica saturada también son dos propiedades ampliamente utilizadas como indicadores dinámicos (Schoenholtz *et al.*, 2000).

#### 4.1.1 Textura, densidad aparente y materia orgánica

La textura se refiere a la distribución proporcional del tamaño de partículas minerales que componen el suelo (Dexter, 2004), se cuantifica en términos de contenido de arena, limo y arcilla. Estos se definen en el sistema de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA) como partículas con diámetros esféricos efectivos: Grava > 2 mm,

arenas 2 - 0.05 mm, limos 0.002 - 0.05 y arcillas <0.002 mm (Dexter, 2004), y de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS) asigna rangos para: Grava > 2 mm, arenas 2 – 0.2 mm, limos 0.002-0.02 y arcillas <0.002 mm.

La textura es una propiedad física importante de la fase sólida del suelo, ya que, la proporción de las partículas de arena, limo y arcilla influye en la agregación y estabilidad de estructura del suelo (FAO, 2009), translocación de nutrimentos, actividad biológica, diversidad de especies, crecimiento de raíces (Lal, 1994), infiltración del agua de lluvia y en la capacidad de retención del agua en el suelo (Saxton y Rawls, 2006).

La densidad aparente es la relación entre la masa del suelo y el volumen aparente del mismo (sólidos y espacio poroso), la unidad de medida generalmente está dada en  $\text{g cm}^{-3}$ . La densidad aparente está relacionada directamente con la porosidad total, además, es un indicador del estado de compactación del suelo, sus propiedades hidrodinámicas y de transferencia de gases (Blake y Hartge, 1986). Los valores de la densidad aparente, para suelos secos, están relacionados con la clase textural, así, para suelos de textura fina es de  $1.1 \text{ g cm}^{-3}$ , para suelos con textura media de  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$  y para los de textura gruesa es de  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$ . Sin embargo, la densidad aparente también está influenciada por el contenido de materia orgánica (Arvidsson, 1998) y la estructura del suelo (Hamblin, 1985).

La materia orgánica es un componente muy activo, por las condiciones de adición y descomposición continua de la misma, la adición se da con los desechos de hojas y raíces de plantas y desecho de animales (Blum *et al.*, 2006). Su distribución depende de las propiedades físicas del suelo, tipo de vegetación y manejo a que esté sujeto, sin embargo, tiende a acumularse en los primeros centímetros del suelo (Sisti *et. al.*, 2004). Los productos de su descomposición son el dióxido de carbono, elementos nutritivos para las plantas y humus (Blum *et al.*, 2006). Asimismo, la materia orgánica tiene un efecto directo en la capacidad de retención de agua debido a su naturaleza hidrófila, y un efecto indirecto en la estructura del suelo (Klute, 1986).

#### **4.1.2 Contenido de humedad**

El agua en el suelo constituye alrededor del 0.05% del agua en el planeta, es una variable clave en el sistema "suelo-vegetación-atmósfera" (Entekhabi *et al.*, 1996; Robinson *et al.*, 2008a), ya que,

controla o modula procesos físicos, biológicos y químicos. Particularmente en zonas áridas y semiáridas, el contenido de humedad es uno de los principales controles sobre la estructura, función y diversidad de los ecosistemas (Robinson *et al.*, 2008a), y en conjunto con los nutrientes son factores importantes para la producción de biomasa (Singh, 2004; Blum *et al.*, 2006). Esta variable depende principalmente de las propiedades del suelo como textura, estructura, porosidad, contenido de materia orgánica y la composición de la fase en solución (Klute, 1986).

El contenido de agua en el suelo se expresa de tres maneras, por unidad de masa, de volumen y de estado energético del agua (Hillel *et al.*, 1980b). El contenido de agua por unidad de masa o volumen se conoce como humedad del suelo y el estado energético del agua se expresa en términos del potencial matricial, es decir, la capacidad del suelo para retener agua.

La humedad y la capacidad de retención se representan de manera gráfica con la curva característica de humedad o curva capilar de presión-saturación, esta es una parte fundamental de la caracterización de las propiedades hidráulicas del suelo. La curva es sumamente variable en espacio y tiempo, por adiciones (precipitación e infiltración) o pérdidas de agua (evaporación y extracción de agua a través de la raíz) (Hillel *et al.*, 1980b).

La humedad en el suelo se expresa en contenido gravimétrico ( $\theta_g$ ) o volumétrico ( $\theta_v$ ) y su medición gravimétrica se expresa en unidades de gramo por gramo y su medición volumétrica en unidades de metro cúbico por metro cúbico (Robinson *et al.*, 2008a). Ambas medidas están relacionadas por:

$$\theta_v = \theta_g(\rho_b/\rho_w)$$

Donde  $\rho_b$  es la densidad aparente en seco y  $\rho_w$  es la densidad del agua.

Las estimaciones de contenido de humedad del suelo se realizan a través de: mediciones en campo o in situ, técnicas de teledetección y modelos de simulación de balance hídrico del suelo (Calamita *et al.*, 2012). Para las mediciones in situ el método gravimétrico es el procedimiento estándar y consiste en secar una muestra de suelo al horno a 105 ° C por 24 h. Las principales desventajas de este método es que es destructivo y consume mucho tiempo (Robinson *et al.*, 2008a), por ello, en

mediciones que requieren de seguimiento puntual de la humedad se recurre a equipos que la estimen de manera indirecta (Robinson *et al.*, 2008b).

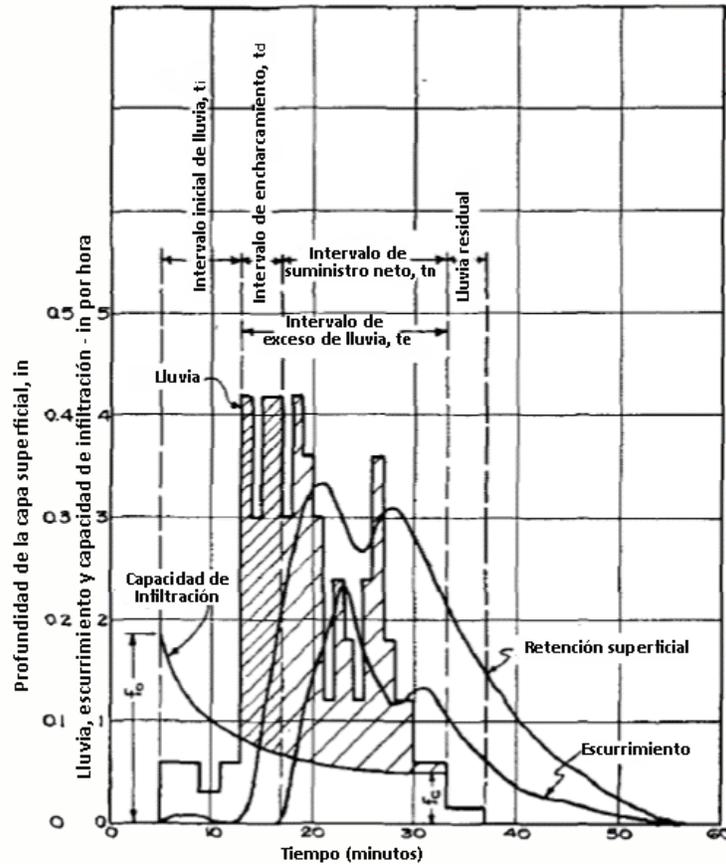
Uno de estos equipos es el reflectómetro de dominio de tiempo (TDR), se basa en la resistividad del medio al tránsito de una onda electromagnética a través de una guía (ida y vuelta) y cuya velocidad de onda en los suelos depende de la permisibilidad dieléctrica (Robinson *et al.*, 2008a). Las ventajas de los TDR es que son instrumentos portátiles, robustos y se les pueden acoplar guías (barras de acero inoxidable) que varían en longitud usando un conector, además, tienen una alta resolución temporal, rapidez de adquisición de datos y precisión en las mediciones. El uso de TDR en suelos duros o pedregosos es complicada e imprecisa, por dificultades en el posicionamiento del equipo en el suelo y la posible presencia de huecos (Robinson *et al.*, 2008b; Calamita *et al.*, 2012).

La capacidad de retención de agua, se puede expresar en unidades de energía por unidad de masa ( $\text{Jkg}^{-1}$ ), energía por unidad de volumen (dimensionalmente equivalente a la fuerza por unidad de área o presión) o energía por unidad de peso (dimensiones de longitud de la columna de fluido) del agua del suelo (Klute, 1986), la más utilizada es la segunda. Para determinar la función de retención de agua, el método tradicional consiste en establecer una serie de equilibrios de potencial entre el agua en una muestra de suelo y un cuerpo de agua con potencial conocido (Richards, 1948).

### **4.1.3 Infiltración**

La infiltración es un proceso que implica entrada y movimiento de agua en el suelo, se expresa en unidades de velocidad ( $\text{mm h}^{-1}$  o  $\text{cm h}^{-1}$ ). En condiciones naturales, el suelo presenta porosidad en la superficie y el agua entra por gravedad a través de grietas, macro poros, hasta llegar a los microporos (Dunne y Leopold, 1978) (Figura 1). Cuando el movimiento del agua se produce bajo la acción de la gravedad se considera como un proceso de "infiltración" o infiltración vertical y cuando el movimiento del agua ocurre con un valor de gravedad igual a cero, el agua se mueve a través de la matriz del suelo por gradientes de potencial matricial, este se conoce como flujo horizontal (Assouline, 2013).

En la infiltración intervienen tres subprocesos: entrada, retención y movimiento del agua (Dunne y Leopold, 1978). En condiciones naturales toda el agua se infiltra cuando la precipitación se presenta con bajas intensidades o la lámina precipitada es similar a la infiltración. En cambio, cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración, sólo una parte se infiltra y el resto se encharca en la superficie, para después escurrir según la topografía del terreno (Assouline, 2013) (Figura 2).

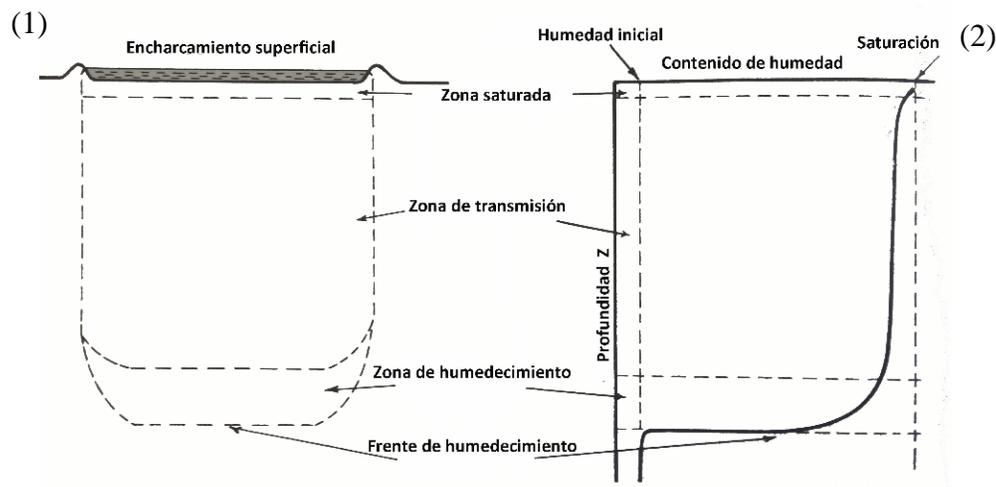


**Figura 2. Relación lluvia, escurrimiento y capacidad de infiltración.**  
Fuente: Horton (1940)

El perfil de humedecimiento inicia con la saturación del espesor superficial del suelo (zona saturada) y por debajo de esta zona se encuentra una zona menos saturada, donde hay un flujo constante de agua, que se conoce como zona de transmisión. En condiciones de un perfil homogéneo la humedad del suelo disminuye con el aumento de la profundidad, hasta un frente de

humedecimiento donde el gradiente de humedad es tan pronunciado que se marca un límite entre el suelo húmedo y el seco (Figura 3) (Hillel *et al.*, 1980a).

Asimismo, para conocer la velocidad máxima que la superficie del suelo absorbe agua, se utiliza la capacidad de infiltración o tasa potencial de infiltración (Horton, 1940). Esta se calcula con curvas de infiltración, donde se gráfica, la variación de la velocidad de infiltración en el tiempo, durante la precipitación (Figura 2). Los parámetros que se consideran son: infiltración inicial ( $f_0$ ), infiltración básica ( $f_c$ ), tiempo en que se alcanza el equilibrio (tiempo a  $f_c$ ), infiltración acumulada  $F(t)$  y tasa de infiltración media (Ponce, 1989). Algunos autores refieren que los parámetros de infiltración importantes son sortividad ( $S$ ) y conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) (Haghighi *et al.*, 2010).



**Figura 3. (1) sección esquemática del perfil de infiltración, (2) contenido de humedad a través del perfil.**

Fuente: Hillel, *et al.*, (1980a)

La tasa de infiltración es alta al inicio y decrece, independientemente del contenido de agua inicial, hasta llegar a una tasa constante (Figura 2). Entre más húmedo esté el suelo, la tasa de infiltración inicial será menor, debido a gradientes de potencial más pequeño, y se llegara más rápido a la infiltración básica. Además del contenido de humedad inicial, la infiltración depende de las condiciones de la superficie del suelo, la presencia de macroporos y la estabilidad de los agregados. La presencia de obstáculos al flujo, dentro de las capas del perfil influyen en la tasa de infiltración, como las capas de textura fina o sin estructura que pueden disminuir o impedir el movimiento del agua a través del perfil (Hillel *et al.*, 1980a).

Los parámetros mencionados con anterioridad se calculan ajustando datos de campo con modelos matemáticos. En general hay dos grupos de ecuaciones, 1) las derivadas de la teoría física, que se basan en aproximaciones de infiltración y límites específicos o condiciones iniciales del suelo (ecuaciones físicas) y 2) las que se basan en la similitud de los datos obtenidos en campo (ecuaciones empíricas) (Jačka *et al.*, 2016). Las ecuaciones físicas incluyen solución por aproximación de Richards (1931), la de Philip (1957), para infiltración vertical unidimensional y la de Green y Ampt (1911). Entre las ecuaciones empíricas se tienen las propuestas de Kostiaikov (1932), Horton (1940), Mezencev (1948), Holtan (1961), entre otros (Jačka *et al.*, 2016).

Dada la gran cantidad de modelos que se han desarrollado, Mishra, *et al.*, (2003) compararon 13 modelos con datos de laboratorio y los clasificaron por su desempeño en el cálculo de los parámetros, los modelos evaluados fueron: Singh-Yu, Holtan, Huggins-Monke, Smith-Parlange (no lineal), Horton, Kostiaikov modificado, Smith-Parlange (lineal), Kostiaikov, Mishra-Singh, Collis- George, Overton, Green-Ampt, Smith y Philip. El modelo semi-empírico de Singh-Yu superó a todos los demás modelos en cuanto a mejores resultados y el de Philip fue el peor evaluado, sin embargo, el modelo de Holtan y el de Horton fueron los modelos empíricos mejor clasificados. Los valores promedio de los parámetros del modelo de Horton:  $f_0$  varió de 2.73 cm h<sup>-1</sup> a 689.73 cm h<sup>-1</sup>,  $k$  de 0.01 min<sup>-1</sup> a 98.66 min<sup>-1</sup>, y  $f_c$  de 0.08 cm h<sup>-1</sup> a 18.08 cm h<sup>-1</sup>.

Jačka, *et al.* (2016) realizaron una comparación de siete ecuaciones para el cálculo de  $S$  y  $K_s$ , sus resultados muestran que en condiciones heterogéneas las ecuaciones empíricas de Mezencev y Horton, en comparación con las ecuaciones basados en propiedades físicas, presentaron mejor ajuste para los datos de infiltración. La  $K_s$  calculada con Horton, respecto a la de referencia, tuvo buena correlación en todos los sitios (la relación de  $K_s$  media con  $K_s$  de referencia fue igual a 1.5 para cada uno de los sitios de estudio).

## 4.2 Degradación del suelo

La degradación del suelo es la declinación de la calidad que disminuye la capacidad productiva actual y futura del suelo para sostener la vida, es decir, se reducen los atributos del suelo útiles para el ser humano (Lal, 2001), generalmente por la intervención del mismo hombre (Warren, 2002). La degradación está determinada por factores naturales como: suelo, clima, vegetación y

características ecológicas de cada región en particular, y por factores antropogénicos como: uso de suelo, manejo, sistemas de producción, tenencia de la tierra o soporte institucional (Lal, 2001).

La degradación se clasifica en cuatro tipos: erosión, que se origina por el desplazamiento del suelo del lugar de su formación a otro sitio; degradación física, química o biológica, que se generan por deterioro *in situ* (Oldemann, 1988). La erosión consiste en la remoción, transporte y depósito de partículas del suelo; a causa de la lluvia, escorrentía, viento y gravedad. (Lal, 2003). La erosión geológica, en contraste con la erosión causada por las perturbaciones antropogénicas, es un proceso lento. En cambio, las perturbaciones antropogénicas producen una degradación acelerada y destructiva que afecta de manera negativa la fertilidad, la estructura y la profundidad efectiva del suelo (Lal, 2003).

La degradación física implica una perturbación de la estructura del suelo que aumenta la densidad aparente, disminuye la porosidad, reduce la infiltración, incrementa el escurrimiento y aumenta la erosión hídrica (Lal, 2001). La degradación química reduce la fertilidad, disminuye el contenido de materia orgánica, provoca acidificación, favorece la contaminación y aumenta la salinización y alcalinidad. Por último, la degradación biológica reduce la cobertura vegetal, los hábitats, la biodiversidad, la producción de biomasa y la vida en el suelo (Liniger *et al.*, 2008).

En México se señala, en el último informe de la degradación causada por el hombre del 2002, que el 44.9% de los suelos del país tienen algún tipo de degradación. La degradación química, que cubre el 17.8% de la superficie del país, es la más importante; seguida de la erosión hídrica (11.9%), erosión eólica (9.5%) y la degradación física (5.7%) (SEMARNAT y COLPOS, 2002). Resultado de las actividades productivas, manejo de los recursos naturales, condiciones de relieve y agro –climatológicas, en el Estado de Oaxaca se estima que el 42.2% de su superficie tiene diferentes tipos y grados de degradación, en orden de importancia, la erosión hídrica afecta 18.48% de las tierras, le sigue la degradación química (8.23%), la erosión eólica (5.3%) y la degradación física (0.46%) (SEMARNAT y COLPOS, 2002). En la región Mixteca el 95% de su superficie presenta algún grado de erosión, producto del uso agrícola, sobrepastoreo y deforestación (Contreras *et al.*, 2005).

Ante las condiciones de degradación del suelo y de los recursos naturales en la región Mixteca, desde la década de los 30's del siglo XX, se han realizado obras y prácticas de conservación y hasta la fecha se siguen implementando a través de entidades federales, estatales, organismos no gubernamentales, asociaciones civiles y sociedad en general (Martínez et al., 2006).

### **4.3 Zanjas bordo**

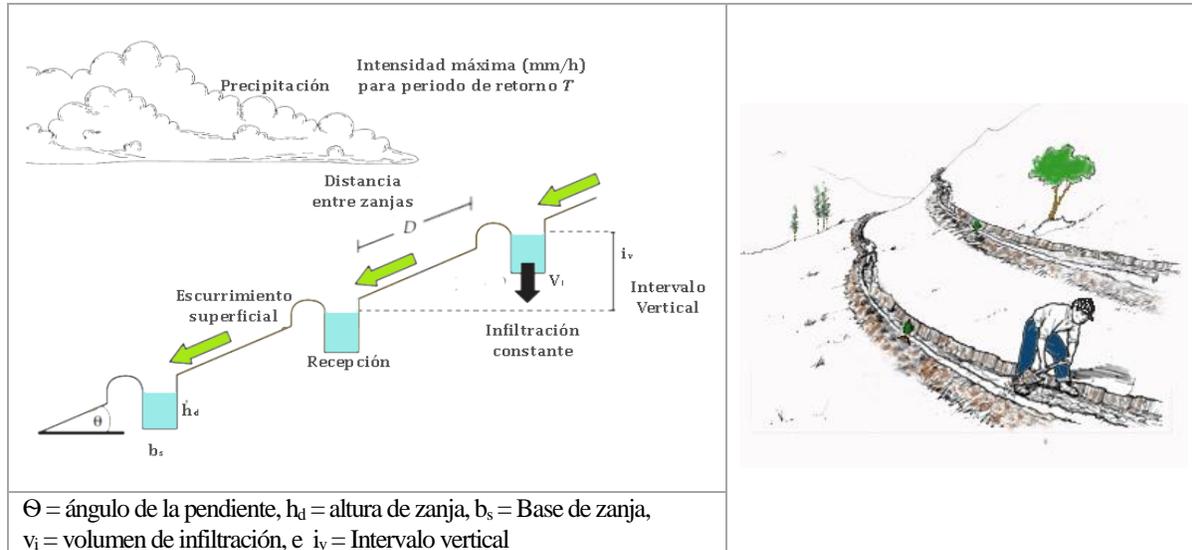
La conservación de suelos se concibe como el conjunto de acciones para el mantenimiento de la calidad del suelo o la mejora del potencial productivo (Burnell y Clawson, 2011), CONAFOR (2012) define la conservación de suelos como el conjunto de obras y prácticas para el control de los procesos de degradación y mantenimiento de la productividad potencial de los suelos. Las prácticas de conservación de suelo y agua difieren de acuerdo con su propósito: conservación del suelo, agua o vegetación; prevención de la degradación o mejoramiento de la calidad de los suelos.

Estas prácticas se clasifican en estructurales (mecánicas), no estructurales (vegetativas, manejo y agronómicas). Entre las estructurales se tienen las zanjas de infiltración, presas de piedra, terrazas a nivel; en las vegetativas sobre salen la plantación de árboles, setos para barreras y fajas de pastos; para las prácticas de manejo se tienen el cambio de uso de suelo, cercados para áreas de exclusión y pastoreo rotativo; en las agronómicas se incluyen los cultivos intercalados, cultivos en contorno y acolchados con residuos de cosecha (FAO, 2008).

En el manual de conservación de suelo y agua de COLPOS, (1991) se consideran dos variantes de zanjas de infiltración: las zanjas bordo y a las zanjas trinchera, diferenciadas por el largo de la zanja, pero con el mismo principio, otros autores Singh *et al.* (2012) y Singh *et al.* (2013) incluyen a las zanjas bordo y zanjas trincheras como prácticas para aprovechamiento de agua de lluvia o captación de agua de lluvia, las prácticas para captación de agua o zanjas de infiltración, se han implementado en regiones áridas y semi-áridas por miles de años (Critchley y Siegert, 1991).

Las zanjas bordo son un tipo de práctica de captación de agua o zanjas de infiltración (Pizarro *et al.*, 2008; Sing *et al.*, 2012), su propósito es la recolección de agua de una ladera, subdividida en

$n$  unidades con longitud variable (Flores, 2012), donde el suelo excavado, siguiendo curvas a nivel, se coloca aguas abajo de la zanja para formar un bordo (CONAFOR, 2014) (Figura 4).



**Figura 4. Sistema de zanjas bordo.**

Fuente: Elaboración propia con datos de (Flores, 2012)

Los objetivos de las zanjas de infiltración o prácticas para captación de agua de lluvia son: reducir la longitud de la pendiente (Anschütz *et al.*, 1997); captar el agua que escurre y propiciar su infiltración (Vohland y Barry, 2009, Pizarro *et al.*, 2008); conservar humedad, favorecer la producción de biomasa y la forestación en ambientes degradados (Singh *et al.*, 2013); impedir la formación de cárcavas, prevenir la erosión laminar y mejorar la calidad del agua (CONAFOR, 2014).

Se recomienda que las zanjas bordo se establezcan en climas áridos y semi-áridos (Flores, 2012: Singh *et al.*, 2013); en pendientes de 5 a 40% (COLPOS, 1991); en zonas con problemas de erosión laminar hídrica (CONAFOR, 2014); además, algunas zanjas de infiltración como las zanjas trinchera se recomiendan establecerse en zonas con escasa vegetación natural (pastos y matorrales); suelos poco profundos (menos de 20 cm), con textura de arenosa a franca; y sitios donde el escurrimiento superficial predomina sobre el sub-superficial (Cotler *et al.*, 2015).

El diseño del sistema de zanjas bordo supone que las unidades son independientes entre sí (Figura 4), es decir, no hay circulación de agua entre las distintas unidades de manera superficial; el nivel

de la sección transversal es uniforme a lo largo de la zanja; y la precipitación es uniforme (Flores, 2012). El diseño hidrológico de la zanja (sección transversal de la zanja y la separación entre zanjas, según el objetivo que se persigue con la implementación de la práctica, se considera: periodo de retorno de la precipitación ( $T_r$ ), curvas intensidad-duración-frecuencia, velocidad de infiltración del suelo, coeficientes de escurrimiento y área de captación (Pizarro *et al.*, 2008).

La CONAFOR (2014) propone dimensiones estándar de 0.4 m x 0.4 m y volumen de captación de 0.16 m<sup>3</sup> por metro lineal. Las dimensiones del bordo propuestas son de 0.35 m x 0.6 m, el cual inicia a 0.2 m del borde de la zanja aguas abajo. Para el cálculo del área de captación y separación de zanjas se proponen dos métodos (CONAFOR, 2014), el primero utiliza los datos de lluvia máxima en 24 h para un periodo de retorno de 5 años. Con base en el propósito de la práctica se considera suficiente asegurar la captación del 50% del volumen de agua que se produce en el área de captación. El otro método utiliza la fórmula de intervalo horizontal que considera la pendiente del terreno, un coeficiente *a* que depende de la intensidad de lluvia (0.09 - 0.24) y un coeficiente *b* que depende de la susceptibilidad del suelo a erosionarse.

#### **4.4 Antecedentes de evaluación de zanjas de bordo y zanjas trinchera**

En los últimos años a nivel mundial se han realizado investigaciones para evaluar los beneficios de las prácticas de conservación de suelo y agua con diferentes enfoques. Estas investigaciones se agrupan en: las que valoran la sustentabilidad (FAO, 2008; Liu *et al.*, 2013); la que evalúan el impacto ambiental (Kato *et al.*, 2011; König *et al.*, 2012); la que miden el impacto económico (Balana *et al.*, 2012; Teshome *et al.*, 2013), la que analizan el grado de adopción que tienen (de Graaff *et al.*, 2008); las que aplican modelos como SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arabi *et al.*, 2008; Ullrich y Volk, 2009) o APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) (Wang *et al.*, 2008; Francesconi *et al.*, 2015) para estimar los efectos de prácticas de conservación en la producción de biomasa y control de nutrientes, escurrimientos y erosión hídrica (Santhi *et al.*, 2013); las que se combinan modelos para la simular el crecimiento de los cultivos (WOFOST), el control de nutrientes (NUTMON) y la erosión hídrica (LISEM) (Hengsdijk *et al.*, 2005). Estos estudios se han implementado a diferentes escalas (desde nacional hasta nivel de parcela) y en

diferentes ámbitos (zonas políticas, regiones o cuencas) para evidenciar los efectos positivos de la inversión económica en la conservación del suelo y agua.

En México, Cotler, *et al.* (2015) evaluaron zanjas trincheras, desde la perspectiva de la conservación de suelos forestales, en 28 sitios ubicados en los estados de Baja California Sur, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Michoacán, Tlaxcala y Veracruz. En cada sitio caracterizaron las condiciones ambientales: material parental, precipitación anual, pendiente, altitud y orientación, vegetación, rasgos de erosión, profundidad y textura del suelo. La metodología consistió en tomar grupos de control para comparar parcelas con y sin prácticas. En las parcelas con práctica las muestras de suelo se tomaron en el bordo producto de la excavación de las zanjas, en el perfil del suelo donde se excavó la zanja y entre zanjas. Los indicadores evaluados fueron, estabilidad de agregados, carbono orgánico, densidad aparente, infiltración y humedad a capacidad de campo.

Los resultados del estudio indican que la construcción de esta práctica genera impactos negativos, como la erosión de suelos por la excavación, lo que causa el movimiento de 60-123 Mg ha<sup>-1</sup> y la exposición de 0.4-6.3 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono orgánico en la superficie. El material excavado cubrió un área de 2 m<sup>2</sup> por zanja, en una hectárea los bordos cubrieron hasta 5% de la superficie, lo que, alteró las funciones originales del suelo.

Además, se indica que esta práctica no mejora las condiciones de retención de humedad necesarias para sostener reforestaciones asociadas, la infiltración medida en los bordos de los sitios de evaluación presentó velocidades moderadas (5.08 - 15.24 cm h<sup>-1</sup>) y muy rápidas (> 50.8 cm h<sup>-1</sup>), los bordos de las zanjas tuvieron una capacidad de infiltración mayor que los sitios control, sin embargo, su capacidad de retención de humedad fue menor.

Cotler, *et al.* (2013) evaluaron la efectividad de prácticas en la recuperación de calidad del suelo, a través de indicadores biofísicos (contenido de humedad, densidad aparente, carbono total, nitrógeno total, pH y porosidad), y con el uso de indicadores sociales (adopción), en los estados de Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala y México. La metodología consistió en tomar grupos de control que permitieran la comparación entre parcelas con y sin prácticas. Las prácticas que se evaluaron fueron: zanjas trincheras, terrazas individuales y arreglo de material vegetal. Los resultados indican que las zanjas trincheras no influyen en los indicadores biofísicos de calidad del suelo, ya

que, el porcentaje de carbono total y nitrógeno total fue mayor en el sitio sin práctica que donde se establecieron las zanjas; en cuanto a humedad, pH y porosidad no hubo diferencia y la densidad aparente en el sitio con práctica fue mayor. Además, los indicadores sociales evidenciaron que la tasa de adopción de esta práctica por parte de la población es baja.

Singh, *et al.* (2013) estudiaron los efectos de diferentes prácticas de captación de agua de lluvia en el almacenamiento de agua en el suelo y del patrón de lluvia; buscaron una combinación adecuada de prácticas y especies vegetales en pendientes determinadas, observando los efectos del agua en el suelo sobre el crecimiento de vegetación arbórea y herbácea; y observaron el papel del crecimiento herbáceo en el uso y conservación del agua en el suelo. En un sitio de 17 ha, cerca de Banswara, Rajasthan, India.

El experimento se realizó con un diseño de bloques completos al azar en cinco repeticiones; tres pendientes (<10%, 10-20% y > 20%); cuatro prácticas de captación de agua de lluvia: zanja bordo (ZB), “Gradonie” (GD), zanja trinchera (ZT), zanjas en V (ZV) (Figura 5) y parcelas de control (sin práctica de captación de agua). La longitud de las prácticas fue de 30 metros y de 2 m en las zanjas trincheras, las ZB y ZT fueron de 45 cm x 45 cm en sección transversal, mientras que las GD y ZV fueron de corte vertical de 30 cm de altura; en total se evaluaron 75 parcelas experimentales, en dos épocas del año (diciembre y junio) durante 6 años.

Las variables que se midieron fueron el contenido de agua en el suelo (CAS), la altura y el diámetro del tronco de árboles (a 15 cm del suelo) (*Acacia catechu*, *Azadirachta indica*, *Emblica officinalis*, *Holoptelia integrifolia* y *Zyziphus mauritiana* sembrados en agosto de 2005), biomasa de herbáceas (pasto y herbáceas) del sitio y radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por árboles, herbáceas y la combinación de ambos ( $RFA_{int A/H/C}$ ).

Los efectos de ZV en la mejora del contenido de agua en el suelo fueron mayores en pendientes menores de 10%, mientras que el efecto más alto de las GD y ZB fueron en pendientes de 10-20% y en pendientes mayores de 20%, respectivamente. Asimismo, el mayor CAS se obtuvo en pendientes menores a 10%. El mayor crecimiento y producción de biomasa de la vegetación herbácea fue en el tratamiento ZV / GD en comparación con los tratamientos ZT / ZB. Las ZV y GD favorecieron el contenido de humedad en la capa superior del suelo, lo que facilitó el

crecimiento herbáceo, mientras que ZB y ZT facilitaron el almacenamiento de agua en un horizonte de suelo profundo favorable para el crecimiento de los árboles.



**Figura 5. Prácticas de captación de agua de lluvia o zanjas de infiltración.**

Fuente: Singh *et al.* (2012)

La distribución de las raíces de las plantas en las capas superficiales y profundas del suelo dio como resultado el mejor crecimiento de *Acacia catechu* y *A. indica* en las ZV, mientras que las ZB fueron mejor para *E. officinalis*, *H. integrifolia* y *Z. mauritiana*. Las prácticas mejoraron la biomasa herbácea entre el 22.4% y el 60.7% sobre las parcelas sin prácticas. Las lluvias influyeron en el CAS, pero las prácticas ayudaron a conservar el suelo y el agua, promovieron las plantaciones y el crecimiento herbáceo, además facilitó el proceso de forestación del sitio.

Jiménez (2010) evaluó las prácticas de conservación de suelo y agua (terrazas, bordos, zanja bordo, tinas ciega y roturaciones) que la Comisión del Papaloapan ejecutó en la década de los 70's en el Distrito de Coixtlahuaca, Oaxaca. El objetivo del estudio fue evaluar prácticas de conservación de suelo, su efecto sobre los procesos erosivos, costo y repercusión socioeconómica, cultural y ambiental. La metodología consistió en la selección de parcelas con prácticas y parcelas cercanas o vecinas sin prácticas de conservación (“parcelas pareadas”).

Con la metodología LADA (herramienta 5. Evaluación cualitativa de la erosión del suelo: estado, tipo y severidad) se verificó *in situ* el efecto de las obras en los procesos erosivos, además, se tomaron muestras de suelo y se analizaron en laboratorio (textura, susceptibilidad al enconstramiento, materia orgánica, infiltración y capacidad de retención de agua). Con la metodología WOCAT de la FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura) se realizaron entrevistas a agricultores, autoridades locales, entidades no gubernamentales y habitantes en general, para obtener costos de ejecución, adopción e impactos ambientales y culturales.

Las parcelas con zanjas bordo presentaron 51% de la superficie sin erosión, 11% con erosión leve y 38% con erosión moderada, estas prácticas tuvieron una influencia alta en el control de erosión laminar y en surcos; en las parcelas sin obra el 100% de la superficie seguía con erosión en diferentes grados, principalmente erosión laminar, en surcos y en cárcavas. Además, únicamente dentro de las zanjas hubo cambios positivos en contenido de materia orgánica y de humedad; con mejores resultados cuando la profundidad era de 0.4 m. Las zanjas bordo se categorizaron como de impacto medio, después de tres décadas de su establecimiento. El grado de adopción fue bajo, el financiamiento fue gubernamental, los costos de ejecución fueron más bajos cuando se utilizó maquinaria, sin embargo, esto no garantizó las dimensiones de diseño.

Pizarro, *et al.* (2008) realizaron un estudio en la zona semiárida costera e interior de Chile central, donde se instalaron cuatro ensayos experimentales, en cada ensayo se establecieron tres sitios, dos con zanjas de infiltración (zanjas bordo) y un testigo; se propusieron dos tamaños de zanja Tipo 1 (alto= 0.3m, ancho=0.3 m y base=0.3 m) y Tipo 2 (alto= 0.3m, ancho=0.3 m y base=0.2 m), con largo variable; en los tres sitios se establecieron plantas de *Pinus radiata*. El diseño de zanjas propuesto se enfocó fundamentalmente en el espaciamiento entre zanjas, de tal forma que permitiera asegurar la capacidad de almacenamiento de las zanjas con respecto al agua producida en el área de escurrimiento, la longitud de las zanjas fue variable.

Para el diseño usaron, el período de retorno, curvas intensidad-duración-frecuencia, velocidad de infiltración de los suelos, coeficiente de escorrentía y pendiente. En tres de los ensayos las distancias entre zanja fueron de 4 m (Tipo 1) y 6 m (Tipo 2); en el cuarto ensayo las distancias fueron de 9 m (Tipo 1) y 13 m (Tipo 2) debido a la mayor velocidad de infiltración. En cada sitio

de los ensayos se midió la respuesta hidrológica de las zanjas, el crecimiento y desarrollo de las plantas (biomasa), y el porcentaje de sobrevivencia.

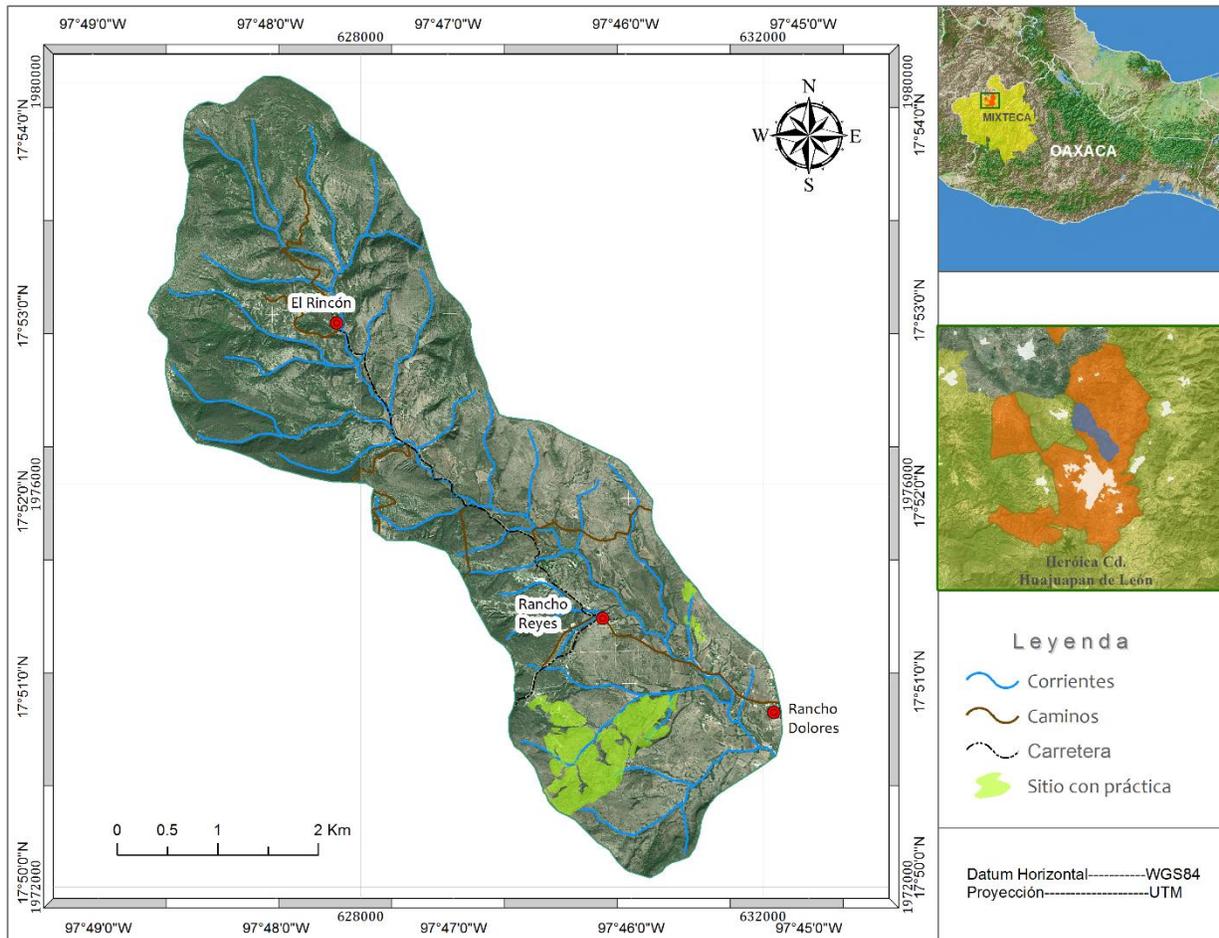
Después de dos años que se estableció el experimento se comprobó que las zanjas cumplieron con su función hidrológica, ya que, en los eventos extremos de lluvia (16.2 mm/h) la capacidad de almacenamiento fue suficiente para retener el volumen escurrido, además, se observó que el porcentaje de sobrevivencia en las parcelas con zanjas fue mayor que en los testigos, la zanja tipo 1 tuvo los mejores resultados, a excepción de un ensayo donde las zanjas tipo 2 y el testigo tienen valores mayores (testigo 95% y Tipo 2 100%). Además, en el ensayo Lohué la zanja tipo 1 tuvo mayor biomasa que el testigo (tipo 1 6.6 dm<sup>3</sup> y Testigo 5,9 dm<sup>3</sup>) y en el ensayo Manzanares la biomasa en la zanja tipo 2 fue mayor que el testigo (tipo 2 3.9 dm<sup>3</sup> y Testigo 1.7 dm<sup>3</sup>). Estos resultados indican que las zanjas favorecen la producción de biomasa, sin embargo, no es evidencia suficiente, por lo que, es necesario realizar más investigación con el fin de obtener más ensayos que incrementen el nivel de certeza de los resultados, pues estadísticamente las zanjas de infiltración no siempre tuvieron mejores resultados que los testigos.

La evaluación de los efectos de las zanjas bordo es de importancia a pesar de los trabajos que se han realizado para estas o de zanjas de infiltración en general, dada la variabilidad edáfica, geomorfológica y de vegetación en el que se realizan, de modo que éstas se puedan adaptar a las condiciones particulares de cada sitio, a través del manejo adaptativo pues es un enfoque para el manejo y aprendizaje simultáneos de los recursos, que permite aprender haciendo y alterar el manejo según la información que se obtenga (Williams y Brown, 2016) con el fin de alcanzar los objetivos de conservación del suelo.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio

El sitio de estudio se localiza en la cuenca Rancho Dolores, ubicada entre las coordenadas geográficas extremas: 17°49'53" y 17°54'13" de Latitud Norte; y 97°45'08" y 97°48'41" de longitud Oeste (Figura 6), a una altura promedio de 1,822 m y se encuentra a 6 km al norte de la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, en el municipio de Huajuapán de León, en la región Mixteca, Oaxaca. En términos morfológicos la cuenca es senil, ya que, ha sufrido procesos de erosión natural, y presenta una pendiente media de 27% (WWF, 2015).

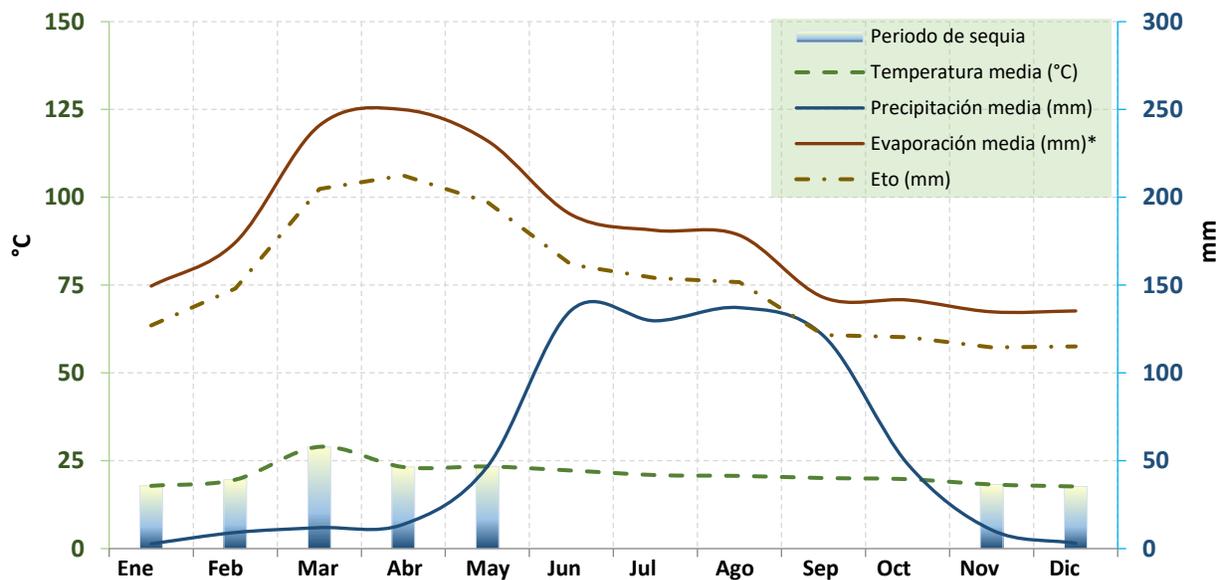


**Figura 6. Localización de la cuenca Rancho Dolores.**

Fuente: Elaboración propia con imagen de Google Earth y datos de INEGI

En la cuenca hay tres localidades, El Rincón (33 habitantes), Rancho Reyes (89 habitantes) y Rancho Dolores (273 habitantes). La tenencia de la tierra es pequeña propiedad y ejidal, tiene un área de 1,851.31 ha (WWF, 2015).

El clima en la cuenca es semiárido-cálido con una temperatura media anual de 21.1°C (Martínez *et al.*, 2014). El periodo de lluvias va de junio a septiembre con una precipitación anual de los últimos 10 años que varía de 377 a 980, con un promedio de 670 mm (WWF, 2015). El periodo de sequía se presenta de noviembre a mayo. La evaporación anual varía de 2,008 a 2,392 mm con un valor promedio anual de 2,151 mm. La evapotranspiración potencial promedio de zona es de 1,828 mm (Figura 7).

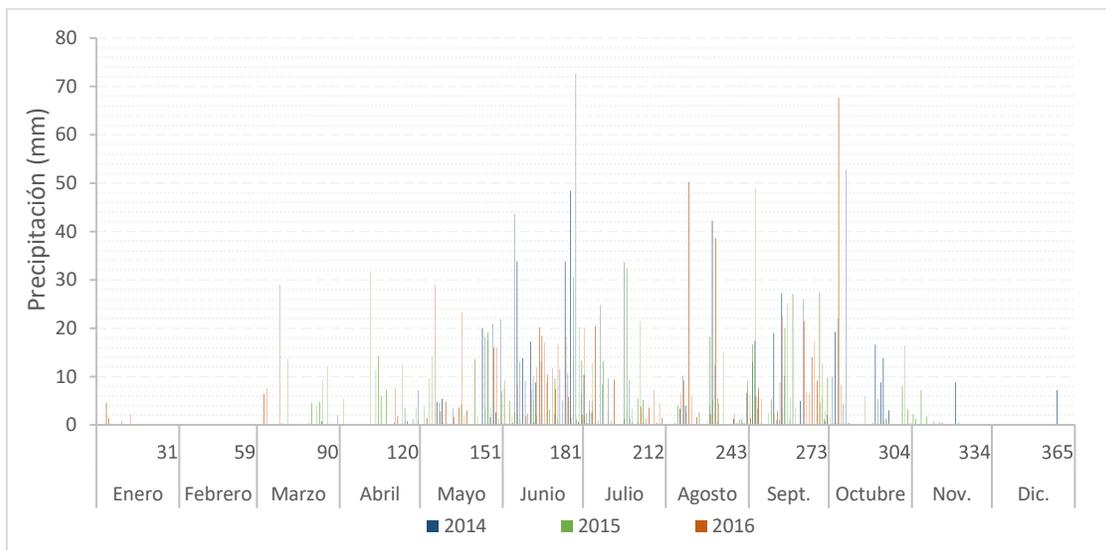


**Figura 7. Datos climáticos, estación Huajuapán de León (DGE), Clave 20275.**

Fuente: (WWF, 2015)

En el periodo de estudio, la precipitación anual registrada en 2014 fue de 1,022.6 mm y la lluvia máxima en 24 h de 72.6 mm (28 de junio), este valor de precipitación fue mayor que la lluvia máxima en 24 h para un periodo de retorno de 5 años (70.6 mm) para la zona (WWF, 2015). En 2015 la precipitación anual fue de 782.6 mm y la lluvia máxima en 24 h de 48.8 mm, la cual ocurrió el tres de septiembre y en el 2016 la precipitación registrada en el periodo de enero a octubre fue de 772 mm y la lluvia máxima fue de 67.6 mm (Figura 8).

En el periodo 2014-2016 la precipitación varió entre 772 y 1,026 mm, lo que indica, en comparación con la lluvia media anual (670 mm), que los años fueron húmedos. La distribución temporal de la lluvia es variable, específicamente en los meses de junio y julio de 2014 (año más húmedo) donde se presentó el mayor número de eventos superiores a 20 mm. En 2015 los eventos fueron de menor magnitud y solo se reportaron tres eventos superiores a 20 mm y en 2016 la distribución de los eventos fue similar y solo dos eventos, en los meses de agosto y octubre respectivamente, estuvieron por encima de 40 mm (Figura 8).



**Figura 8. Lluvia diaria (2014-2016), Estación meteorológica ESIME Huajuapán de León, de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS).**

Fuente: CONAGUA (2016)

El suelo dominante (91% de la cuenca) es Regosol (calcárico epiléptico) y Eutric Leptosol con textura media (RG ca ep + LP eu/2). En la parte baja y en pequeños valles se puede encontrar (8.1% de la cuenca) Vertisol (mázico calcárico) y Eutric Fluvisol con textura fina (VR mz ca + FL eu/3) (INEGI, 2006). Estos suelos se desarrollan sobre un sustrato geológico de rocas calizas y metamórficas, en algunos sitios expuestas, y depósitos ígneos intermedios (Martínez *et al.*, 2014). En la parte este de la cuenca se tienen problemas de erosión hídrica en cárcavas (42%), al suroeste existe erosión laminar moderada y en surcos (20.2%), en algunas partes altas y en la zona agrícola no hay erosión (20.0%), en sitios dispersos se presenta erosión hídrica moderada en cárcavas (10.8%) y erosión laminar leve (5.2%) (INEGI, 2013).

En la parte media de la cuenca la vegetación dominante son los pastizales (38%), dado que la principal actividad económica es la ganadería. En las partes altas se tiene bosque de encino (34%) y selva baja caducifolia (20%) y en las zonas bajas o en pequeños valles se encuentran áreas agrícolas (8%) (WWF, 2014) con producción de maíz principalmente (Martínez *et al.*, 2014).

## **5.2 Inventario de prácticas de conservación de suelo y agua**

El inventario de prácticas de conservación se realizó en dos etapas: la primera consistió en interpretación de imágenes de satélite y verificación en campo. En las imágenes de satélite SPOT de Google Earth (27/04/2012) se identificaron y ubicaron geográficamente las prácticas de conservación de suelo y agua, destacando por su presencia las zanjas bordo y las presas de piedra acomodada para la retención de azolves.

En la segunda etapa, el levantamiento de las prácticas se realizó con recorridos de campo, georreferencia y mediciones con cinta., la superficie con obra se dividió en polígonos de acuerdo a la tenencia de la tierra, con la participación de los propietarios de los predios. Las prácticas identificadas se clasificaron, de acuerdo con FAO (2008), como estructurales; sobresaliendo las zanjas de infiltración, presas de piedra y presas de tierra.

La información resultante de las prácticas se integró en una base de datos que consideró: clave de identificación, ubicación geográfica, información general y año de realización. Para las zanjas bordo se tomaron mediciones de ancho, profundidad (al inicio, en medio y al final) y largo. Para las presas filtrantes de piedra acomodada se registró el tipo de sección transversal, longitud de la sección transversal, altura y ancho de la corona. Para las presas de tierra compactada se registró la altura, ancho de la corona y de la base. En el inventario se incluyó nombre del productor, superficie de los predios (polígonos), el número de zanjas bordo por predio (polígono), densidad de zanjas bordo por unidad de superficie y la lámina de captación potencial de lluvia (mm) utilizando el cociente del volumen de captación potencial ( $m^3$ ) y la superficie del predio ( $m^2$ ).

## **5.3 Muestreo y seguimiento**

El muestreo y seguimiento se realizó con parcelas de muestreo (parcelas con y sin práctica), para condiciones similares del medio biofísico, ya que no se contó con una línea base que permitiera

comparar el sitio de estudio antes y después de las acciones de conservación , se eligió una parcela control o testigo sin práctica, lo más cerca posible (Cotler *et al.*, 2013, Singh *et al.*, 2013).

### **5.3.1 Parcelas de muestreo**

Las parcelas de muestreo se eligieron con base en los resultados del inventario de prácticas de conservación, la pendiente (INEGI, 2016), vegetación (WWF, 2014), tipo de manejo (agostadero) y factibilidad de exclusión por recomendación de los productores. Se realizó un sistema de información geográfica con las capas de cada uno de estos criterios y se seleccionaron tres parcelas con práctica, que se denominaron como A, B y C, y a sus respectivos pares sin práctica como AT, BT y CT (Figura 9).

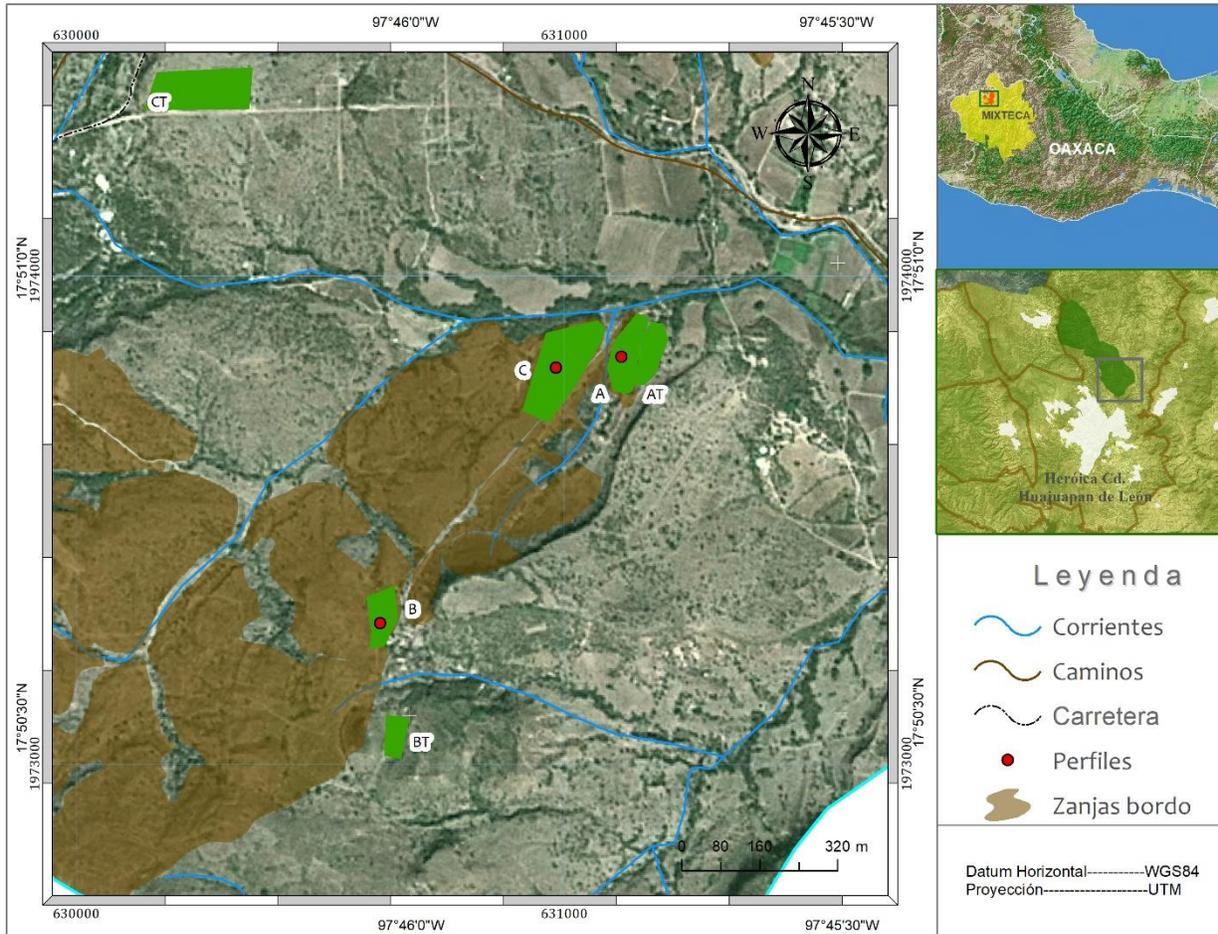
Las condiciones ambientales y de suelo se caracterizaron en las seis parcelas (con práctica y testigo) con recorridos de campo y muestreo: material parental, pendiente, altitud, orientación, vegetación (especies dominantes), profundidad y suelo.

#### **5.3.1.1 Caracterización del suelo de las parcelas de muestreo**

La caracterización de los suelos se realizó con base en el levantamiento de suelos, el cual permite describir sus características, clasificarlos y conocer sus linderos o límites (Soil Survey Staff, 1984, Ortiz, 2014). El levantamiento se efectuó en dos etapas: Pre-campo y campo. En la etapa de pre-campo se limitaron las parcelas con una imagen de satélite Google Earth (27/04/2012), en cada una se marcaron dos sitios de muestreo, en la parte alta y baja. La etapa de campo se excavaron pozos (1m x 1m x 0.5 m) por cada sitio de muestreo, se asignaron claves a las propiedades de los suelos por cada horizonte (textura, estructura, color y dureza) y se comparó la homogeneidad de los suelos entre pozos (Ortiz, 2014).

El reconocimiento del suelo de cada parcela se realizó con un muestreo sistemático; a través de una cuadrícula de cinco por cinco metros y se barrenó vértice por vértice, los primeros 50 cm (Ortiz, 2014). Con las barrenaciones, en cada par parcelas de muestreo (con práctica y testigo), se corroboró que los pozos de muestreo fueran homogéneos y se definieron los límites de las parcelas. Con la información de campo se ubicaron tres perfiles para la descripción del suelo (Figura 9), se

describieron con la metodología propuesta por Cuanalo (1990) y se tomaron muestras de cada horizonte.



**Figura 9. Parcelas de muestreo y perfiles de suelo.**

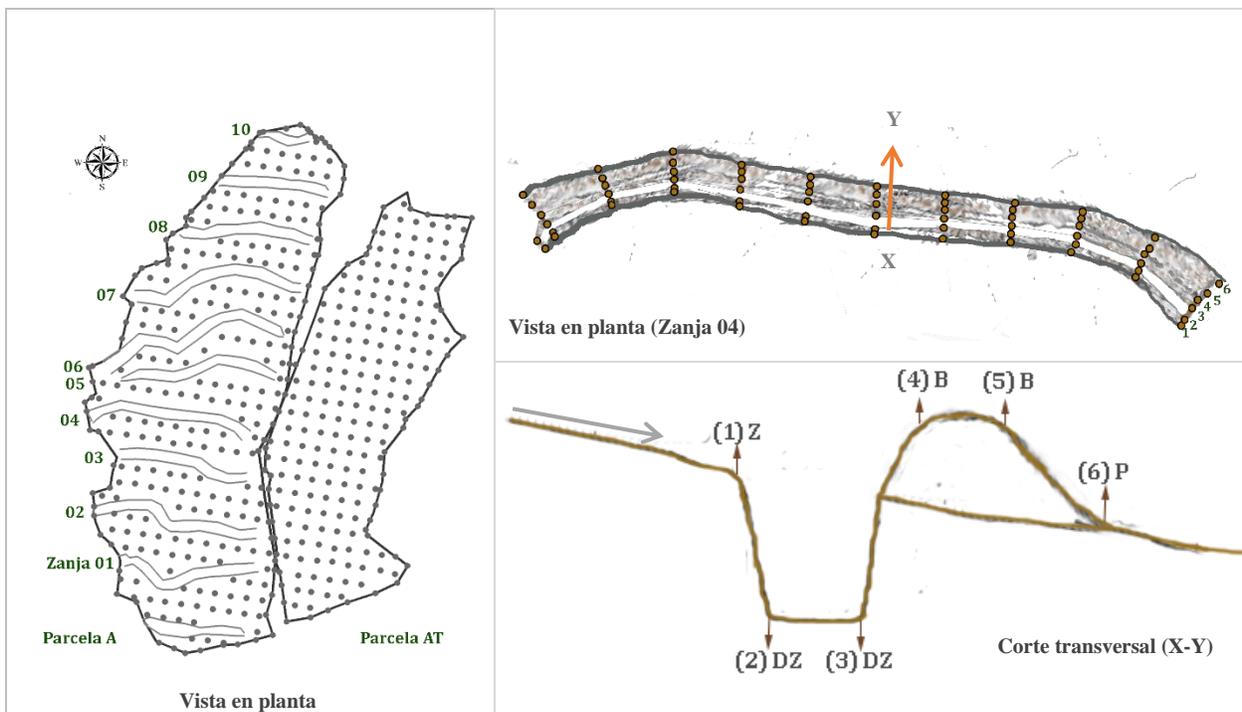
A las muestras de suelo secas y tamizadas se les realizaron análisis físicos y químicos. Las determinaciones físicas fueron: densidad aparente ( $D_a$ ), con el método del terrón y parafina; textura con el método de la pipeta americana y color (Carta de color Munsell). Las determinaciones químicas fueron: pH relación agua suelo 2:1; nitrógeno total ( $N_{total}$ ), por el método de Kjeldahl; carbono orgánico, con el método de Walkley y Black y materia orgánica (MO) con el factor de 1.724 de carbono orgánico; fósforo (P), por el método de Olsen; Capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de sodio (Na); potasio (K), calcio (Ca), carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) y magnesio (Mg) con el método del acetato de amonio; procedimientos acorde con el manual de Van

Reeuwijk (2003). La clasificación del suelo se realizó siguiendo los criterios de la WRB (FAO, 2015).

### 5.3.2 Sistema de zanjas bordo

#### 5.3.2.1 Topografía

La topografía de las parcelas y dimensiones de las zanjas bordo se obtuvieron con levantamiento topográfico, el método consistió en trazar un sistema reticular de 5 m con cinta (Figura 10). En las parcelas con prácticas el levantamiento en cuadrícula se combinó con secciones transversales en las zanjas, a cada 5m, en las secciones transversales los puntos se tomaron al inicio de la zanja (1Z), fondo esquina aguas arriba (2DZ), fondo esquina aguas abajo (3DZ), dos en el bordo (4B-5B) y uno más en el pie del bordo aguas abajo (6P) (Figura 10).



**Figura 10. (1) Método de levantamiento en cuadrícula y (2) Método de levantamiento transversal.**

Fuente: Elaboración propia

El levantamiento se realizó con GPS's de precisión ProMark™ 3 de la marca Magellan profesional (Figura 11). Se utilizó la función "Stop and go" con un tiempo para promediar de 15 segundos por punto (Magellan, 2007; Pachas, 2009). Para hacer correcciones en el terreno se instaló el GPS base

y con el móvil se tomaron los datos del terreno. La proyección utilizada fue UTM zona 14 con datum WGS84.

Los datos del levantamiento topográfico se procesaron con el software GNSS *soluciones* 3.80.8 y se corrigieron con información de referencia de las estaciones del sistema geodésico nacional (RGNA) (Cuadro 1), a través de archivos “Receiver independent Exchange” (RINEX) (INEGI, 2016a). Las coordenadas X, Y y Z se estimaron con una precisión de  $\pm 5$ cm.



**Figura 11. Toma de datos en campo con GPS ProMark™ 3.**  
Fuente: Fotografía de campo e imagen Maguellan (2007)

Cuadro 1. Coordenadas Geodésicas de las Estaciones de la RGNA (ITRF2008, ÉPOCA 2010.0)

Nombre de la Estación	Ubicación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altura Geodésica (m)	Altura vertical de la Antena (m)
COL2	Colima, Col	19° 14' 39.99474"	103° 42' 06.78208"	528.784	0.107
ICEP	Puebla, Pue.	19° 01' 58.88475"	98° 11' 15.35143"	2150.327	0.113
OAX2	Oaxaca, Oax.	17° 04' 42.02383"	96° 43' 00.26225"	1607.262	0.126
UQRO	Querétaro, Qro	20° 35' 28.09773"	100° 24' 45.69377"	1817.973	0.084
TOL2	Toluca, Edo. de México	19° 17' 35.64347"	99° 38' 36.50048"	2651.73	0.098
UVER	Boca del Río, Veracruz	19° 09' 55.68003"	96° 06' 51.67505"	3.212	0.082
VIL2	Villahermosa, Tab.	17° 59' 25.47838"	92° 55' 51.95484"	27.744	0.073

Fuente: (INEGI, 2016b)

### 5.3.2.2 Dimensiones de las zanjas bordo

Con los datos del levantamiento topográfico y el software QGIS 2.18.1 se obtuvo el área de captación, área que ocupan las zanjas bordo, espaciamiento entre zanjas y longitud de zanjas. Asimismo, con los datos del levantamiento en cuadrícula se generaron Modelos de Elevación Digital (MED), con la herramienta “b-spline” del módulo “*Raster creation tools*” de SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses* 2.1.2); la información del terreno permitió una resolución espacial de 0.2 m. Los modelos de elevación digital se utilizaron para el cálculo de la pendiente promedio por área de captación de cada zanja bordo, a través de la herramienta “upslope area” del módulo “*Terrain Analysis -Hydrology*” de SAGA (2.1.2).

Las dimensiones de las zanjas bordo se calcularon a través de perfiles transversales por sección que se construyeron con la herramienta “*cross profiles*”, del módulo “*Terrain Analysis – profiles*” de SAGA (2.1.2) (Figura 12). La profundidad de la zanja ( $h$ ) se calculó con la diferencia entre la cota del punto 1Z y el promedio de las cotas de los puntos 2DZ y 3DZ (Figura 12). El ancho de la base o fondo de la zanja ( $b$ ) se obtuvo con la distancia entre los puntos 2DZ y 3DZ. La cota del fondo de la zanja se estimó con el promedio de las cotas de los puntos (2DZ y 3DZ). El ancho de la parte alta de la zanja ( $s$ ) se calculó con la fórmula de triángulos semejantes, considerando la relación de bases con alturas como sigue:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2}$$

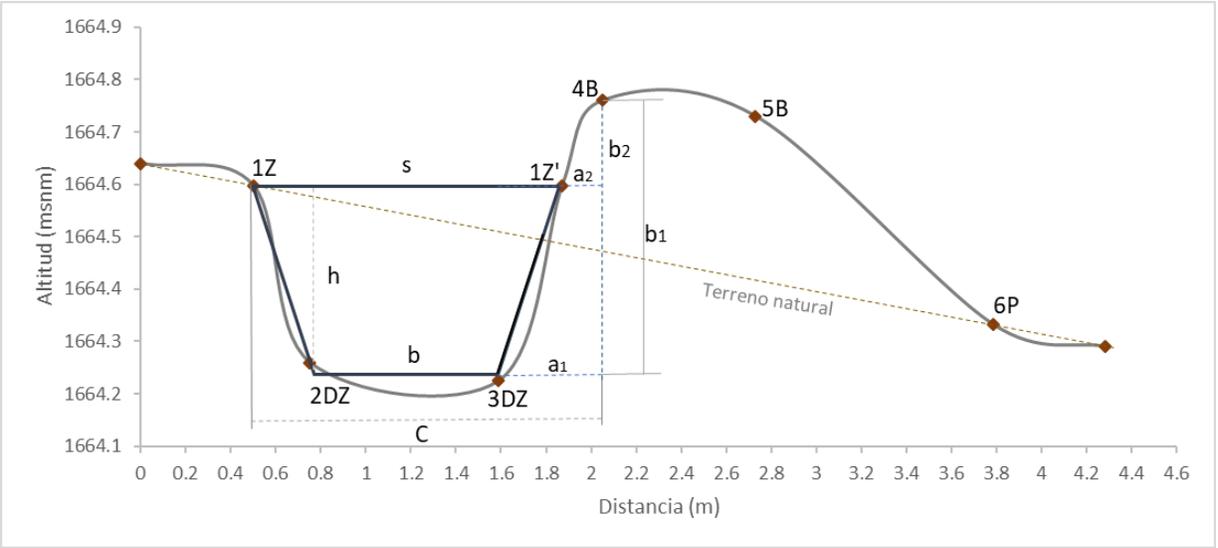
Despejando  $a_2$ :

$$a_2 = \frac{a_1 * b_2}{b_1}$$

Calculando  $s$ :

$$s = c - a_2$$

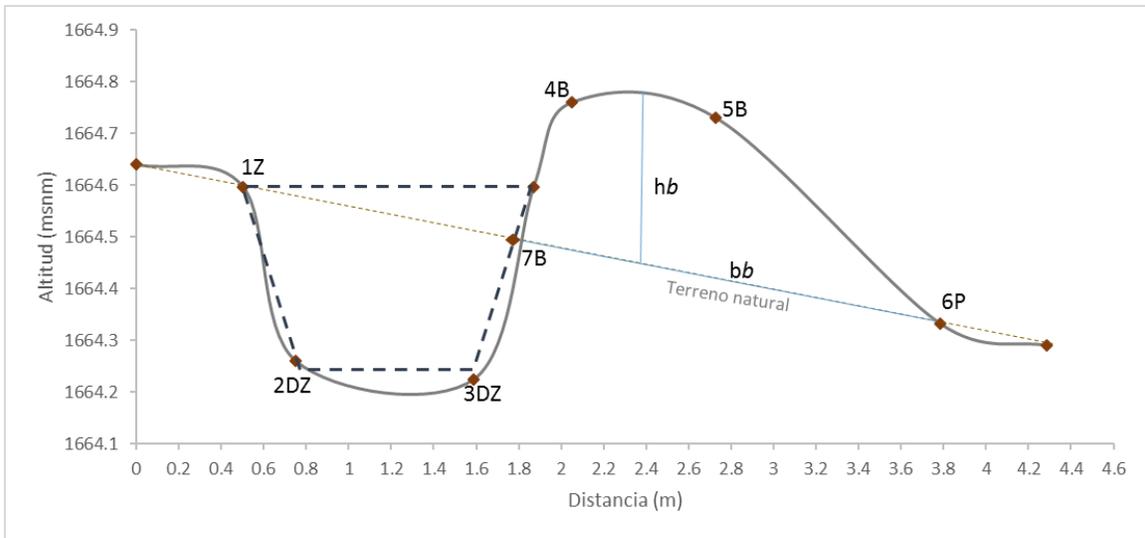
Donde  $a_1$  es igual a la distancia entre 3DZ y 4B,  $b_1$  es igual a la cota entre  $b$  y 4B,  $b_2$  es igual a la cota entre 1Z y 4B; y  $c$  es la distancia entre 1Z y 4B (Figura 12).



**Figura 12. Perfil transversal tipo de una zanja bordo.**

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones del bordo: altura ( $h_b$ ), base ( $b_b$ ) y el área ( $4B-5B-6P-7B$ ) se obtuvieron con los perfiles transversales de las zanjas (Figura 13) y con el comando “dist” y “área” de AutoCAD 2010. El volumen se calculó con el procedimiento descrito en el apartado 5.3.2.3.



**Figura 13. Perfil transversal para la estimación de dimensiones del bordo.**

Fuente: Elaboración propia

Para corroborar que el espaciamiento promedio entre zanja bordo cumpliera con las recomendaciones de diseño propuestos por instancias normativas se calculó con dos métodos de la CONAFOR (2014). El primero señala que debe asegurarse para un periodo de retorno de 5 años,

que las zanjas capten el 50% del escurrimiento. Para la estimación del escurrimiento se usó la lluvia máxima en 24 h, 70.6 mm (WWF, 2015) y las dimensiones promedio de las zanjas bordo medidas en campo.

Para el segundo método se utilizaron las expresiones de intervalo horizontal (IH) y vertical (IV) como sigue:

$$IH = (IV / P) \times 100$$

$$IV = (2 + (P / 3 \text{ o } 4)) \times 0.305$$

Dónde: P es la pendiente (%), 3 es el factor que se utiliza cuando la precipitación anual es menor a 1,200 mm y 4 cuando la precipitación anual es mayor (mm), 0.305 es factor de conversión de pies a metros.

### 5.3.2.3 Capacidad de captación potencial de las zanjas bordo

El volumen potencial de agua que pueden captar las zanjas se estimó considerando las áreas de las diferentes secciones transversales. El área promedio entre secciones se multiplicó por las longitudes parciales para obtener volúmenes por tramo de zanja, que al sumarlos resulta el volumen total por zanja, como se muestra a continuación:

- 1) Área de la zanja por sección ( $m^2$ )

$$A_{1...n} = \frac{(s + b) * (h)}{2}$$

- 2) Área promedio de la zanja entre secciones ( $m^2$ )

$$\bar{A}_{1..n} = \frac{A_1 + A_2}{2} \dots \bar{A}_n = \frac{A_{n-1} + A_n}{2}$$

- 3) Volúmenes parciales ( $m^3$ ):

$$V_1 = (\bar{A}_1) * (l_1) \dots V_n = (\bar{A}_n) * (l_n)$$

Donde  $l$  es la longitud entre secciones transversales de la zanja

#### 4) Volumen de captación de agua por zanja (VC) (m<sup>3</sup>)

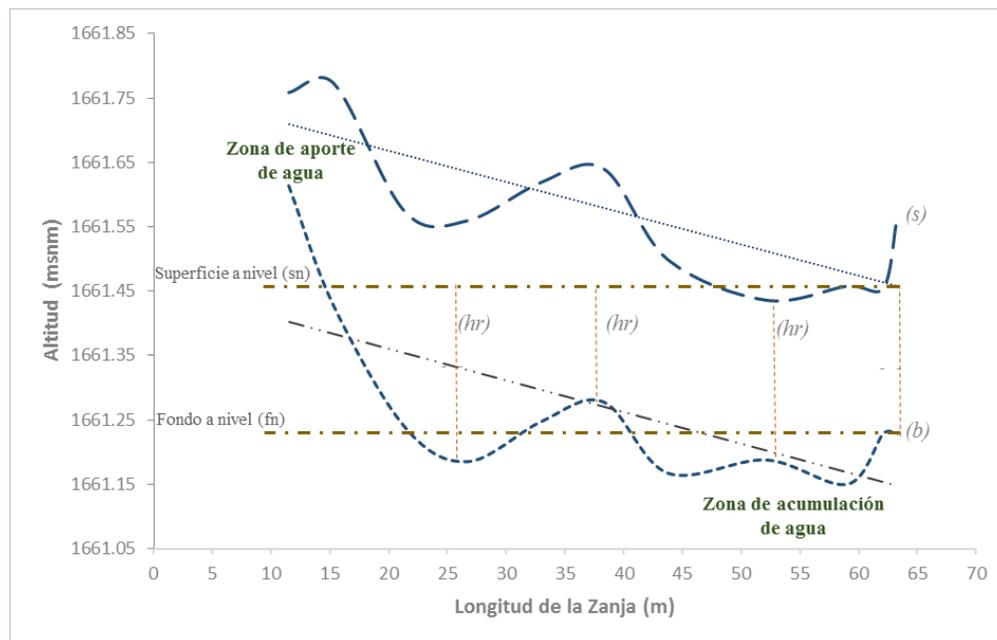
$$VC = V_1 + V_2 \dots + V_n$$

Con el volumen de captación de agua y el área de captación por zanja bordo se calculó la capacidad de almacenamiento potencial de agua (mm).

#### 5.3.2.4 Capacidad de almacenamiento real de las zanjas bordo

Para verificar la capacidad de almacenamiento de agua de las zanjas bordo, a lo largo de esta se graficaron las cotas del fondo (*b*) y la parte alta de la zanja (*s*) ( Figura 14). En todas las zanjas se observó que ambas cotas no siguen las curvas a nivel (en mayor o menor grado), como se aprecia en los perfiles longitudinales, ya que se identificaron tramos con o sin pendiente; lo cual, reduce la capacidad de almacenamiento de agua (Figura 14).

Debido a la pendiente longitudinal que tienen las zanjas se establecieron a partir del perfil del fondo de la zanja, dos zonas: la zona de aporte de agua donde las cotas son mayores y la zona de acumulación de agua, la parte de la zanja con menor cota (Figura 14). Además, se localizó una línea a nivel (*sn*) correspondiente a la cota de *s* más baja a lo largo del perfil de la zanja bordo (Figura 14).



**Figura 14. Perfil longitudinal, zanja 04 de parcela A.**

Fuente: Elaboración propia

Los cambios en la capacidad de almacenamiento potencial y la identificación de las zanjas que no siguen las curvas a nivel se estimaron con el valor de  $sn$ , para calcular por secciones transversales, la altura real ( $hr$ ) y el ancho real ( $sr$ ) de las zanjas. La  $hr$  se estimó con la diferencia entre el valor de  $sn$  y las cotas de  $b$  a lo largo de la zanja (Figura 14) y  $sr$  se calculó con el método de triángulos semejantes, modificando el procedimiento descrito anteriormente y que queda como sigue:

Triángulos semejantes (1)

$$\frac{a_1}{a_2'} = \frac{b_1}{b_2'}$$

Despejando  $a_2'$ :

$$a_2' = \frac{a_1 * b_2'}{b_1}$$

Triángulos semejantes (2)

$$\frac{a_1'}{a_2''} = \frac{b_1'}{b_2''}$$

Despejando  $a_2''$ :

$$a_2'' = \frac{a_1' * b_2''}{b_1'}$$

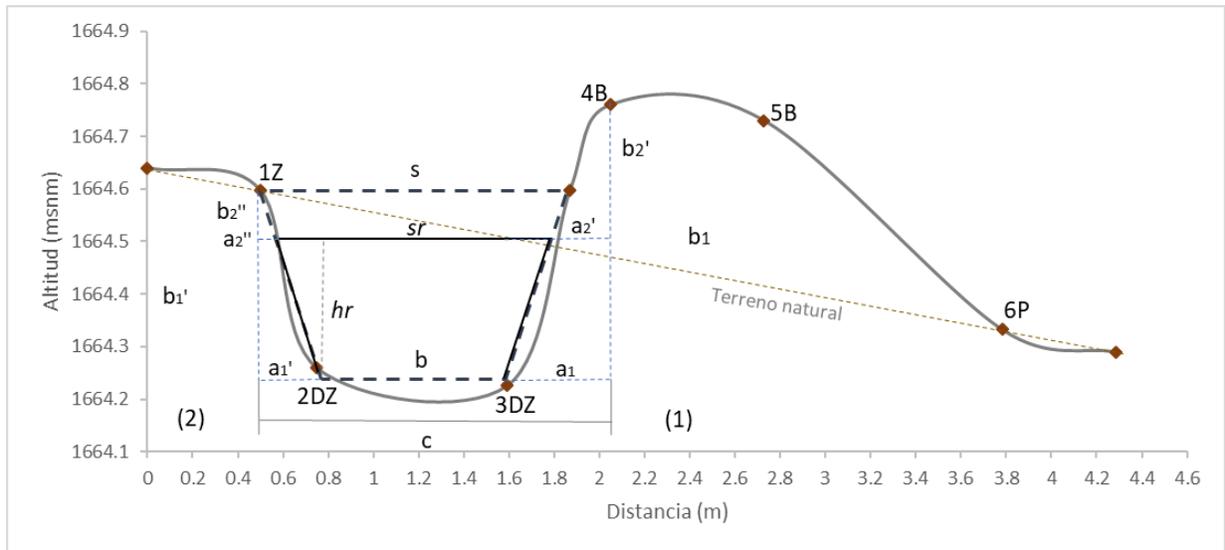
Calculando la superficie:

$$sr = c - (a_2' + a_2'')$$

Donde  $b_2'$  es igual a  $b_1$  menos  $hr$ ;  $a_1'$  es igual a la distancia que hay entre 1Z y 2DZ,  $b_1'$  es igual a la cota que existe entre  $b$  y 1Z,  $b_2''$  es igual a  $b_1'$  menos  $hr$  (Figura 15).

La capacidad de almacenamiento real de la zanja, en mm, se calculó con las dimensiones ajustadas y las mismas expresiones usadas para la capacidad de almacenamiento potencial; únicamente se sustituyó  $s$  por  $sr$  y  $h$  por  $hr$ . Finalmente, las zanjas se clasificaron con un índice de eficacia que se obtuvo como el cociente entre ambas capacidades de almacenamiento de agua en las zanjas (potencial y real) multiplicado por cien. Los valores del índice de eficacia para almacenar agua propuesta fueron: muy bajos (MB) cuando se capta entre 50-60% de la capacidad de almacenamiento potencial, baja (B) cuando la eficiencia varía de 60-70%, regular (R) cuando la

eficacia de captación fluctúa de 70-80%, alta (A) cuando varía de 80-90% y muy alta (MA) cuando va de 90-100%.



**Figura 15. Perfil transversal para el cálculo de  $s_r$ .**

Fuente: Elaboración propia

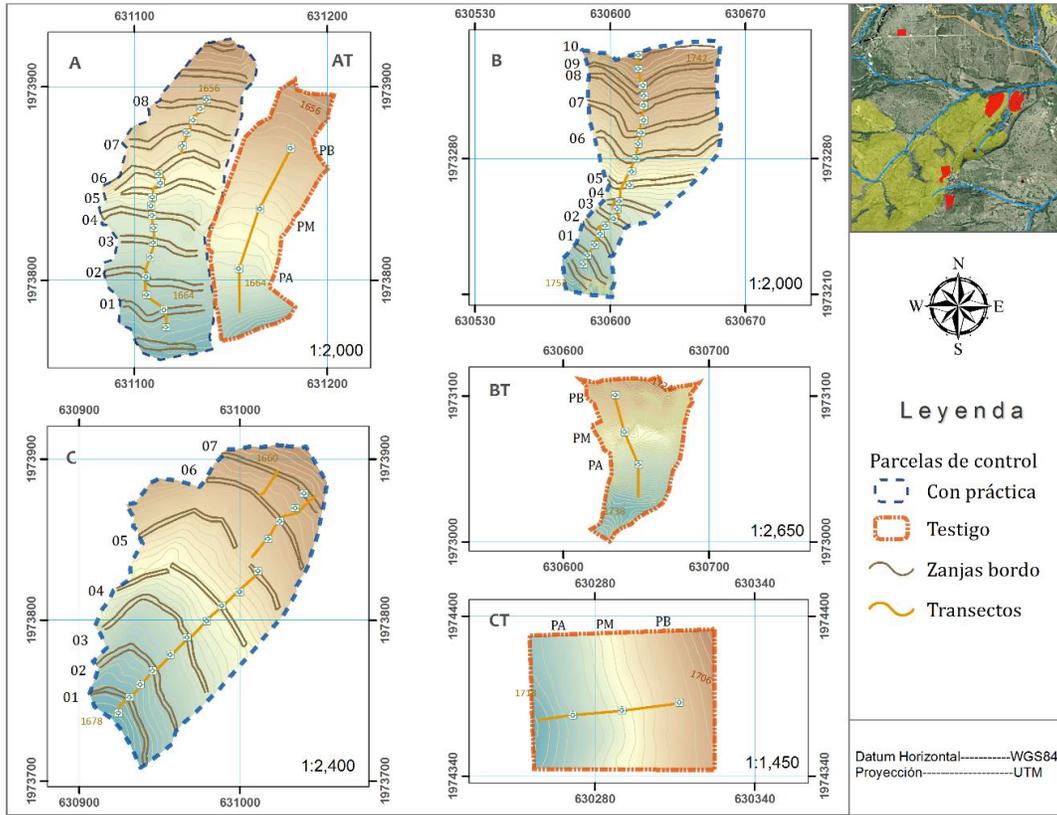
### 5.3.2.5 Índice topográfico de humedad

El Índice Topográfico de Humedad (ITH) se utilizó para comparar como las diferencias topográficas, entre las parcelas con obras y testigo, influyen en el movimiento superficial del agua en el terreno. El ITH calcula la acumulación de humedad, por pixel, de sitios donde la distancia vertical entre las cimas y valles es pequeña (Beven y Kirkby, 1979; Böhner et al., 2002; Böhner y Selige, 2006). Este índice se evaluó a través del módulo “SAGA Wetness Index” utilizando los modelos de elevación digital, el área de captación específica y la pendiente local.

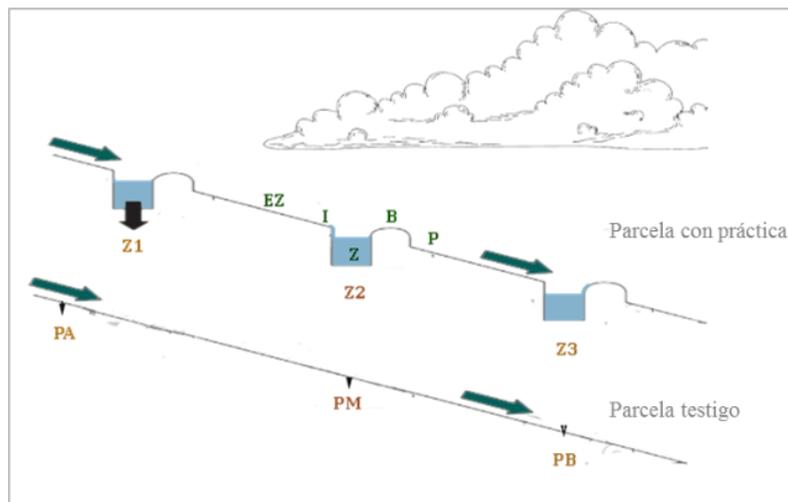
### 5.3.3 Contenido de humedad en el suelo

El seguimiento del contenido de humedad se realizó a través de transectos de muestreo. En la parcela A se eligieron 8 zanjas, en la parcela B 10 y en la parcela C 7 (Figura 16). En cada zanja bordo se ubicaron sitios de muestreo en: Entre Zanjas (EZ), Inicio (I), Zanja (Z), Bordo (B) y Pie (P), para obtener de manera detallada datos de humedad en cada componente del perfil del sistema zanjas bordo; mientras que en las parcelas testigos se tomaron en: Parte alta (PA), Parte media (PM) y Parte Baja (PB) (Figura 17), la humedad se midió a tres profundidades (0-5, 5-10 y 20 cm)

en las parcelas A, AT, B y BT, para las parcelas C y CT, por restricciones de profundidad solo se midió en la capa de 0-5 cm.



**Figura 16. Transectos de muestreo de humedad en las parcelas de muestreo.**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 17. Perfil de muestreo de humedad.**  
Fuente: Elaboración propia

En total, se midió la humedad en 134 sitios, con 3 repeticiones por sitio y profundidad. Los datos se tomaron el 3 de abril de 2016 (época de secas) y el 20 de mayo de 2016 (inicio de lluvias). En las parcelas A y AT se muestrearon 43 sitios, en las parcelas B y BT 53 sitios y en las parcelas C y CT en 38 sitios.

El contenido de humedad volumétrico se obtuvo con un TDR (*time-domain reflectometer*), modelo FieldScout TDR 300 (Figura 18) (Spectrum, 2015).



**Figura 18. Medición en campo del contenido de humedad, FieldScout TDR 300 y varillas.**

Fuente: Elaboración propia con datos de Spectrum (2015).

El TDR se calibró previamente en tres parcelas de un metro cuadrado, circulares con lámina a 20 cm de profundidad. En cada parcela se agregó agua hasta saturar el suelo, se tomaron mediciones con el TDR a cuatro profundidades 3.8, 7.6, 12 y 20 cm y se tomaron muestras para medir el contenido de humedad con el método gravimétrico (Robinson *et al.*, 2008), a 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm y 15-20 cm de profundidad.

Las mediciones y muestras se tomaron cada tres días por diez días, en el caso de la profundidad de 0-5 se tomaron medidas y muestras adicionales (Cuadro 2). En cada profundidad muestreada se determinó la densidad aparente del suelo con el método de volumen conocido ( $67.08 \text{ cm}^3$ ) (ISRIC, 1992). Los contenidos de humedad obtenidos por el método gravimétrico se convirtieron a contenido de humedad volumétrico ( $\theta_v$  método estándar) (Robinson *et al.*, 2008).

Cuadro 2. Contenido volumétrico de humedad ( $\theta_v$ ), TDR y método estándar.

Parcela	$\theta_v$ método estándar	$\theta_v$ TDR						
	05-10 cm	7.6 cm	05-10 cm	7.6 cm	10-15 cm	12 cm	15-20 cm	20 cm
01	0.64	0.88	-	-	-	-	-	-
02	0.53	0.81	-	-	-	-	-	-
03	0.51	0.81	-	-	-	-	-	-
01	0.64	0.84	-	-	-	-	-	-
02	0.55	0.80	-	-	-	-	-	-
03	0.53	0.73	-	-	-	-	-	-
01	0.59	0.81	-	-	-	-	-	-
02	0.49	0.76	-	-	-	-	-	-
03	0.46	0.67	-	-	-	-	-	-
01	0.44	0.70	0.44	0.67	0.41	0.77	0.44	0.67
02	0.43	0.51	0.42	0.73	0.41	0.80	0.42	0.73
03	0.34	0.33	0.40	0.58	0.38	0.70	0.40	0.58
01	0.34	0.39	0.40	0.66	0.39	0.68	0.40	0.66
02	0.32	0.34	0.37	0.48	0.37	0.67	0.36	0.50
03	0.29	0.37	0.36	0.50	0.37	0.52	0.37	0.48
01	0.36	0.30	0.34	0.46	0.35	0.59	0.34	0.46
02	0.30	0.36	0.36	0.44	0.36	0.55	0.36	0.44
03	0.32	0.28	0.34	0.41	0.30	0.43	0.34	0.41
01	0.32	0.30	0.33	0.42	0.28	0.32	0.33	0.42
02	0.31	0.37	0.25	0.21	0.29	0.33	0.25	0.24
03	0.19	0.18	0.25	0.24	0.26	0.30	0.25	0.21

Los datos de calibración registrados con el TDR se utilizaron para estimar modelos de predicción de contenidos de humedad volumétrica corregidos ( $\theta_{vc}$ ), para los diferentes tamaños de varillas (Cuadro 3). Con los modelos se corrigieron los datos medidos con el TDR en campo, para cada uno de los sitios y profundidades de medición.

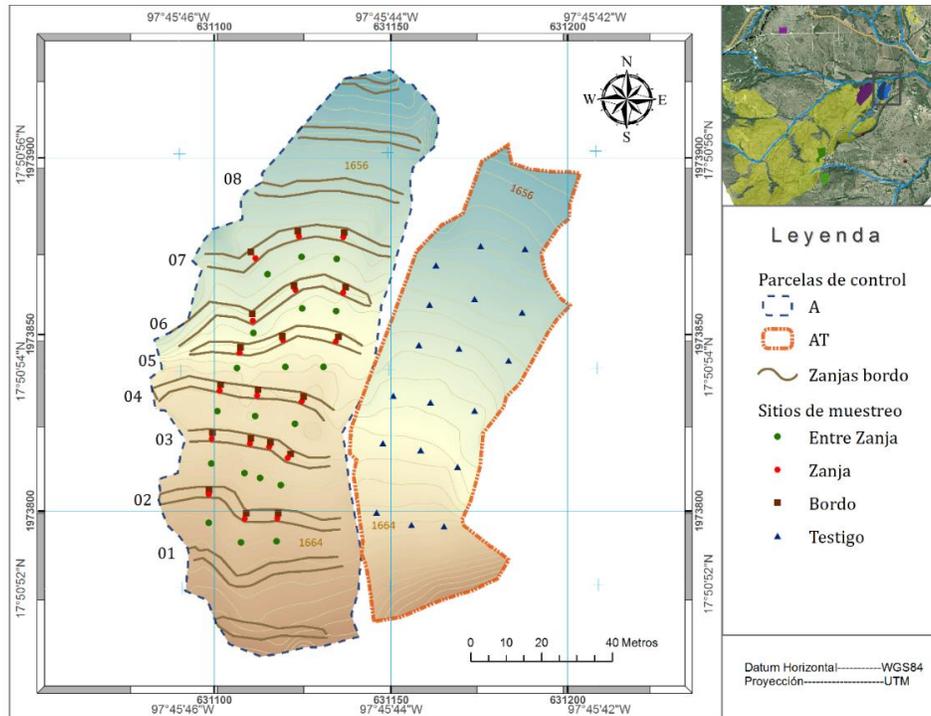
Cuadro 3. Modelos de predicción de contenido de humedad volumétrica corregido.

Tamaño de varilla	Modelo de predicción
3.8 cm	$\theta_{vc} = 0.5144 \theta_v + 0.1407$ $R^2 = 0.9103$
7.6 cm	$\theta_{vc} = 0.3593 \theta_v + 0.1822$ $R^2 = 0.9487$
12 cm	$\theta_{vc} = 0.2773 \theta_v + 0.1929$ $R^2 = 0.9264$
20 cm	$\theta_{vc} = 0.2721 \theta_v + 0.2094$ $R^2 = 0.9335$

### 5.3.4 Propiedades hidrodinámicas del suelo

Después de la caracterización de las parcelas se observó que las condiciones biofísicas de las parcelas A, AT, B y BT eran similares; por lo que se tomó la decisión de evaluar las propiedades hidrodinámicas del suelo en las parcelas A, AT, C y CT, con un diseño de muestreo dirigido. Para el muestreo de suelo en la parcela A se consideraron seis zanjas bordo y en cada zanja se tomaron tres muestras, en los sitios de EZ, Z y B, en total fueron 54 muestras. En la parcela AT se tomaron tres muestras de suelo a la misma altura que las zanjas, su ubicación se dirigió de tal manera que tuviera las mismas distancias que la parcela con prácticas, en total se tomaron 18 muestras (Figura 19), todas a una profundidad de 0- 10 cm.

En la parcela C se consideraron dos zanjas bordo (zanja 01 y 04), seleccionadas por su buen índice de eficacia y capacidad de captación de agua, además se empataron las dimensiones de la parcela con práctica y sin práctica a una superficie de 0.35 ha. En cada zanja se tomaron cuatro muestras en los sitios de EZ, Z y B, en total fueron 24 muestras. En la parcela CT se tomaron cuatro muestras, a la misma altura que las zanjas de la parcela C, se ubicaron de manera dirigida de modo que estuvieran a las mismas distancias.



**Figura 19. Sitios de muestreo para determinar las propiedades del suelo parcela A y AT.**

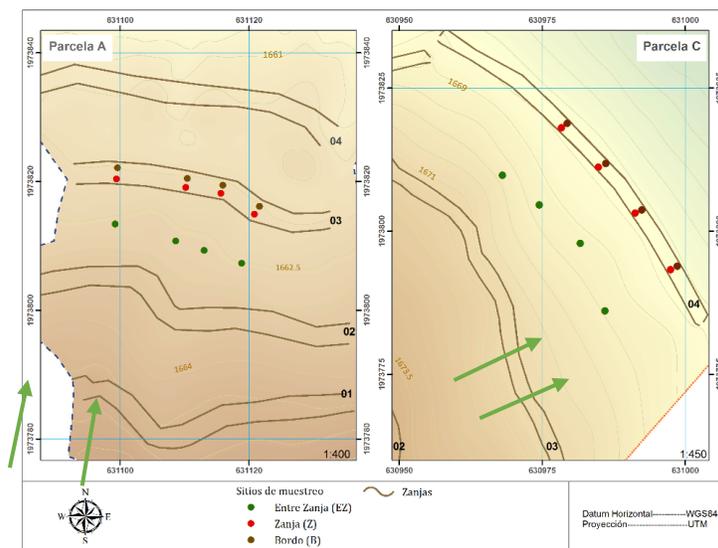
Fuente: Elaboración propia

En cada sitio se cuantificaron las siguientes propiedades: el contenido de humedad volumétrico se midió con TDR y la densidad aparente con cilindros de  $134.16 \text{ cm}^3$  (ISRIC, 1992). En laboratorio se determinó porcentaje de materia orgánica (Walkley y Black 1934); capacidad de retención de humedad, a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) ( $33 > 1500 \text{ kPa}$ ) (Richards, 1948); la textura se determinó por el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962). La humedad aprovechable se calculó con la diferencia entre CC y PMP.

### 5.3.4.1 Infiltración

La infiltración se midió en la época seca con infiltrómetro de doble anillo, en dos zanjas bordo, zanja 03 de la parcela A y zanja 04 de la parcela C; ambos sitios clasificados con un índice de eficacia alta y muy alta, respectivamente. Los infiltrómetros se colocaron en los sitios de EZ, Z y B, con cuatro repeticiones por zanja (Figura 20). Los anillos fueron de acero con borde afilado, el diámetro del anillo interior fue de 27 cm, el diámetro del anillo exterior de 33 cm y altura de 30 cm (Figura 21).

Los anillos se enterraron a 10 cm de profundidad en la parcela A y a siete cm en promedio en la parcela C (Figura 21). La vegetación se cortó a nivel del suelo y se colocó un plástico transparente en el anillo interior para agregar la carga de agua. La lámina infiltrada se midió a los 0.5, 1, 1.5, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 55, 70, 90 y 120 minutos; en algunos casos se realizaron recargas, ya que la velocidad de infiltración era muy alta. En cada punto de medición se tomaron datos de humedad inicial y humedad final con el TDR y el método gravimétrico (ISRIC, 2002). En el caso de la parcela A las mediciones de humedad se realizaron en cuatro profundidades (0-5, 5-10, 10-15 y 20-25 cm) y en la parcela C de 0-5 cm (Figura 21).



**Figura 20. Sitios de medición de la velocidad de infiltración en campo.**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 21. Infiltrómetro de doble anillo y su instalación en campo.**  
Fuente: Fotografías de campo

Los datos de campo se ajustaron a la ecuación de Horton para estimar la infiltración básica. Esta ecuación asume que la velocidad de infiltración varía de manera exponencial con el tiempo, de la siguiente forma:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-K_f t}$$

Dónde:  $f_0$  es la capacidad de infiltración inicial de la prueba de infiltración o en un momento dado (es un valor finito de  $f$  en  $t=0$ );  $f_c$  es la capacidad de infiltración básica (parámetro que se usa como estimador del valor de  $K_s$ ), y  $K_f$  es una proporción de cambio de la velocidad de infiltración en el tiempo y  $t$  es el tiempo (Horton, 1940; Mishra *et al.*, 2003). Los valores de los parámetros empíricos están limitados por  $f_0$ ,  $f_c$ ,  $K_f > 0$  (Mishra *et al.* 2003). El ajuste se realizó con el procedimiento “proc model” del software SAS (SAS, 2013), del cual se obtuvieron los parámetros de la ecuación.

### Infiltración en zanja bordo

La infiltración básica también se midió en una sección de 0.5 m de las zanjas bordo 03 de la parcela A y 04 de la parcela C. Los laterales de la sección se cubrieron con lámina de plástico y se enterró a 15 a 20 cm la sección efectiva se presenta en el Cuadro 4 y Figura 22. A cada una de las secciones se les colocó una cinta métrica de metal pegada en la lateral de la sección para tomar la lámina de infiltración. Los datos de velocidad de infiltración medidos se ajustaron a la ecuación de Horton con el procedimiento “proc model” del software SAS (SAS, 2013).

Cuadro 4. Dimensiones de secciones de zanjas bordo en las parcelas A y C.

Dimensiones	Zanjas	
	03	04
Altura (m)	0.34	0.3
Ancho fondo (m)	0.43	0.5
Ancho superficie (m)	0.81	0.85
Sección (m)	0.5	0.54
Área sección transversal (m <sup>2</sup> )	0.21	0.20
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.11	0.11
Volumen (Litros)	104.98	109.35



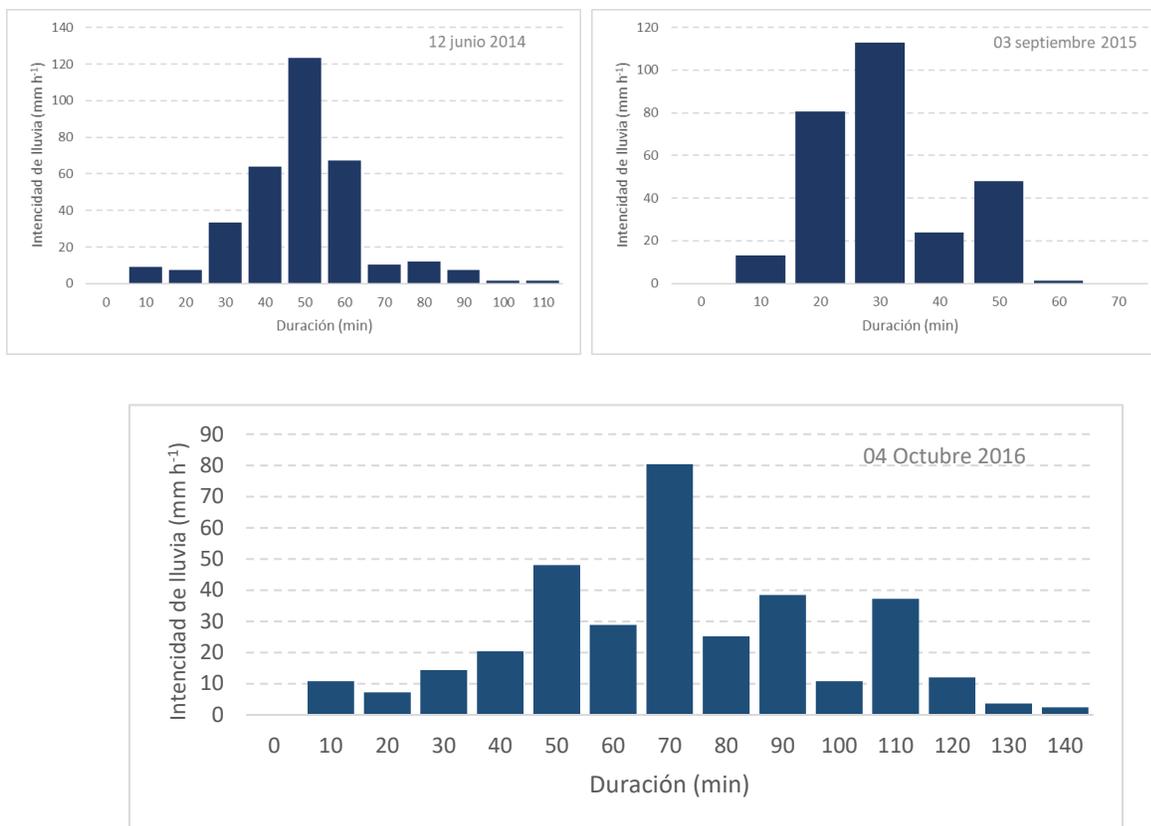
**Figura 22. Instalación de las secciones en las zanjas bordo de las parcelas A y C y medición de la velocidad de infiltración.**

### **Exceso de lluvia en el sistema zanjas bordo**

Para estimar los excesos de lluvia en la zona de pastizales, se utilizaron los hietogramas de tres eventos de alta magnitud de los años 2014 a 2016 y se compararon con las curvas de velocidad de infiltración del sistema zanja bordo en el sitio de entre zanjas (EZ). Un hietograma corresponde a los datos del evento de 2014 tomado de la estación temporal ubicada en Zapotitlán Palmas que opera la Universidad Tecnológica de la Mixteca con registros de lluvia cada 5 minutos, los otros dos hietogramas corresponden a los eventos de 2015 y 2016 tomados de la estación meteorológica automatizada (EMA) Huajuapán de León, que cuenta con registros de lluvia cada 10 minutos (Cuadro 5 y Figura 23). Los eventos del 2014 y 2015 tuvieron intensidades mayores a  $105 \text{ mm hr}^{-1}$  en 10 min, registros mayores a la intensidad máxima de lluvia para un periodo de retorno de 10 años reportada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (SCT, 2015).

**Cuadro 5. Características de eventos de precipitación para los años de estudio.**

<b>Evento</b>	<b>Duración (min)</b>	<b>Lámina precipitada (mm)</b>	<b>Intensidad máxima (mm hr<sup>-1</sup>)</b>
<b>12 junio 2014</b>	110	56.29	123.4
<b>03 septiembre 2015</b>	60	46.6	112.8
<b>04 octubre 2016</b>	140	56.6	80.4



**Figura 23. Hietogramas de eventos con intensidad máxima de lluvia en los años 2014, 2015 y 2016**

La curva de velocidad de infiltración de entre zanjas (EZ) se estimó con la ecuación de Horton a los tiempos de duración de cada evento de lluvia y se compararon con la intensidad de la lluvia para obtener el exceso de lluvia por evento.

### 5.3.5 Estimación de biomasa

El muestreo de biomasa se realizó sobre los mismos transectos definidos para el seguimiento de la humedad (Figura 16); en cada sitio de muestreo se estableció un cuadrante de un metro cuadrado, se cortó la biomasa aérea de pastos y herbáceas (Figura 24). En total se tomaron muestras en 24 zanjas, para un total de 120 sitios en las parcelas con práctica y 9 sitios de muestreo en las parcelas testigo (Cuadro 6).

Los muestreos se realizaron en dos periodos: del 01 al 04 de octubre de 2015, cuando el pastizal se encontraba en la etapa de crecimiento máximo de acuerdo con la zona (Quero, 2015) y del 31 de marzo al 03 de abril de 2016, la época de sequía más intensa (WWF, 2015); las parcelas

permanecieron en exclusión de principios de 2015 a finales de 2016. Las muestras de pasto y herbáceas se secaron en una estufa eléctrica a 65 °C, hasta alcanzar peso constante.

Cuadro 6. Número de muestras de biomasa en las parcelas de muestreo.

Parcelas	Con práctica		Testigo
	Zanjas	Muestras	Muestras
A	8	40	3
B	10	50	3
C	6	30	3
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>120</b>	<b>9</b>



**Figura 24. Sitios de muestreo de vegetación.**

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4 Análisis estadístico

Los datos de contenido de humedad y biomasa se analizaron por parcela, sitios (EZ, I, Z, B, P y Testigo) y fechas de muestreo. A cada grupo de datos se les aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para verificar su normalidad con el procedimiento Univariate (SAS, 2013) y la prueba Chi Cuadrada para comprobar la homogeneidad de varianza (Bartlett, 1937); con el objetivo de comprobar que el conjunto de datos cumpliera con los supuestos y realizar el análisis de varianza correctamente; los datos se analizaron con prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) para determinar diferencias entre sitios y parcelas. Los datos de las propiedades hidrodinámicas del suelo se analizaron con prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) para determinar diferencias entre sitios (EZ, Z, B) y el Testigo. Los resultados de infiltración básica ( $f_c$ ) se analizaron con prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) para determinar diferencias entre sitios (EZ, Z, B) y Testigo. En el análisis de Tukey para todos los casos se utilizó el procedimiento GLM del software SAS que cuenta con el procedimiento “*lsmeans*” que corrige la diferencia de datos a comparar (SAS, 2009).

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta el inventario de prácticas de conservación del suelo en la cuenca Rancho Dolores. También se presenta la caracterización de las parcelas de muestreo, las especificaciones de diseño de las obras, la capacidad y eficacia de almacenamiento de las zanjas bordo, el índice topográfico de humedad de las parcelas bajo estudio, los cambios de humedad del suelo propiciados por las obras, los cambios en la producción de biomasa y capacidad de infiltración del agua por efecto de las zanjas bordo.

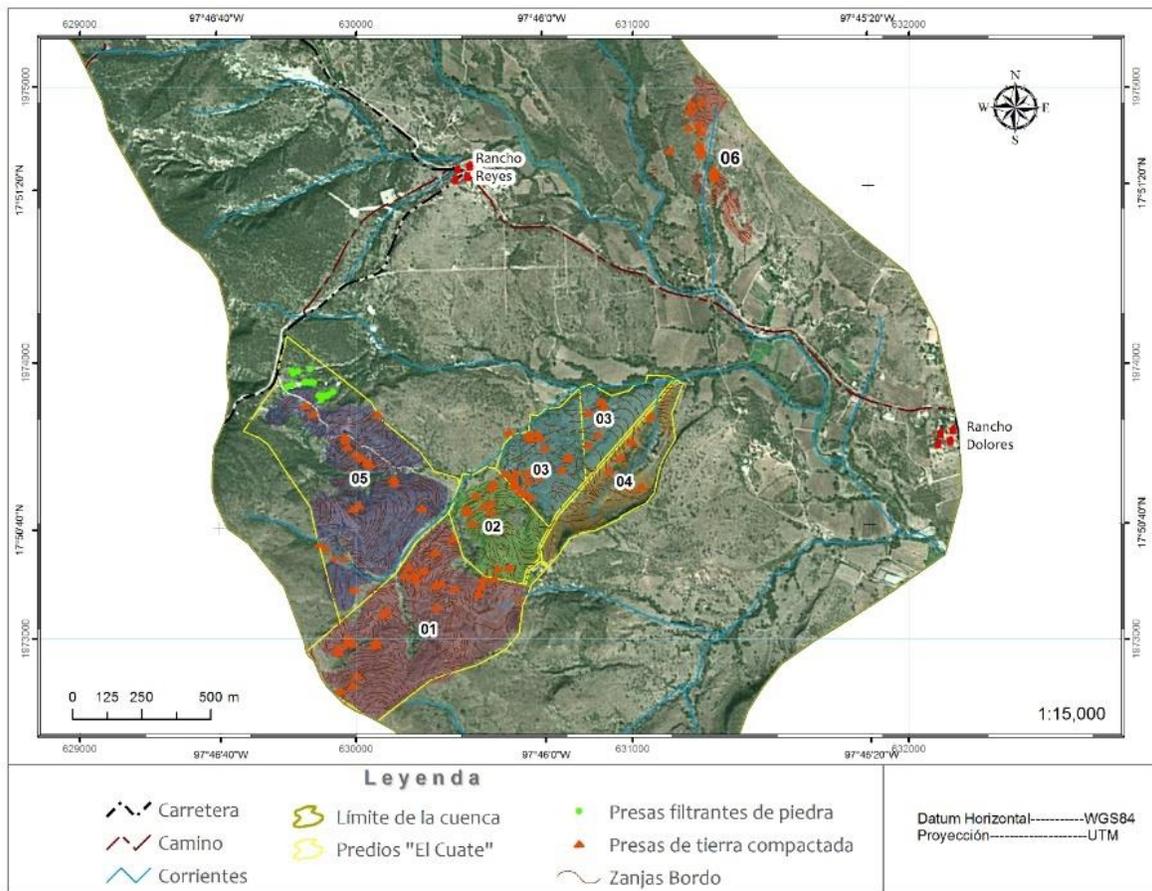
### 6.1 Inventario de prácticas de conservación

Las prácticas de conservación se localizaron en siete predios del paraje “El Cuate”, ubicado en la agencia Rancho Reyes, al suroeste de la cuenca (Figura 25), en el área con pastizal donde se practica ganadería extensiva. Las prácticas de conservación identificadas fueron zanjas bordo, presas filtrantes de piedra acomodada y presas de tierra compactada (Figura 26), las que, según los dueños de los predios, se establecieron con la finalidad de reducir la velocidad y cantidad de escurrimientos, favorecer la infiltración y conservar humedad en el suelo para producción de biomasa. Las prácticas se construyeron con recursos privados y gubernamentales, los trabajos se iniciaron en el predio 01 en 2007, seguido del predio 05 que se realizaron en 2010, en el predio 03 y 04 las prácticas se construyeron en 2011, las prácticas del predio 02 en 2013 y se terminaron en 2014 las del predio 06.

Las zanjas bordo inventariadas sumaron un total de 1,208, que se construyeron en una superficie de 80.4 ha (ANEXO I). A los predios se les asignó la clave de 01 a 06, destacando los predios 01 y 05 con mayor número de zanjas, el predio 02 con una densidad de zanjas de 20 por ha, en cambio, el predio 03 tuvo únicamente 8.4 zanjas por ha (Cuadro 7 y Figura 25). La variación en la densidad de zanjas bordo por unidad de superficie estuvo en función del ancho largo y forma de los predios, así como de la pendiente.

Asimismo, se encontraron 108 presas de tierra compactada (ANEXO I), construidas en corrientes intermitentes en los diferentes predios. En el predio 01 se encontraron el mayor número de presas (29), en cambio en el predio 02 solo se encontraron nueve (Cuadro 7). La altura de las presas de tierra varió entre 0.3 a 6 m, la sección de la base entre 0.6 a 13 m y la corona entre 0.4 a 4.5 m. En

el Cuadro 7 se muestra el inventario de las obras identificadas y en la Figura 26 algunas de las acciones identificadas.



**Figura 25. Localización de prácticas de conservación en la cuenca Rancho Dolores.**

Fuente: Elaboración propia con datos de inventario.



**Figura 26. Zanjas bordo (1), presa filtrante de piedra acomodada (2) y presa de tierra compactada (3).**

Fuente: WWF, 2015

Al norte del predio 05 se construyeron 15 presas de piedra acomodada, para el control de tres cárcavas (ANEXO I). En una de las cárcavas se estableció una batería de cuatro presas, en otra

cinco y en la cárcava ubicada al sur, seis presas (Figura 25). El diseño de las presas varió según la sección transversal de la cárcava (ancho y profundidad), encontrando presas con sección rectangular, semicircular, irregular y triangular. La longitud transversal de las presas varió de 3.6 a 17.6 m, la corona de 0.6 a 1 m y la altura de 0.4 a 1.25 m, en nueve de las presas se encontró que se había acumulado azolve (ANEXO I).

Cuadro 7. Prácticas de conservación de suelo y agua por predio inventariado.

<b>Predio</b>	<b>No. zanjas bordo</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Zanjas bordo por ha</b>	<b>Presas de tierra</b>	<b>Presas de piedra</b>
01	453	26.5	17.1	29	-
02	123	6.1	20	9	-
03	113	13.4	8.4	25	-
04	98	8.4	11.7	12	-
05	359	22.1	16.2	21	15
06	62	3.8	16.3	12	-
<b>Total</b>	<b>1,208</b>	<b>80.4</b>	<b>15.03</b>	<b>108</b>	<b>15</b>

### **6.1.1 Dimensiones de las zanjas bordo (Inventario)**

Las zanjas bordo miden en promedio 33.6 m de longitud, 0.55 m de profundidad y 0.83 m de ancho; el bordo mide en promedio 0.22 m de altura y 1.1 m de ancho (Cuadro 8), estas dimensiones no corresponden con los estándares recomendados por la CONAFOR (2014), ya que recomiendan zanjas rectangulares con: 0.4 m de profundidad por 0.4 m de ancho y un bordo de 0.35 m de alto por 0.6 m de ancho.

Las dimensiones de las zanjas en promedio son 38% más profundas que lo que se recomienda, la sección es trapezoidal, el ancho en la base menor de la zanja es de 15% menor que lo recomendado y la base mayor casi es el doble, situación que se observó desde su construcción con maquinaria, pero que pudo haberse incrementado por procesos de erosión o socavamiento de los taludes con el tiempo.

Cuadro 8. Dimensiones de las zanjas bordo por predio inventariado (media y desviación estándar).

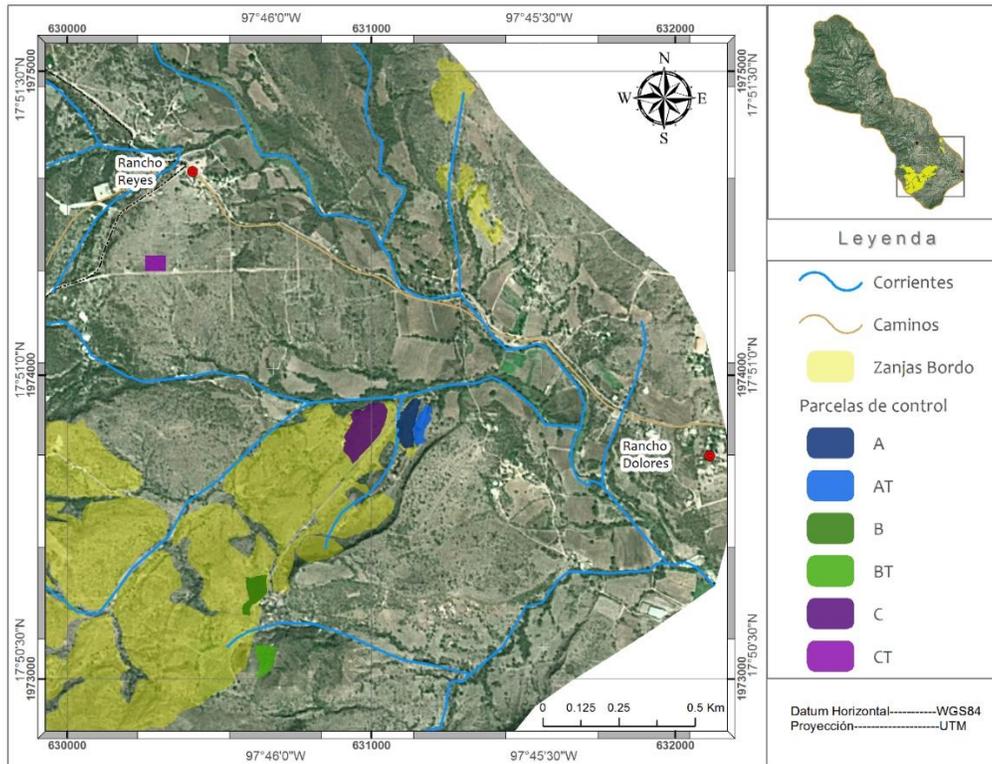
Predio	Longitud (m)	Zanja		Bordo		Lámina potencial de captación (mm)
		Profundidad (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ancho (m)	
1	26.99	0.57	0.81	0.23	1.05	26.2
	±18.64	±0.79	±0.24	±0.07	±0.20	
2	30.45	0.6	0.81	0.21	0.99	29.9
	± 19.99	±0.21	±0.15	±0.06	±0.12	
3	44.53	0.57	0.82	0.24	1.12	21.2
	±31.95	±0.24	±0.15	±0.08	±0.21	
4	36.26	0.59	0.75	0.18	1.09	21.0
	±22.86	±0.26	±0.14	±0.04	±0.15	
5	39.53	0.52	0.86	0.22	1.16	27.2
	±38.71	±0.13	±0.21	±0.28	± 0.41	
6	31.13	0.49	1.08	0.24	1.29	24.6
	±28.44	±0.51	±0.22	±0.06	± 0.22	
<b>Promedio</b>	<b>33.6 ±28.4</b>	<b>0.55 ±0.51</b>	<b>0.83 ±0.22</b>	<b>0.22 ±0.16</b>	<b>1.1 ±0.28</b>	<b>26.1</b>

Las dimensiones de las zanjas permitieron estimar que la lámina potencial de captación promedio fue de 26.1 mm, lo que sugiere que se podría captar hasta el 36.9% de la lluvia máxima en 24 h para un periodo de retorno de cinco años equivalente a 70.6 mm registrada en la zona (WWF, 2015), considerando que toda el agua precipitada escurriera. En el caso del predio 02 donde la densidad de zanjas fue mayor en comparación con los demás predios, la captación potencial podría ser de hasta 42.3% de la precipitación según lo recomendado, sin embargo, no se cumple con la captación de al menos 50% de la lluvia máxima en 24 h (Pr 5 años) como lo recomienda CONAFOR (2014). Es importante destacar que este tipo de recomendaciones debería estar asociado con la relación entre precipitación máxima en 24 h y la capacidad de infiltración de los suelos a trabajar, para estimar el exceso de lluvia.

## 6.2 Descripción de las parcelas de muestreo

En este apartado se muestran los resultados y análisis de la caracterización de las parcelas con y sin zanjas bordo, así como la descripción de las propiedades de los suelos. La parcela A se localizó

en el predio 04, la parcela B en el predio 02 y la parcela C en el predio 03 del inventario (Figura 27).



**Figura 27. Localización de las parcelas de muestreo.**

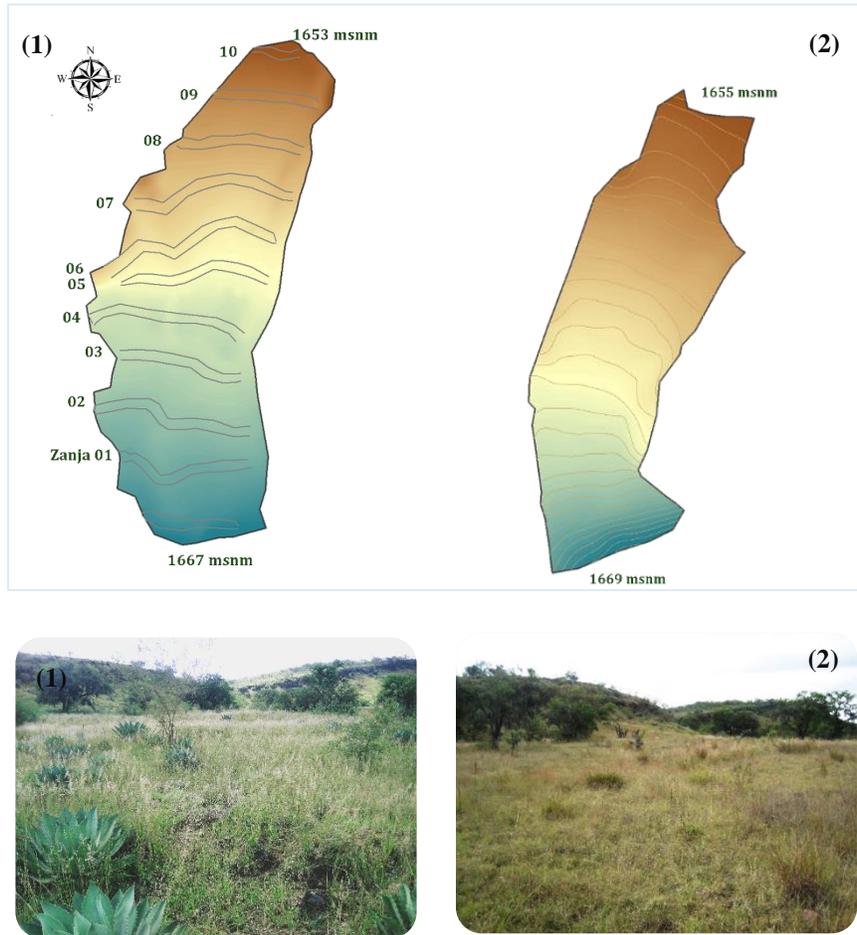
Fuente: Elaboración propia con imagen de Google Earth.

### 6.2.1 Parcela A y testigo (AT)

La parcela A tiene una superficie de 0.79 ha, con una pendiente uniforme de 10.6%, mientras que la parcela testigo AT tiene una superficie de 0.46 ha, pendiente uniforme de 9.5%; ambas parcelas presentan una exposición noreste y se ubican en la parte baja de la ladera (Figura 28). El material de origen del suelo, por su localización en el pie de monte, corresponde a sedimentos coluviales de origen ígneo.

La vegetación dominante en el estrato herbáceo son pastos y herbáceas. En la parcela A las principales especies fueron: *Melinis repens* (Willd.), como especie dominante, seguida de *Hilaria cenchroide*, *Hilaria chondrosioides*, *Aristida ternipes* y *Dalea humulis*. En la parcela AT las especies dominantes fueron: *Dalea bicolor*, *Boutelou Chondrosioides*, *Bothriochloa borbinoidis* y

*Bouteloua hirsuta*. En el estrato arbustivo en ambas parcelas se identificaron huizaches (*Acacia spp.*). En la parcela A existe una plantación de maguey “tobalá” (*Agave potatorum* Zucc.) con una antigüedad de cinco años (Figura 28). La fauna de la zona se compone de hormigas y conejos principalmente.



**Figura 28. Parcelas de muestreo A (1) y AT (2), fotografías vistas de noreste-suroeste.**

Fuente: Elaboración propia

La profundidad promedio del suelo es mayor a 1 m, con color pardo en seco y pardo intenso en húmedo, presenta una pedregosidad superficial entre 5 y 10% constituida principalmente por pequeñas rocas ígneas intermedias de 1 a 5 cm. El tamaño y cantidad de poros, así como, la estructura en bloques subangulares de moderado desarrollo, inciden en una permeabilidad moderada. En particular el primer horizonte presenta mejor desarrollo en su estructura resultado de la abundancia de raíces de pastos. En los horizontes de 20-100 cm de profundidad se observaron

recubrimientos y filamentos de carbonatos de calcio secundario en los poros (Cuadro 9 y Figura 29).



**Figura 29. Perfil de suelo de las parcelas de muestreo A y AT.**  
Fuente: Elaboración propia

Cuadro 9. Descripción del perfil de suelo para las parcelas A y AT

<b>Horizonte</b>	<b>Descripción</b>
<b>A</b>	0-5 cm; pardo en seco (7.5YR 5/4); seco; franco limoso; muy friable, con permeabilidad moderada; estructura de bloques subangulares de 0.5-1 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y abundantes; reacción ligera al HCl y moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición media al siguiente horizonte.
<b>AB</b>	5-20 cm; pardo en seco (7.5YR 5/4); seco; franco arcillo limoso; friable, con permeabilidad moderada; estructura de bloques subangulares de 0.5-2 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y abundantes; reacción ligera al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición media al siguiente horizonte.
<b>Bk</b>	20-40 cm; pardo intenso en seco (7.5YR 5/5); seco; franco; friable, con permeabilidad moderada; estructura de bloques subangulares de 1-3 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y pocas; reacción moderada al HCl y

	ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición media al siguiente horizonte, con recubrimientos o filamentos de carbonatos de calcio.
<b>Bk2</b>	40-63 cm; pardo intenso en seco (7.5YR 5/5); seco; franco arcilloso; friable, con permeabilidad lenta; estructura de bloques angulares de 1-4 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces delgadas y raras; reacción moderada al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición horizontal y marcada al siguiente horizonte, con recubrimientos o filamentos de carbonatos de calcio.
<b>Ck</b>	63-100 cm; pardo en seco (7.5YR 4/4); seco; franco arcillo limoso; firme, con permeabilidad lenta; masivo que rompe en bloques angulares de 3-5 cm débilmente desarrollados; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces delgadas y muy raras; reacción ligera al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pocos recubrimientos o filamentos de carbonatos de calcio.

En el epipedón de las parcelas se desarrolla el proceso de melanización, referente a la acumulación de materia orgánica bien humificada dentro del suelo mineral (Bockheim & Gennadiyev 2000). Este presentó más de 0.6% de carbono orgánico (FAO, 2015), en los horizontes se encontró más de 50% en saturación de bases (Cuadro 11) y el horizonte se clasificó como ócrico. En el endopedón se observó el proceso de calcificación, referido a la acumulación de carbonatos secundarios o pedogenéticos en los poros, el cual ocurre principalmente en suelos de zonas semiáridas y áridas, y por el material ígneo que dio origen al suelo (West, 1988; Bockheim y Gennadiyev, 2000). Sin embargo, la cantidad de carbonatos de calcio en la fracción de tierra fina fue menor a 15% (Cuadro 11).

Cuadro 10. Análisis físico del perfil de suelo, parcelas A y AT

Horizonte	Prof. (cm)	Da (gcm <sup>-3</sup> )	Textura			Clase	Color S	Color H
			A	L	R			
-----%-----								
A	0-05	1.12	20.2	54.6	25.2	Franco limoso	7.5YR 5/4	7.5YR 4/6
AB	05-20	1.17	19.8	51.5	28.7	Franco arcillo limoso	7.5YR 5/4	7.5YR 4/6
Bk	20-40	1.35	33	43.2	23.9	Franco	7.5YR 5/5	7.5YR 4/4
Bk2	40-63	1.45	27	43.9	29.1	Franco arcilloso	7.5YR 5/5	7.5YR 4/3
Ck	63-100	1.33	10.3	56.8	32.9	Franco arcillo limoso	7.5YR 4/4	7.5YR 4/6

Da: Densidad aparente, A: arena, L: limo y R: arcilla; S: seco y H: húmedo

Cuadro 11. Análisis químico del perfil de suelo, parcelas A y AT

Horizonte	pH	CE	CO	MO	N <sub>total</sub>	CaCO <sub>3</sub>	P	CIC	Na	K	Ca	Mg
		(dSm <sup>-1</sup> )	-----%-----				(mgKg <sup>-1</sup> )	------(cmol <sub>(c)</sub> Kg <sup>-1</sup> )-----				
A	7.55	0.53	0.99	1.7	0.073	3.9	24.12	50.96	0.51	0.69	33.8	16.4
AB	7.6	0.45	0.45	0.77	0.082	4.98	6.54	59.8	0.56	0.47	48	16.1
Bk	7.6	0.4	0.3	0.51	0.036	6.49	0.68	16.9	0.58	0.32	30.8	16.2
Bk2	7.7	0.3	0.3	0.51	0.046	5.84	2.15	61.36	0.73	0.25	24.7	16.5
Ck	7.7	0.27	0.3	0.51	0.036	4.11	3.25	55.12	0.56	0.2	38	17

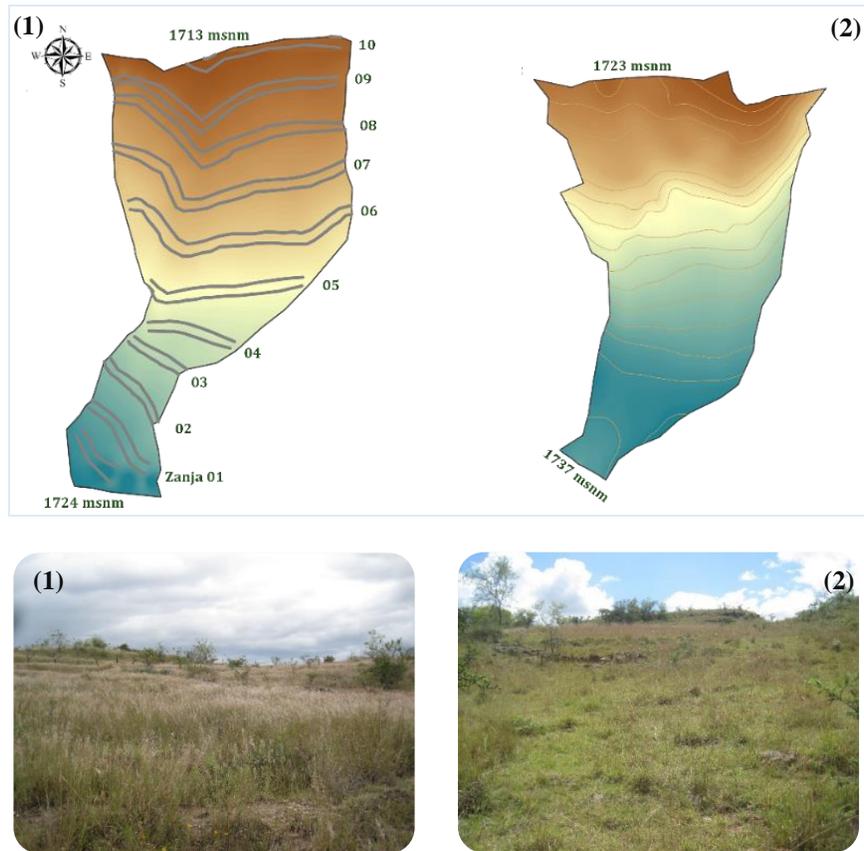
CE: Conductividad eléctrica, CO: Carbono orgánico, MO: Materia orgánica.

En el horizonte Bk se designó un horizonte de diagnóstico cámbico; ya que, la textura es franco y franco arcillo limosa, hay desarrollo de estructura y color (Cuadro 10 y Cuadro 11), además, no forma parte de una capa de arado ni de otro horizonte de diagnóstico. El suelo de las parcelas A y AT se clasificaron como **Chromic Calcaric Eutric Cambisol (Loamic)**, distinto a la clasificación de INEGI citado por WWF (2015), que indica que el suelo es Regosol (calcárico epiléptico) y Eutric Leptosol con textura media. Los cambisoles con características eútricas suelen ser altamente productivos cuando no existe restricción de humedad (FAO, 2015).

### 6.2.2 Parcela B y testigo (BT)

La parcela B tiene una superficie de 0.62 ha y pendiente uniforme de 10%. La parcela BT cubre una superficie de 0.52 ha y pendiente uniforme de 19.5%. Ambas parcelas tienen una exposición norte y se localizan en la parte media – baja de la ladera (Figura 30), en pie de monte. El material de origen del suelo son sedimentos coluviales de origen ígneo.

La vegetación predominante en la parcela B son pastos y herbáceas. Las principales especies identificadas fueron: *Melinis repens* (Willd.) la especie dominante, *Hilaria cenchroides*, *Hilaria chondrosioides*, *Aristida ternipes* y *Dalea humulis*. En la parcela BT las especies dominantes fueron: *Dalea bicolor*, *Boutelou Chondrosioides*, *Bothriochloa borbinoideis* y *Bouteloua hirsuta*. La parcela B tiene una plantación de maguey “tobalá” (*Agave potatorum* Zucc.) (Figura 30).



**Figura 30. parcelas B (1) y BT (2), fotografías vistas norte-sur.**  
 Fuente: Elaboración propia

La profundidad promedio del suelo es mayor a 1 m, con color en seco pardo en los primeros horizontes y pardo intenso en los más profundos, en húmedo es pardo oscuro en el epipedón y pardo intenso en el endopedón. La pedregosidad superficial está conformada por rocas ígneas intermedias de 2 a 10 cm con un 5-10% de cobertura.

El primer horizonte presenta mejor desarrollo de la estructura subangular de moderado desarrollo, resultado de la abundancia de raíces de los pastos, la estructura y la porosidad permite una permeabilidad moderada. En los horizontes de 12-70 cm de profundidad se observaron recubrimientos y filamentos de carbonatos de calcio secundario (Cuadro 12 y Figura 31).



**Figura 31. Perfil de suelo de parcelas de muestreo B y BT.**

Cuadro 12. Descripción del perfil de suelo, parcela B y BT.

<b>Horizonte</b>	<b>Descripción</b>
<b>A</b>	0-12 cm; pardo en seco (7.5YR 5/4); seco; franco arcillo limoso; friable, con permeabilidad moderada; estructura de bloques subangulares de 0.5-2 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y abundantes; reacción ligera al HCl y moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición media al siguiente horizonte.
<b>Bk</b>	12-30 cm; pardo en seco (7.5YR 5/4); seco; franco arcillo limoso; friable, con permeabilidad moderada; estructura de bloques subangulares de 1-3 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y comunes; reacción ligera al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición media al siguiente horizonte, pocos recubrimientos o filamentos de carbonatos de calcio.
<b>Bk2</b>	30-55 cm; pardo intenso en seco (7.5YR 5/5); seco; franco limoso; firme, con permeabilidad moderada; estructura de bloques angulares de 3-7 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y muy raras; reacción moderada al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición media al siguiente horizonte, pocos recubrimientos o filamentos de carbonatos de calcio.

<b>Ck</b>	55-70 cm; pardo intenso en seco (7.5YR 5/5); seco; franco limoso; muy friable, con permeabilidad moderada; masivo que rompa en bloques angulares de 3-10 cm débilmente desarrollados; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; reacción moderada al HCl y ligera al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y recubrimientos o filamentos de carbonatos de calcio.
-----------	--

En el horizonte A de las parcelas ocurre el proceso de melanización, este proceso se presenta con la acumulación de materia orgánica bien humificada dentro del suelo mineral mayor de 0.6% de carbono orgánico (Bockheim y Gennadiyev, 2000; FAO, 2015). Este horizonte tuvo más de 50% en saturación de bases (Cuadro 14), sin embargo, por espesor se clasificó como horizonte de diagnóstico ócrico. En el endopedón se observó el proceso pedogenético de calcificación, con la acumulación y el movimiento de carbonatos secundarios en el suelo (Bockheim y Gennadiyev, 2000), sin embargo, aún no son suficientes como para designar un horizonte de diagnóstico cálcico (Cuadro 14).

Cuadro 13. Análisis físico del perfil de suelo, parcelas B y BT

Horizonte	Prof. (cm)	Da (gcm <sup>-3</sup> )	Textura			Clase	Color S	Color H
			A	L	R			
			-----%-----					
A	0-12	1.31	15.2	57.2	27.6	Franco arcillo limoso	7.5YR 4/3	7.5YR 3/4
Bk	12-30	1.3	14	54.7	31.3	Franco arcillo limoso	7.5YR 5/4	7.5YR 4/6
Bk2	30-55	1.26	8.5	69.8	21.6	Franco limoso	7.5YR 5/5	7.5YR 4/6
Ck	55-70	1.21	11.7	67.4	20.9	Franco limoso	7.5YR 5/5	7.5YR 4/6

Da: Densidad aparente, A: arena, L: limo y R: arcilla; S: seco y H: húmedo.

Cuadro 14. Análisis químico del perfil de suelo, parcelas B y BT

Horizonte	pH	CE	CO	MO	N <sub>total</sub>	CaCO <sub>3</sub>	P	CIC	Na	K	Ca	Mg
		(dSm <sup>-1</sup> )	-----%-----			(mgKg <sup>-1</sup> )	------(cmol <sub>(+)</sub> Kg <sup>-1</sup> )-----					
A	7.5	0.58	1.05	1.8	0.146	0.76	29.98	62.92	0.53	0.61	25.4	15.1
Bk	7.7	0.31	0.3	0.51	0.046	3.46	10.94	40.82	0.58	0.25	30.7	15.7
Bk2	7.8	0.22	0.22	0.39	0.018	4.65	6.54	62.92	0.6	0.24	30.4	15.9
Ck	7.75	0.25	0.22	0.39	0.027	5.74	13.87	65.52	0.56	0.26	27.2	16

CE: Conductividad eléctrica, CO: Carbono orgánico, MO: Materia orgánica.

En el horizonte Bk con en las parcelas A y AT se denominó como un horizonte de diagnóstico cámbico de textura franco y franco arcillo limosa, con desarrollo de estructura y color, contenido de arcilla y movimiento de carbonatos (Cuadro 14), además, no es parte de una capa de arado ni de otro horizonte de diagnóstico.

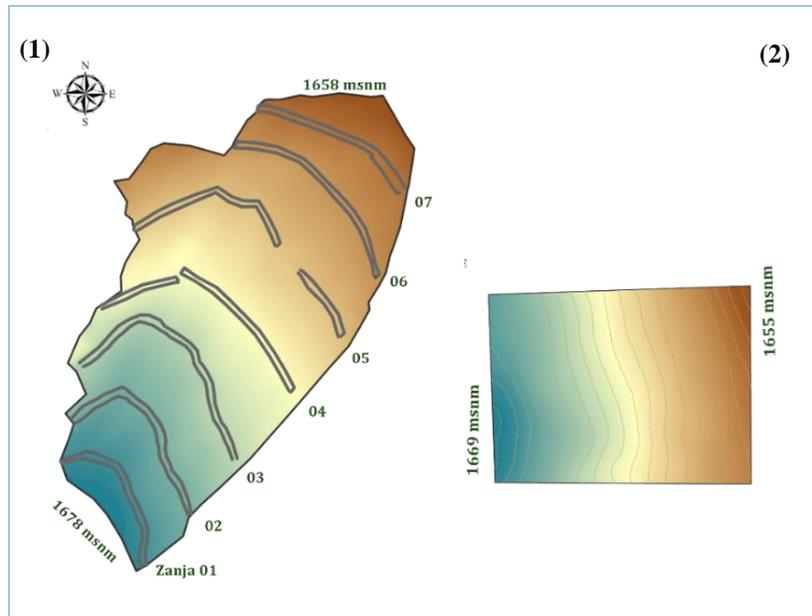
El suelo es **Chromic Calcaric Eutric Cambisol (Loamic, Siltic)**, la diferencia entre el suelo de estas parcelas y el de las parcelas A y AT fue la textura limosa (Cuadro 13 y Cuadro 14). Este suelo con características eútricas puede ser altamente productivo si se garantiza la humedad en el suelo (FAO, 2015). Los resultados de la clasificación del suelo difieren del Regosol (calcárico epiléptico) y Eutric Leptosol reportados por INEGI citado por WWF (2015).

### 6.2.3 Parcela C y testigo (CT)

La parcela C tiene una superficie de 1.7 ha, una pendiente uniforme de 11.2% y se ubica en la parte baja de la ladera, la superficie de la parcela CT fue de 0.35 ha, con pendiente media de 11.7%, localizada en la parte media de la ladera, ambas con exposición noreste (Figura 32). El origen del suelo correspondió con un suelo in situ a partir de rocas ígneas intermedias.

La vegetación es de pastos y herbáceas, las principales especies fueron: *Hilaria cenchroide*, *Hilaria chondrosioides*, *Aristida ternipes*, *Dalea humulis*, *Dalea bicolor*, *Bouteloua Chondrosioides*, *Bothriochloa borbinoideis*, *Bouteloua hirsuta* y *Melinis repens* (Willd.); este último distribuido únicamente en las zanjas y bordos. En el estrato arbustivo de ambas parcelas se identificaron algunos huizaches (Figura 32).

La pedregosidad superficial representa el 5-10% constituida principalmente por piedras pequeñas de 1 a 5 cm, la profundidad promedio del suelo en las parcelas es de 15 cm. El color del suelo es pardo en seco y pardo oscuro en húmedo, debido principalmente a un contenido de materia orgánica medio.



**Figura 32. Parcela C (1) y CT (2), fotografías vistas noreste-suroeste.**  
Fuente: Elaboración propia

La estructura es de moderado desarrollo, la porosidad es buena, por lo que la permeabilidad fue rápida (Cuadro 15 y Figura 33). La estabilidad de agregados en este suelo somero es buena, ya que, Kemper, 1966 citado por USDA, 1999 refiere que con un contenido de materia orgánica 2 % la estabilidad de agregados del suelo puede ser de hasta 75%; en caso de que el contenido de arcillas sea de 20 % la estabilidad de agregados podría ser de 70%.



**Figura 33. Perfil de suelo de parcelas de muestreo A, B y C.**

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 15. Descripción del perfil de suelo, parcela C.

<b>Horizonte</b>	<b>Descripción</b>
<b>A</b>	0-15 cm; pardo en seco (7.5YR 5/4); seco; franco limoso; friable, con permeabilidad rápida, excesivamente drenado; estructura de bloques subangulares de 0.5-2 cm de moderado desarrollo; poros numerosos, finos, intersticiales, discontinuos, con orientación aleatoria; raíces finas y abundantes; ninguna reacción al HCl y moderada al H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ; con transición irregular y marcada al siguiente horizonte.
<b>R</b>	15 cm; Roca

Cuadro 16. Análisis físico del perfil de suelo, parcelas C y CT

Horizonte	Prof. (cm)	Da (gcm <sup>-3</sup> )	Textura			Clase	Color S	Color H
			A	L	R			
			-----%-----					
A	0-15	1.53	39.7	53.9	6.4	Franco limoso	7.5YR 5/4	7.5YR 3/2

Da: Densidad aparente, A: arena, L: limo y R: arcilla; S: seco y H: húmedo

Cuadro 17. Análisis químico del perfil de suelo, parcelas C y CT

Horizonte	pH	CE	CO	MO	N <sub>total</sub>	CaCO <sub>3</sub>	P	CIC	Na	K	Ca	Mg
		(dSm <sup>-1</sup> )	-----%-----			(mgKg <sup>-1</sup> )	----- (cmol <sub>c</sub> Kg <sup>-1</sup> ) -----					
A	6.9	0.3	1.27	2.19	0.1	0.1	3.61	42.64	0.6	0.29	11.9	15.8

CE: Conductividad eléctrica, CO: Carbono orgánico, MO: Materia orgánica.

En el epipedón de esta parcela se observó la ocurrencia del proceso de melanización (Bockheim y Gennadiyev, 2000), en mayor proporción que en las otras dos parcelas, el contenido de carbono orgánico fue mayor, tuvo más de 50% de saturación de bases (Cuadro 16 y Cuadro 17), sin embargo, por la restricción de profundidad se denominó como un horizonte de diagnóstico ócrico.

Por lo tanto, el suelo de las parcelas C y CT se clasificó como **Eutric Leptosol**, este suelo es un recurso potencial para el pastoreo en temporada de lluvia y como terreno forestale, además, es fértil por los contenidos de bases y materia orgánica. Sin embargo, la erosión es la mayor amenaza para su conservación (FAO, 2015). El suelo que se clasificó correspondió con los suelos reportados por INEGI citado por WWF (2015).

### 6.3 Características del sistema Zanjas Bordo

Las parcelas bajo estudio tienen diferente tipo de suelo, profundidad, formas y pendientes, lo cual, influyó en las dimensiones de las zanjas bordo durante su trazo y construcción, esto es sin considerar los tipos de suelo y su profundidad. En general, las zanjas al momento del levantamiento tenían una sección transversal trapezoidal, que difiere de la rectangular recomendada (CONAFOR, 2014 y COLPOS, 1991), como ya se había señalado. Las dimensiones promedio de las zanjas en

tres parcelas fueron de 0.33 m de profundidad, 0.61 m de ancho del fondo y 1.25 m de ancho en la parte superficial, con coeficiente de variación del 25%. El volumen de corte promedio del suelo fue de 0.30 m<sup>3</sup> por metro lineal que es casi el doble de las especificaciones de diseño recomendadas por la CONAFOR (2014). Los bordos tienen un ancho promedio de 1.75 m y altura de 24 cm (Cuadro 18), las dimensiones mayores en el ancho y menores en la altura que lo recomendado.

Las dimensiones de las zanjas muestran que existe un rango de variación promedio de 0.13 m en la profundidad, 0.12 m en el ancho de la base, 0.39 m en el ancho superficial y de 0.14 m<sup>3</sup>m<sup>-1</sup> en la capacidad de almacenamiento de agua; lo que indica que la construcción de las zanjas tiene una alta variación entre parcelas, debido a la antigüedad de su construcción, a la forma de las parcelas y la experiencia de los productores en su trazo y construcción. En el caso de las dimensiones del bordo existe una variación de 0.11 m en la altura y una variación de 0.52 m en el ancho, lo cual depende del tipo de material de excavación, la forma en que se coloca aguas abajo de la zanja, del proceso de asentamiento y erosión causada por la lluvia después de la construcción (Cuadro 18).

Es importante destacar que la variación en las dimensiones de diseño de las zanjas bordo están asociadas con la profundidad del suelo, ya que, en la parcela C donde el suelo es someros se disminuyó la profundidad, anchos y altura de las zanjas, y el ancho del bordo en relación, así como la capacidad de almacenamiento de la zanja bordo en relación con las parcelas A y B (Cuadro 18).

Cuadro 18. Dimensiones de las zanjas y bordos por parcela.

Parcelas	Dimensiones de la zanja			Capacidad de almacenamiento	Dimensiones del bordo	
	h (m)	b (m)	s (m)	m <sup>3</sup> metro lineal	h <sub>b</sub> (m)	b <sub>b</sub> (m)
A	0.33	0.66	1.49	0.35	0.21	1.9
B	0.38	0.65	1.10	0.33	0.31	1.94
C	0.25	0.53	1.17	0.21	0.20	1.42
<b>Promedio</b>	<b>0.33</b>	<b>0.61</b>	<b>1.25</b>	<b>0.31</b>	<b>0.24</b>	<b>1.75</b>

h: altura o profundidad b: ancho de la base, s: ancho de la parte alta, h<sub>b</sub>: altura del bordo, b<sub>b</sub>: base del bordo

Esto sugiere que las especificaciones de diseño propuestas por las áreas normativas no consideran las condiciones locales, lo que incide en que no se cumpla con la norma en su construcción y en el seguimiento técnico solo se considera el cumplimiento de metas físicas como lo reportan las evaluaciones de seguimiento (COLPOS, 2008).

### 6.3.1 Pendiente del fondo de las zanjas

El trazo de las zanjas bordo se realiza a curva de nivel en el terreno y posteriormente se efectúa la excavación a la profundidad deseada, procurando que el fondo de la zanja conserve el mismo nivel (COLPOS, 1991), por ello, se verificó la pendiente del fondo a lo largo de la zanja y se encontró que existe un desnivel promedio de 0.27 % en toda la zona de estudio variando de 0.25 a 0.28 % en las tres parcelas.

En las parcelas A y C la pendiente media fue de 0.29 y 0.25% respectivamente y el rango de variación fue de 0.02 a 0.74 %, y en la parcela B la pendiente media fue de 0.28 % y el rango de variación de 0.08 a 0.89% (Cuadro 19). El desnivel que existe en las zanjas bordo a pesar de ser menor del 1% provoca flujo de agua hacia las partes bajas (Loredo *et al.*, 2005) y causa que la capacidad de almacenamiento por unidad de longitud se reduzca y no se alcance el almacenamiento potencial.

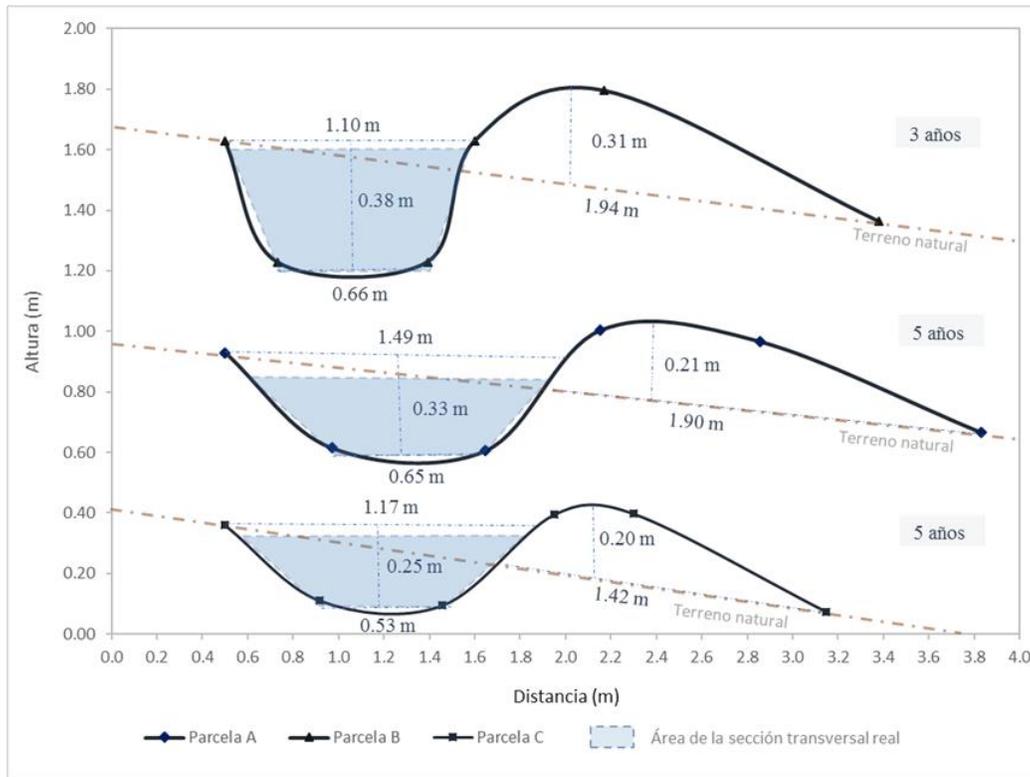
Cuadro 19. Pendiente medida del fondo de las zanjas en la zona de estudio

<b>Parcelas</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Zanjas Bordo</b>	<b>Pendiente media del fondo de la zanja (%)</b>		
1	0.40	0.26	0.40
2	0.20	0.51	0.20
3	0.12	0.89	0.12
4	0.74	0.12	0.74
5	0.09	0.09	0.09
6	0.21	0.08	0.21
7	0.02	0.39	0.02
8	0.53	0.08	-
9	-	0.08	-
10	-	0.08	-
<b>Máximo</b>	0.74	0.89	0.74
<b>Promedio</b>	<b>0.29</b>	<b>0.28</b>	<b>0.25</b>
<b>Mínimo</b>	0.02	0.08	0.02

Además, cabe señalar que en la parcela A solo el 25% de las zanjas tuvieron una pendiente menor de 0.1 %, en la parcela B el 40 % de las zanjas reportaron una pendiente menor de 0.1% y en la parcela C el 27% de las zanjas cumplieron esta condición. Las parcelas A y C tuvieron mayor deficiencia en el trazo, nivelación y construcción. En contraste, las zanjas de la parcela B fueron las mejor trazadas, ya que, se construyeron dos años después y los productores, como se señaló previamente, ya tenían más experiencia en su construcción (Cuadro 19). De esto se deduce la importancia de construir zanjas bordo con las especificaciones de diseño para captar agua de lluvia.

### 6.3.2 Capacidad de almacenamiento de agua en las zanjas bordo

Tomando en consideración que las zanjas bordo no cumplieron con el trazo a nivel, era de esperarse que las dimensiones de las zanjas (altura, ancho de la base y de la parte alta) cambiaran como se observa en la Figura 34, ya que, en las tres parcelas se encontró una reducción en la profundidad y ancho superficial (base mayor) de las zanjas, mientras que el ancho de la base menor de la zanja fue el mismo (Cuadro 20).



**Figura 34. Secciones transversales promedio de las zanjas bordo en las parcelas de muestreo.**  
Fuente: Elaboración propia

La capacidad de almacenamiento potencial de agua se redujo por metro lineal en las tres parcelas, no obstante, las zanjas construidas en la parcela B tuvieron en promedio una menor reducción en la capacidad de almacenamiento (6.1%), lo cual se explica porque fue la parcela, como se señaló previamente que tuvo mejor trazo de las zanjas. En cambio, la parcela C tuvo una reducción en el almacenamiento de agua de 14.3% y fue la parcela A la que tuvo la mayor reducción de almacenamiento (20%), como consecuencia del desnivel de las zanjas bordo de las parcelas (Cuadro 19 y Cuadro 20).

Cuadro 20. Dimensiones ajustadas de las zanjas por parcela y reducción en la capacidad de almacenamiento.

Parcelas	Dimensiones de la zanja			Capacidad de almacenamiento real	Capacidad de almacenamiento potencial	% de reducción en el almacenamiento
	hr (m)	b (m)	sr (m)	m <sup>3</sup> metro lineal	m <sup>3</sup> metro lineal	
A	0.26	0.66	1.43	0.28	0.35	23.0
B	0.36	0.65	1.06	0.31	0.33	6.1
C	0.22	0.53	1.12	0.18	0.21	14.3
<b>Promedio</b>	<b>0.28</b>	<b>0.61</b>	<b>1.20</b>	<b>0.26</b>	<b>0.30</b>	<b>14.47</b>

hr: altura real, b: ancho de la base, sr: ancho real de la parte alta

### 6.3.3 Espaciamiento entre zanjas bordo

El espaciamiento entre zanjas bordo es un componente importante del sistema (Flores, 2012), ya que, el cálculo adecuado permitirá alcanzar los objetivos de captar el agua que escurre, propiciar su infiltración (Vohland y Barry, 2009) y garantizar su adecuado funcionamiento.

La pendiente media entre zanjas (PEZ) en promedio fue de 10.3%, con variación de 9.6 a 11.2% para las tres parcelas; en la parcela B se tuvo la mayor variación de la pendiente (12.5%) entre las zanjas bordo, mientras que en las parcelas A y C fue de 3.6% (Cuadro 21).

La longitud de las zanjas estuvo en función de la forma de la parcela, por ello, el rango de variación de la longitud fue amplio de 17.7 m a 107.9 m; en las parcelas A y B en promedio la longitud de las zanjas fue de 51.2 m y en la parcela C fue de 76.3 m (Cuadro 21).

El espaciamiento entre zanjas de las tres parcelas varió de 5.9 m a 30.9 m, con un promedio de 13.7 m. Sin embargo, fue la parcela C la que presentó mayor espaciamiento entre zanjas con un promedio de 21.1 m y un rango de variación de 10.1 m a 30.9 m. Con el espaciamiento entre zanjas y la longitud de las zanjas bordo se estimaron las áreas de captación de las parcelas que variaron de 441.22 a 1,673.3 m<sup>2</sup> en promedio. Así, en la parcela C el área de captación entre zanjas fue mayor con un rango de variación de 571.4 a 2,567.5 m<sup>2</sup> (Cuadro 21).

La densidad de zanjas bordo por unidad de superficie fue de 12 y 14 zanjas bordo, en las parcelas A y B, respectivamente. Mientras que en la parcela C se tuvo solamente cuatro zanjas bordo por ha, tres veces menos que las otras parcelas, que está asociada con el tamaño de la parcela (ancho de 76 m y largo de 148 m en promedio) y un suelo Leptosol somero.

Los espaciamientos entre zanjas calculados con la metodología de CONAFOR (2014), donde se asegura la captación del 50% de la lluvia máxima en 24 h (Pr 5 años) fueron para la parcela A de 8 m en promedio, en la parcela B de 9 m y parcela C de 5 m. Si se comparan los espaciamientos estimados con los levantados en campo, se observa que el espaciamiento entre zanjas de la parcela A fue mayor en 23% en comparación con lo calculado, la distancia entre zanjas de la parcela B fue muy similar incluso 2% menor que la calculada, y en la parcela C se encontró una diferencia de 76% más que lo calculado (Cuadro 21). Lo que indica que el diseño de espaciamiento entre zanjas bordo de las parcelas A y B se apegaron mejor a las recomendaciones de espaciamiento entre zanjas de CONAFOR (2014) no siendo así en la parcela C.

Sin embargo, es importante analizar el criterio de espaciamiento de las zanjas bordo, ya que, a pesar de que existe una normatividad, en campo no se siguen los lineamientos y solo se realizan los trabajos, lo cual modifica los volúmenes de obra, las inversiones y no se cumplen con los objetivos de las mismas.

La comparación de los espaciamientos entre zanjas levantadas en campo y los estimados con el método del intervalo horizontal (IH) (CONAFOR, 2014) muestra que existe una gran dispersión

en los espaciamientos, ya que, para una misma pendiente en campo existe una variación de más de 10 m (Figura 35).

En el caso de las parcelas A y B los espaciamientos medidos en campo fueron menores que los estimados, en cambio, en la parcela C los espaciamientos de campo son mayores que lo estimado. Esto indica que en las parcelas A y B existe una mayor cantidad de obra e inversión, que no se verifica en campo, solo se analiza que se cumpla con la superficie beneficiada y la inversión autorizada, pero no se verifican las especificaciones de diseño de las obras (COLPOS, 2008, Vargas y Venegas, 2014).

Cabe destacar la diferencia de los espaciamientos calculados con las dos metodologías, ambas recomendadas por la CONAFOR (2014). Con la metodología de captación del 50 % de escurrimiento se tienen menor espaciamiento que con la metodología de IH, esto influye en la superficie perturbada y la cantidad de agua captada.

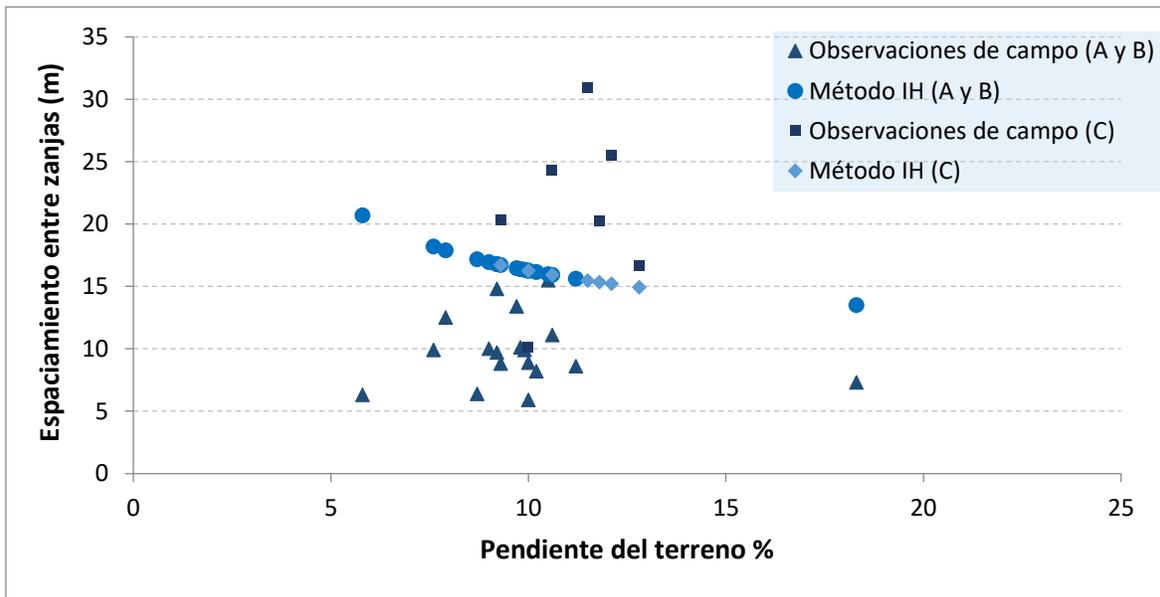


Figura 35. Comparación de los espaciamientos observados y estimados entre zanjas, parcelas A, B y C

La construcción de las zanjas bordo implica cortes y rellenos para conformarlas, por ello, a la superficie que ocupan las zanjas y el bordo se le consideró como un área disturbada. Esta superficie representa el 25.05% en promedio del área de las parcelas A y B, con una variación del 15.5%, mientras que en la parcela C el área disturbada fue sólo de 13.8% con un rango de variación 14.1%;

lo cual se explica por los mayores espaciamientos entre zanjas bordo. La zona disturbada varía de 1,243.39 a 2,540.91 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> en las tres parcelas, lo representa del 12 – 25% de disturbio en una hectárea para alcanzar los objetivos de captación, retención e infiltración de agua o retención de humedad con la finalidad de incidir en la producción de biomasa. Estos resultados de disturbio son similares al 8 - 35 % de modificación por ha, que se encontró en el parque Nacional Ixtapopo donde se establecieron zanjas trincheras (Ramírez, 2016).

Cuadro 21. Características del área de captación de las zanjas bordo en las parcelas de estudio.

Zanjas bordo	Parcela A						Parcela B						Parcela C					
	PEZ (%)	EEZ (m)	LZB (m)	AC (m <sup>2</sup> )	AD (m <sup>2</sup> )	PAD (%)	PEZ (%)	EEZ (m)	LZB (m)	AC (m <sup>2</sup> )	AD (m <sup>2</sup> )	PAD (%)	PEZ (%)	EEZ (m)	LZB (m)	AC (m <sup>2</sup> )	AD (m <sup>2</sup> )	PAD (%)
1	9.2	14.8	46.5	538.6	147.4	21.5	18.3	7.3	25.7	147.5	73.04	33.1	10	10.1	69.4	571.4	172.42	23.2
2	10.5	15.5	55.5	591.8	178.3	23.2	10.2	8.2	24	209.7	58.22	21.7	9.3	20.3	85.1	1,460.40	248.69	14.6
3	7.9	12.5	41.3	598	135.6	18.5	10	8.9	17.7	152	48.23	24.1	10.6	24.3	107.9	1,948.30	291.85	13.0
4	7.6	9.9	53.7	522.6	159.9	23.4	5.8	6.3	25.1	157.5	70.85	31.0	11.8	20.2	52.8	1,957.40	248.12	11.2
5	11.2	8.6	50.9	540	150.4	21.8	9.3	8.8	46.5	383.8	136.06	26.2	11.5	30.9	55.5	2,567.50	275.52	9.7
6	10	5.9	64.3	427.3	220.2	34.0	9.7	13.4	73.3	698.4	234.67	25.2	12.1	25.5	89.7	2,037.00	205.15	9.1
7	10.6	11.1	55.9	561.6	194.8	25.8	9.2	9.7	76.9	760.3	234.45	23.6	12.8	16.7	73.7	1,170.80	221.55	15.9
8	9.9	9.9	41.3	444.2	137.6	23.7	9	10	75.3	750.7	232.58	23.7	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	8.7	6.4	72.8	463.5	186.88	28.7	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	9.8	10.1	74.6	688.8	227.47	24.8	-	-	-	-	-	-
<b>Máximo</b>	<b>11.2</b>	<b>15.5</b>	<b>64.3</b>	<b>598</b>	<b>220.24</b>	<b>34.0</b>	<b>18.3</b>	<b>13.4</b>	<b>76.9</b>	<b>760.3</b>	<b>234.67</b>	<b>33.1</b>	<b>12.8</b>	<b>30.9</b>	<b>107.9</b>	<b>2,567.50</b>	<b>291.9</b>	<b>23.2</b>
<b>Promedio</b>	<b>9.6</b>	<b>11.0</b>	<b>51.2</b>	<b>528.0</b>	<b>165.5</b>	<b>24.0</b>	<b>10</b>	<b>8.9</b>	<b>51.2</b>	<b>441.22</b>	<b>150.3</b>	<b>26.1</b>	<b>11.2</b>	<b>21.1</b>	<b>76.3</b>	<b>1,673.3</b>	<b>237.6</b>	<b>13.8</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.6</b>	<b>5.9</b>	<b>41.3</b>	<b>427.3</b>	<b>135.56</b>	<b>18.5</b>	<b>5.8</b>	<b>6.3</b>	<b>17.7</b>	<b>147.5</b>	<b>48.23</b>	<b>21.7</b>	<b>9.3</b>	<b>10.1</b>	<b>52.8</b>	<b>571.4</b>	<b>172.4</b>	<b>9.1</b>

PEZ: Pendiente media entre zanjas; EEZ: Espaciamiento medio entre zanjas bordo; LZB: Longitud de la zanja bordo; AC: Área de captación; AD: Área disturbada; PAD: Porcentaje de área disturbada.

### 6.3.4 Eficacia de las zanjas bordo en la captación de agua

La captación potencial de agua de las zanjas en promedio fue de 30.83 mm para las tres parcelas, en cambio la captación real fue de 26.17 mm. En la parcela B, la captación de agua real fue de 38.3 mm en promedio, con rango de 22.61 a 57.09 mm. Las zanjas bordo de la parcela A en promedio tuvieron una captación real de 27.43 mm, mientras que en las zanjas de la parcela C fue la menor (5.43 a 28.13 mm). Estos resultados muestran que las zanjas de la parcela B fueron las que cumplieron con la recomendación de la CONAFOR (2014) para captar el 50% de la lluvia máxima en 24 h (Pr 5 años) de la zona que es de 35.35 mm (WWF, 2015), situación que no se presentó en las parcelas A y C (Cuadro 22), lo que repercute en la eficacia de la construcción de las zanjas bordo.

Cuadro 22. Eficacia de las zanjas bordo en la captación de agua.

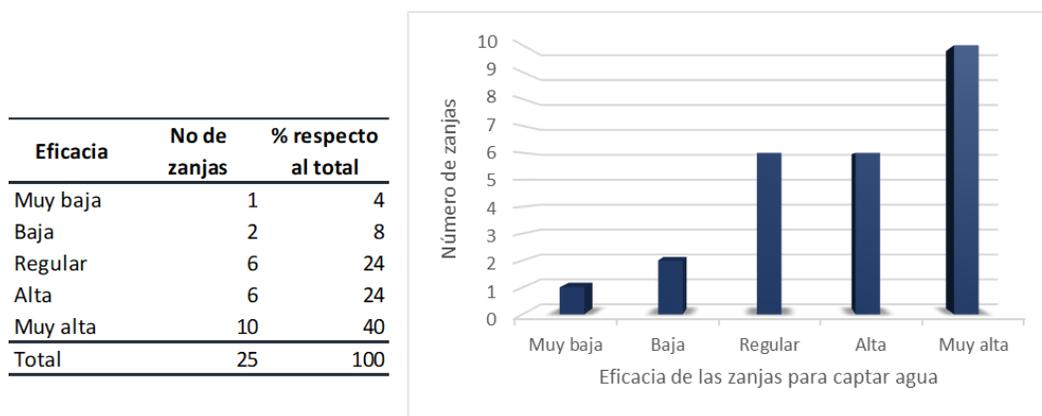
Zanjas Bordo	Parcela A				Parcela B				Parcela C			
	Captación potencial (mm)	Captación real (mm)	Eficacia (%)	Clase	Captación potencial (mm)	Captación real (mm)	Eficacia (%)	Clase	Captación potencial (mm)	Captación real (mm)	Eficacia (%)	Clase
1	39.36	30.3	77	R	39.7	39.7	100	MA	23.54	21.55	92	MA
2	37.29	30.1	81	A	28.7	22.61	78.77	R	11.83	7.05	60	B
3	28.7	25.37	88	A	25.91	24.72	95.41	MA	11.43	5.43	48	MB
4	31.21	23.12	74	R	55.78	49.29	88.37	A	12.27	11.65	95	MA
5	33.13	27.44	83	A	42.43	35.13	82.8	A	8.32	7.25	87	R
6	51.79	32.15	62	B	35.84	34.68	96.75	MA	9.46	8.33	88	R
7	31.25	25.23	81	A	38.77	37.46	96.62	MA	28.15	28.13	100	MA
8	36.94	25.73	70	R	41.47	40.89	98.6	MA				
9					61.3	57.09	93.13	MA				
10					42.68	41.08	97	MA				
<b>Máxima</b>	<b>51.79</b>	<b>32.15</b>	<b>88</b>	<b>A</b>	<b>61.30</b>	<b>57.09</b>	<b>100</b>	<b>MA</b>	<b>28.15</b>	<b>28.13</b>	<b>100</b>	<b>MA</b>
<b>Promedio</b>	<b>36.21</b>	<b>27.43</b>	<b>77</b>	<b>R</b>	<b>41.30</b>	<b>38.30</b>	<b>93</b>	<b>MA</b>	<b>15.00</b>	<b>12.77</b>	<b>81</b>	<b>A</b>
<b>Mínima</b>	<b>28.70</b>	<b>23.12</b>	<b>62</b>	<b>B</b>	<b>25.91</b>	<b>22.61</b>	<b>79</b>	<b>R</b>	<b>8.32</b>	<b>5.43</b>	<b>48</b>	<b>MB</b>

MB: Muy baja; B: Baja; R: Regular; A: Alta y MA: Muy alta

La eficacia promedio en la captación de agua por trazo, estimada como la relación entre la captación potencial y real, fue de 84% con un rango de variación de 48 a 100% para las tres parcelas. Las zanjas bordo en la parcela B tuvieron muy buena eficacia para la captación de agua (93%), gracias al buen trazo y construcción, en contraste las zanjas de la parcela A se clasificaron en promedio como regulares, con un rango de variación de baja eficacia a alta. Finalmente, las

zanjas en la parcela C fueron las que tuvieron mayor rango de variación en su eficacia desde muy baja a muy alta (48 a 100%).

Es importante señalar que en la eficacia de las zanjas bordo se consideró la captación real tomando en cuenta el levantamiento en campo. En general, se aprecia que el 64% de las zanjas tienen una eficacia alta y muy alta para captar los escurrimientos, el 24% tiene una eficacia regular y solo el 12% tiene eficacias que varían de baja a muy baja. Los resultados sugieren que a pesar de las deficiencias en el trazo de las zanjas la relación entre la captación potencial y la real es buena; asumiendo que todo el volumen precipitado escurre y sin tomar en cuenta la estimación del exceso de lluvia, producto de la relación precipitación e infiltración (Figura 36).



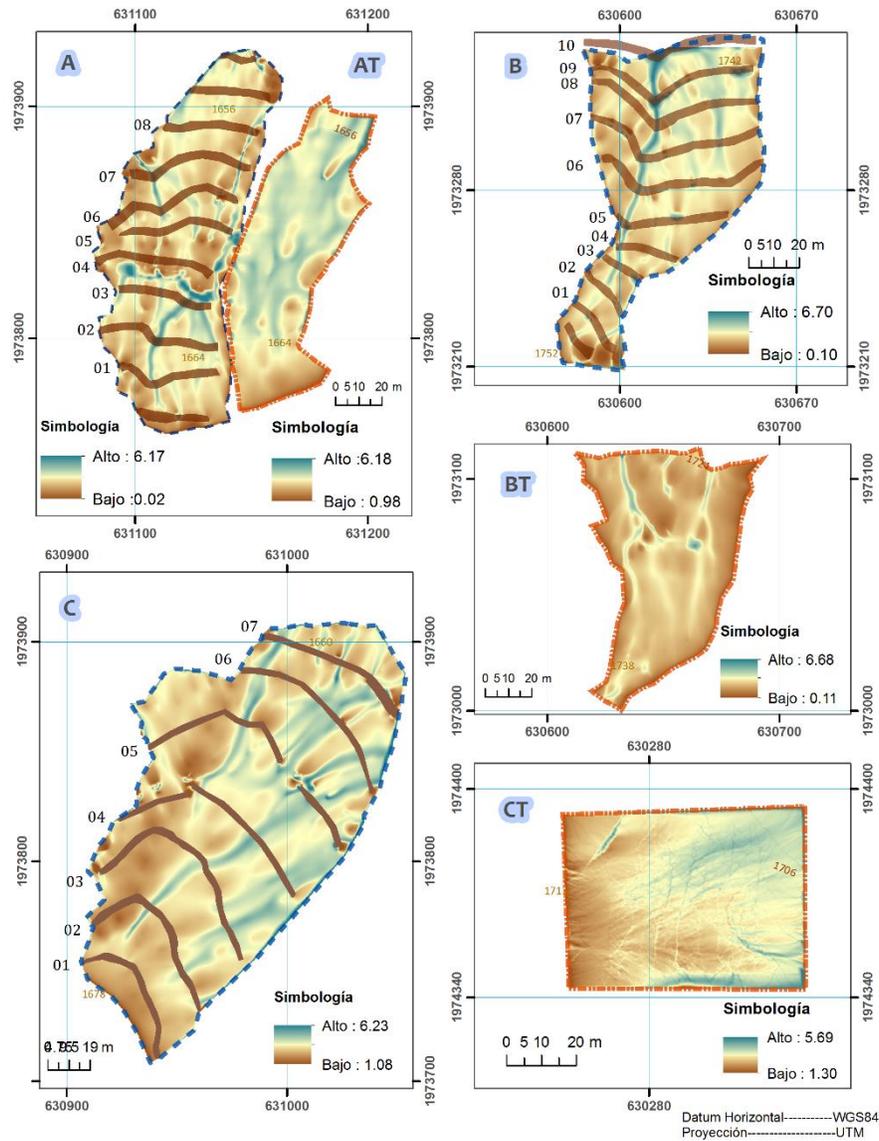
**Figura 36. Eficacia de las zanjas bordo para captar escurrimientos**

### 6.3.5 Índice topográfico de humedad en las parcelas de muestreo

Los resultados del Índice Topográfico de Humedad (ITH) son adimensionales, los valores bajos corresponden a zonas donde la forma de la pendiente es cóncava, el área de captación es mínima y la pendiente es mayor. Los valores altos corresponden a zonas de acumulación de humedad o drenaje superficial, donde la forma de la pendiente es convexa, el área de captación es mayor y la pendiente menor (Böhner y Selige, 2006).

En la parcela A se observaron canales a diferencia de la parcela AT donde se observó que el micro relieve es uniforme, lo que indicaría un flujo del agua laminar. Cabe destacar que las zanjas bordo de la parcela A cumplieron con el objetivo de reducir la longitud de la pendiente y así como la longitud del tránsito de los escurrimientos (Figura 37), lo que incide en la reducción de la erosión,

ya que, la longitud de la pendiente es un factor que influye en la pérdida del suelo por erosión hídrica.



**Figura 37. Índice topográfico de humedad de las parcelas de muestreo (A, AT, B, BT, C y CT).**  
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en la parcela A se observó que no se cumplió con el supuesto de diseño, donde las unidades son independientes entre sí y no hay movimiento de agua entre estas de manera superficial (Flores, 2012), ya que, entre la zanja 03 y 04 se observó movimiento de agua, así como entre las zanjas 04-05 y entre las zanjas 05-06, en estas últimas por la influencia del camino interparcelario (Figura 37).

En la parcela B se observó una corriente a lo largo de la parcela y pequeños canales, sin embargo, con las zanjas, este canal y los canales se seccionaron cumpliendo con el objetivo de las zanjas bordo de reducir la longitud de la pendiente y captar escurrimientos. En la parcela BT también se observaron canales que se presentan a lo largo de la parcela. En la parcela B tampoco se cumplió con el supuesto de diseño, donde las unidades son independientes (Flores, 2012), ya que, entre la zanja 04 y 05 hubo movimiento de escurrimientos superficiales.

Los resultados del ITH que se obtuvieron en la parcela C indican que las zanjas cumplieron con el objetivo de fraccionar la longitud de la pendiente. Sin embargo, el supuesto de independencia de las zanjas bordo 04, 05 y 06 no se cumplió, lo que afecta la cantidad de escurrimiento que puede captar las zanjas bordo a las que le llegan escurrimientos adicionales. En la parcela CT se tuvo pendiente uniforme, con flujo del agua laminar; similar al de la parcela AT (Figura 37).

El flujo superficial entre zanjas bordo se aprecia mayormente en las parcelas A y C, este flujo podría generar erosión en surcos y escurrimiento adicional a las zanjas aguas abajo, lo que compromete la eficacia de las zanjas en la captación del agua. Como se ha comentado en anteriores apartados las zanjas bordo de la parcela B son las mejor trazadas y es donde el problema del flujo superficial es menor.

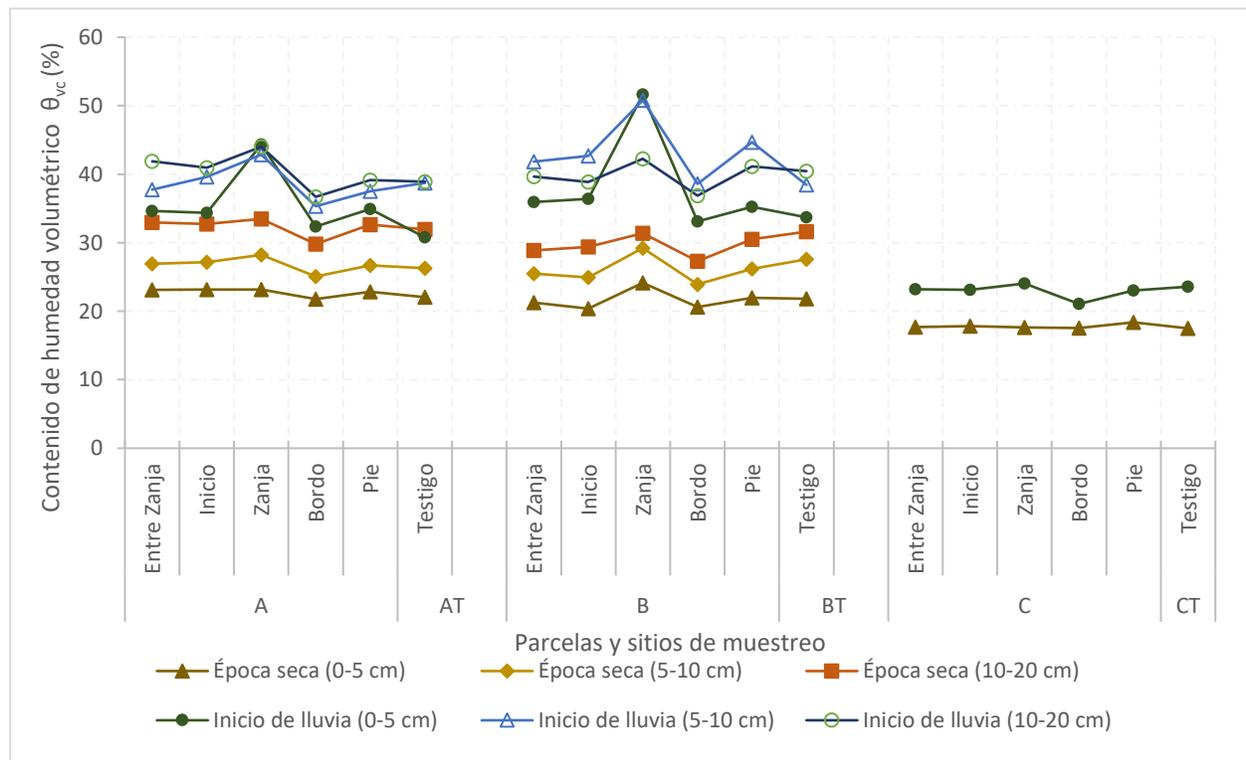
#### **6.4 Contenido de humedad en el suelo**

El contenido de humedad es una propiedad del suelo muy dinámica en espacio y tiempo, ya que, continuamente hay cambios por la precipitación e infiltración o por evaporación y extracción de agua a través de la raíz de las plantas (Hillel *et al.*, 1980b), es por ello, se encontró una variación de contenidos de humedad por fecha de muestreo y profundidad.

En la primera fecha de muestreo (03 de abril de 2016) se observó que el contenido de humedad en las parcelas A y B, para los primeros centímetros fue de 22.25% (0-5 cm) y de 26.38% (5-10 cm) en promedio. En cambio, en las parcelas AT y BT el contenido de humedad promedio fue de 21.93% (0-5 cm) y de 26.95% (5-10 cm). A una profundidad de 10- 20 cm en las parcelas con zanjas bordo (A y B) (30.91%) y parcelas testigos (31.78 %) se registró un mayor contenido de humedad a pesar que la medición se realizó en época de sequía (WWF, 2015), lo cual, puede explicarse por el evento de lluvia de 29 mm que se presentó el 09 de marzo de 2016 (CONAGUA,

2016), además se observa que a partir de 5-10 cm las parcelas testigo presentaron mayor contenido de humedad.

En la época de inicio de lluvia (20 de mayo 2016) el contenido de humedad en las parcelas A y B también tuvo variación respecto a la profundidad, de 0-5 cm el contenido de humedad fue de 37.29%, de 5-10 cm fue de 41.16% y de 10-20 cm de 40.14% en promedio. En las parcelas AT y BT de 0-5 cm el contenido de humedad fue de 33.23%, de 5-10 cm fue de 38.59% y de 10-20 cm de 39.68% en promedio, ya que, en las zanjas de ambas parcelas hubo una concentración de humedad mayor. En la parcela B también destaca el contenido de humedad en el pie en comparación con las parcelas testigo (Figura 38).



**Figura 38. Distribución del contenido de humedad en las parcelas con práctica y testigo, en dos épocas.**  
Fuente: Elaboración propia.

En las parcelas C y CT los contenidos de humedad en promedio fueron menores en comparación con los resultados de las otras parcelas de muestreo, 17.75% promedio en la época seca y 23.01% en el inicio de lluvia (Figura 38); estos valores son resultado de la restricción de profundidad del

suelo en las dos parcelas. El contenido de humedad en la parcela C fue de 17.81% en época de seca y 22.89% en época de lluvia mientras que en la parcela CT fue de 17.5% y 23.57%, respectivamente. El contenido de humedad del bordo en época de lluvia es menor que todos los sitios del sistema zanjas bordo y en el testigo, lo que influye en el promedio de la parcela con práctica.

Los efectos de las zanjas bordo, en el contenido de humedad del suelo, muestran que para la época de secas no hubo diferencias significativas entre los sitios de muestreo del área de captación (entre zanja, inicio y pie) de la parcela A y C con los testigos. En contraste, en la parcela BT (testigo), el contenido de humedad fue significativamente mayor que el obtenido en los sitios de entre zanjas (entre zanja, inicio y pie) de la parcela B. Esto indica que a pesar de haber construido las zanjas no existe una humedad remanente producto del impacto de dichas zanjas en la zona de captación (Cuadro 23).

Los contenidos de humedad en el sistema zanjas bordo de las parcelas A y C no muestra diferencias significativas entre los sitios de muestreo (entre zanja, inicio, zanja, bordo y pie). Lo cual explica que no existe un efecto en la humedad remanente dentro del sistema, a excepción del sitio de muestreo bordo a una profundidad de 5-10 cm de la parcela A que es diferente al resto de los sitios de muestreo del sistema, debido al tipo de material de relleno con el que está construido.

En época de inicio de lluvias el contenido de humedad en el área de captación (entre zanja, inicio y pie) de la parcela A fue mayor en comparación con la parcela testigo a una profundidad de 0-5 cm, pero de 5-10 fue mayor el contenido de humedad en la parcela testigo y de 10-20 cm no hubo diferencia (Cuadro 23). Con respecto al sistema zanja bordo de la parcela A fue en la zanja donde se concentró la humedad en comparación con los demás sitios de muestreo y fue en el bordo donde se encontró menor contenido de humedad.

En la parcela B no hubo diferencias significativas en contenido de humedad entre los sitios de muestreo del área de captación (entre zanja, inicio y pie) y la parcela testigos. En el sistema zanjas bordo como en la parcela A fue en la zanja donde hubo significativamente mayor contenido de humedad. En profundidades de 5-10 cm y de 10-20 cm los testigos presentan un contenido de humedad significativamente mayor que los bordos de las parcelas A y B (Cuadro 23). Este cambio, se explica debido a que la estructura del suelo se rompe por el movimiento del suelo; propiedad

influye en el contenido de humedad y la capacidad de retención de humedad (Hamblin, 1985; Klute, 1986).

Cuadro 23. Efecto de las zanjas bordo en el contenido de humedad por sitio y parcelas de muestreo.

Parcela	Sitio	Contenido volumétrico de humedad (%)					
		Época seca			Inicio de lluvias		
		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
<b>A</b>	Entre Zanjas	23.11 a	26.93 a	32.98 a	34.63 b	37.76 c	41.90 a
	Inicio	23.18 a	27.16 a	32.72 a	34.35 b	39.63 b	40.94 a
	Zanja	23.18 a	28.23 a	33.48 a	44.34 a	42.88 b	44.01 a
	Bordo	21.79 a	25.05 b	29.79 a	32.35 c	35.32 c	36.70 b
	Pie	22.84 a	26.69 a	32.66 a	34.93 b	37.50 c	39.16 a
<b>AT</b>	Testigo	22.03 a	26.30 a	31.93 a	30.77 c	38.71 b	38.92 a
<b>B</b>	Entre Zanjas	21.28 b	25.48 b	28.90 b	35.95 b	41.82 b	39.64 a
	Inicio	20.40 b	24.92 b	29.40 b	36.40 b	42.68 b	38.85 b
	Zanja	24.14 a	29.22 a	31.38 a	51.62 a	50.80 a	42.25 a
	Bordo	20.60 b	23.93 b	27.30 b	33.11 b	38.57 c	36.86 b
	Pie	21.95 a	26.20 b	30.49 a	35.23 b	44.68 b	41.13 a
<b>BT</b>	Testigo	21.83 a	27.60 a	31.63 a	33.70 b	38.46 c	40.44 a
<b>C</b>	Entre Zanjas	17.67 c	-	-	23.21 d	-	-
	Inicio	17.83 c	-	-	23.10 d	-	-
	Zanja	17.63 c	-	-	24.06 c	-	-
	Bordo	17.54 c	-	-	21.07 d	-	-
	Pie	18.37 c	-	-	23.03 d	-	-
<b>CT</b>	Testigo	17.50 c	-	-	23.57 d	-	-
<b>DMS</b>		2.84	3.34	3.89	9.35	6.05	5.12

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). DMS: Diferencia mínima significativa.

El área de captación de la parcela C no tuvo diferencia significativa en comparación con la parcela testigo, para ambas fechas de muestreo. En la época de lluvia la humedad se concentró en la zanja en comparación con los demás sitios de muestreo del sistema zanjas bordo de la parcela con práctica. Además, no hubo diferencia entre el sitio de muestreo del bordo, en comparación con la parcela testigo, para ninguna fecha.

Los datos de humedad a profundidad de 0-5cm, 5-10 cm y 20 cm fueron normales (época de seca  $p=0.0001$  y época de inicio de lluvia  $p=0.0001$ ) y con homogeneidad de varianza (época de seca  $p=0.0001$  y época de inicio de lluvia  $p=0.0001$ ), lo que permitió realizar la prueba de medias

## 6.5 Propiedades hidrodinámicas del suelo

La construcción de la zanjas bordo modifica la pendiente del terreno, reduce la longitud de la pendiente, cambia el tránsito de los escurrimientos, la capacidad de transporte de partículas del suelo, los procesos de erosión, provoca almacenamiento de agua en las zanjas y disturbios del suelos en la zanja y bordo, por lo que, se espera que cambien algunas propiedades hidrodinámicas de los suelos, especialmente en las zonas de recepción de agua y sedimentos y de depósito del material de excavación (bordo). Para conocer estos cambios se compararon los resultados de las determinaciones hidrodinámicas en dos suelos con obras (parcelas A y C), en tres posiciones (entre zanjas, zanja y bordo) comparado con las parcelas testigo (AT y CT).

La densidad aparente en la parcela A no tuvo diferencias entre los sitios de entre zanjas y bordo con los resultados de la parcela testigo (AT) (Cuadro 24), sin embargo, en la zanja fue donde se encontró menor densidad aparente (0.93), consistente con el menor contenido de arenas (23.12%) y el mayor contenido de arcillas (30.11%), producto de la acumulación de sedimentos (Arvidsson, 1998).

En el bordo, en comparación con la parcela testigo se encontró menor contenido de limos y menor cantidad de materia orgánica (0.83%) en promedio (Cuadro 24), ya que, el bordo se construyó con material de los horizontes A, AB y Bk; siendo el material de este último horizonte el que quedó expuesto y mezclado con el suelo de los otros horizontes superficiales. Esta diferencia implicaría que la estabilidad de agregados se reduzca de 75% (1.72 % de MO) en la parcela testigo a 66 % (0.83 % de MO) en el bordo (USDA, 1999).

La zona de entre zanjas y en el bordo de la parcela A, comparado con los valores de la parcela AT, no tuvieron efectos en la capacidad de retención de humedad a capacidad de campo (CC), a punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA), a pesar de que en el bordo se tuvo menor cantidad de materia orgánica; lo que sugiere una estabilización del bordo, debido al pasto que lo cubre.

La capacidad de retención de agua a CC (38.06 %) y humedad aprovechable (11.96%) en la zanja fue significativamente mayor respecto al testigo (32.30 % y 8.35 %). Esto ha propiciado mejores condiciones debido a la acumulación de limo (46.77 %) y arcilla (30.11 %), y materia orgánica

(1.5 %), ya que según el perfil en el horizonte de 40-63 cm el contenido de MO es de 0.51% (Cuadro 24).

Cuadro 24. Efecto de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas del suelo, parcela A, C, AT y CT (media y desviación estándar).

Sitio	CC	PMP	HA	Da	MO	A	L	R
	%			g cm <sup>-3</sup>	%			
<b>Parcela A</b>								
Entre Zanjas	32.31 b ±2.59	22.81 a ±3.06	9.50 b ±2.67	1.02 a ±0.12	1.72 a ±0.69	26.87 a ±4.79	45.34 a ±5.35	27.79 a ±6.29
Zanja	38.06 a ±4.42	26.09 a ±4.48	11.96 a ±3.53	0.93 a ±0.14	1.50 a ±0.60	23.12 b ±7.87	46.77 a ±7.54	30.11 a ±7.04
Bordo	32.34 b ±5.59	22.62 a ±4.91	9.72 b ±2.92	1.00 a ±0.13	0.83 b ±0.36	32.00 a ±13.71	40.21 b ±8.65	27.79 a ±11.88
<b>Parcela AT</b>								
Testigo	32.30 b ±4.61	23.95 a ±3.17	8.35 b ±3.04	1.02 a ±0.09	1.75 a ±0.47	29.05 a ±5.90	47.28 a ±7.76	23.67 a ±4.86
<i>DMS*</i>	3.82	3.5	2.6	0.11	0.48	7.45	6.17	6.95
<b>Parcela C</b>								
Entre Zanjas	22.36 b ± 2.25	13.87 a ± 2.33	8.51 a ± 2.93	1.20 a ± 0.17	3.64 a ± 0.59	46.53 a ± 1.07	44.33 a ± 8.35	9.14 b ± 8.36
Zanja	27.59 a ± 3.06	17.39 a ± 2.80	10.20 a ± 4.19	1.20 a ± 0.11	5.13 a ±0.93	37.71 a ± 3.55	48.57 a ± 9.68	13.71 a ± 12.27
Bordo	21.73 b ± 1.49	15.64 a ± 3.80	6.07 a ± 3.37	1.04 a ± 0.20	2.81 b ± 1.42	53.46 a ± 2.27	39.35 a ± 7.74	10.86 a ± 8.85
<b>Parcela CT</b>								
Testigo	25.18 a ± 2.92	17.50 a ± 2.12	7.68 a ± 1.25	1.25 a ± 0.17	5.23 a ± 1.46	53.67 a ± 1.15	35.69 a ± 2.19	7.00 b ± 8.36
<i>DMS**</i>	4.09	5.15	5.79	0.25	1.94	16.16	13.91	4.15

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). CC: Capacidad de campo, PMP: Punto de marchitez permanente, HA: Humedad aprovechable; Da: Densidad aparente; MO: Materia orgánica; A: arena, L: limo y R: arcilla. \*Diferencia mínima significativa de las parcelas A y AT, \*\*Diferencia mínima significativa de las parcelas C y CT.

El contenido de materia orgánica (2.81%) en el bordo también fue menor que en la parcela CT, lo que indicaría una pérdida por el disturbio que se realiza, ya que en esta parcela se realizó una mezcla de roca del horizonte R y el suelo (horizonte A). Las propiedades de PMP, HA y Da en los sitios de entre zanja y bordo de la parcela C no mostraron diferencias en comparación con la parcela testigo (Cuadro 24). Sin embargo, la perturbación que se genera en el bordo influye en que

la capacidad de retención de humedad a CC de la parcela CT sea mayor. En la zanja hubo mayor contenido de arcilla (13.71%) y menor contenido de arena (37.71%), igual contenido de MO que en la parcela testigo, lo que explica una mayor capacidad de retención de humedad y producción de biomasa, aunque los objetivos de la zanja sea la de captar agua para su infiltración (CONAFOR, 2014). Esto indica que puede existir remoción lateral de los taludes de las zanjas o el proceso de arrastre de partículas a las zanjas.

Las propiedades hidrodinámicas del suelo entre zanjas no se modificaron en comparación con las parcelas testigo. En cambio, las zonas disturbadas, la zanja por la captación de sedimentos y el bordo por el depósito del material de excavación, tuvieron diferencias con respecto a las parcelas de control.

### **6.5.1 Infiltración**

La infiltración básica del suelo tuvo diferencias entre las parcelas (Cuadro 25); en la parcela A infiltración básica fue moderadamente rápida ( $6.52 \text{ cm h}^{-1}$ ) mayor que la estimada para la parcela C que fue rápida  $43.11 \text{ cm h}^{-1}$ , de acuerdo con la USDA (1999).

La diferencia en infiltración básica entre parcelas (A y C) se explica por los contenidos de arenas (20.2 y 39.7 %) y arcillas (25.2 y 6.4%), la capacidad de retención de humedad (32.31 y 22.36 %), contenido de materia orgánica (1.70 y 2.19 %) y profundidad del suelo de cada parcela respectivamente (Cuadros 10, 11, 16 y 17). El suelo de la parcela C tiene una profundidad promedio de 15 cm, después hay roca continua, lo que genera flujos subsuperficiales, en cambio la profundidad en la parcela A es mayor de un metro y en los horizontes de 05 a 60 cm hay acumulaciones de carbonatos de calcio secundarios en los macroporos, en diferentes cantidades, lo que representa un obstáculo en la infiltración (Hillel *et al.*, 1980a).

La infiltración inicial en la parcela C fue mayor en comparación de la registrada en la parcela A, sin embargo, no se encontró diferencias significativas, ya que la humedad inicial del suelo al empezar la prueba de campo fue mayor en parcela A (21.02%) en comparación con la parcela C (16.73%) (Cuadro 25).

El exponente K no reportó diferencias significativas entre las parcelas A y C a pesar de las diferencias contrastantes de la velocidad infiltración inicial, ya que la tasa de infiltración promedio

en el tiempo se vuelva constante, a pesar que en los minutos iniciales del proceso de infiltración es más alto.

La infiltración básica en los sitios de la parcela A muestra que no existen diferencias significativas, ya que, las zanjas bordo se construyeron en suelos profundos y el material de la zanja y del bordo proviene de las capas superiores del suelo. En contraste, en la parcela C donde los suelos son someros, se aprecia que no existen diferencias entre sitios de muestreo, pero se aprecia que, en el bordo, la infiltración básica es mayor por el material que lo conformo (suelo y pequeños fragmentos de material parental) (Cuadro 25).

Cuadro 25. Efectos de las zanjas bordo en las propiedades hidrodinámicas de los suelos de las parcelas A y C

Parcela	$f_0$ ( $\text{cm h}^{-1}$ )	$f_c$ ( $\text{cm h}^{-1}$ )	k	Sitio	Humedad %	$f_c$ ( $\text{cm h}^{-1}$ )
A	139.1 a	6.52 a	1.01 a	Entre Zanjas	21.49 a	8.06 b
				Zanja	21.30 a	5.86 b
				Bordo	20.28 a	8.68 b
C	501.2 a	43.11 b	0.98 a	Entre Zanjas	16.90 b	30.89 b
				Zanja	16.41 b	20.26 b
				Bordo	16.90 b	79.62 a
<i>DMS</i>	382.08	11.005	0.7509		1.7	4.49

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). DMS: Diferencia mínima significativa.  $F_0$ =Infiltración inicial.  $f_c$ =Infiltración final o básica. k=constante.

La infiltración básica estimada en el fondo de la zanja de ambas parcelas fue menor en comparación con el área de captación, ya que en el fondo se encontró mayor contenido de arcilla y menor contenido de arena, que el registrado en entre zanjas debido a la acumulación de sedimentos, es por ello que en zanjas de infiltración se recomienda el mantenimiento del fondo de la zanja con la remoción de los sedimentos (Chahar *et al.*, 2012).

En la parcela A la infiltración acumulada fue menor en la zanja y mayor en el bordo, en cambio en la parcela C se observa que en entre zanjas la infiltración acumulada fue menor que en el fondo

de la zanja y en el bordo (Figura 39). En ambas parcelas se observó que en el bordo hay mayor infiltración acumulada, por el suelo disturbado con el que se construyó.

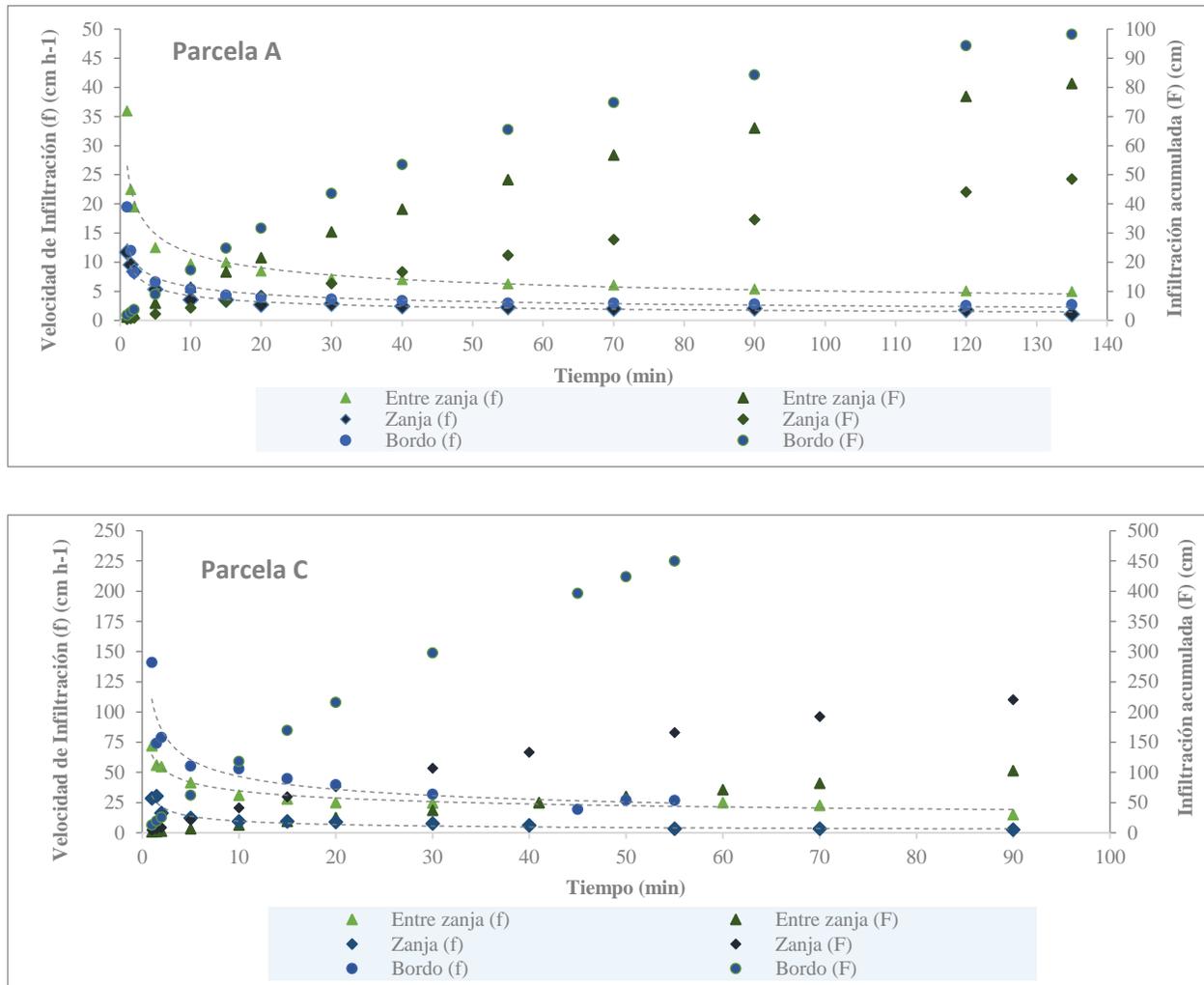


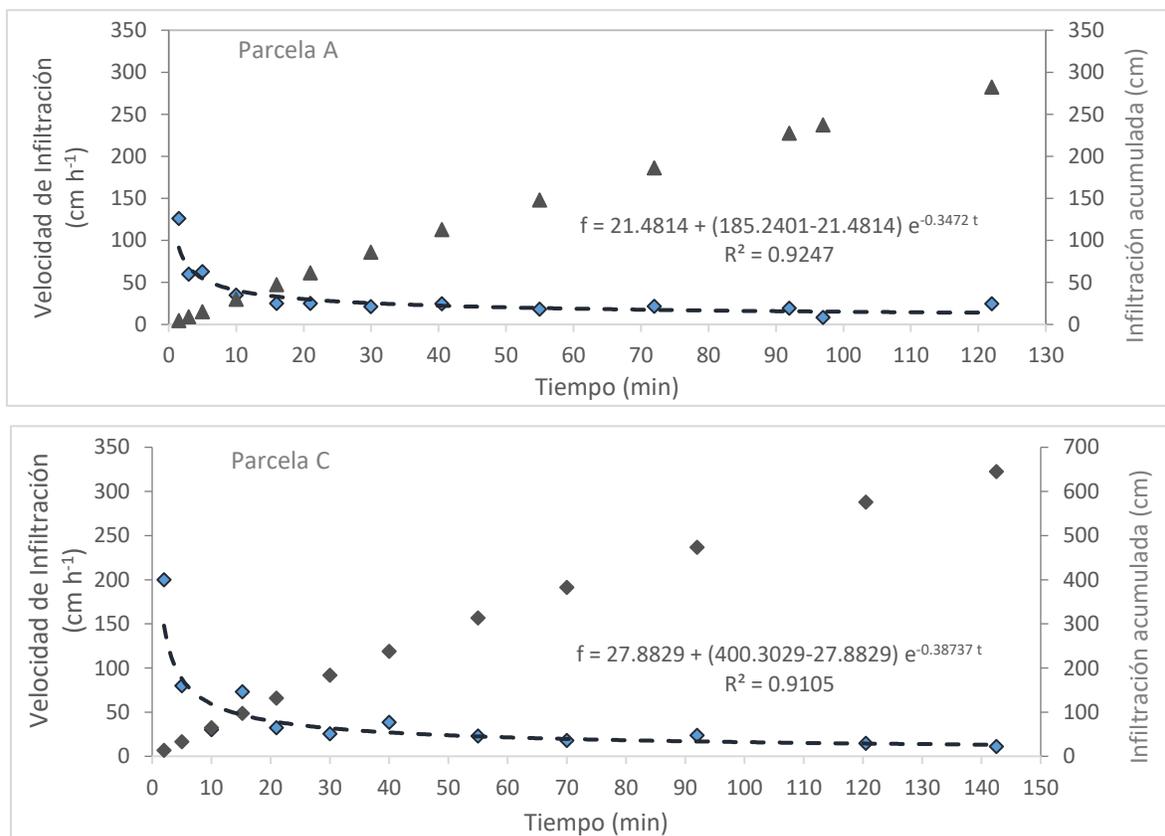
Figura 39. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada en las parcelas A y C.

### Infiltración en secciones de las zanjas

La sección transversal de las zanjas consideró la velocidad de infiltración en todas las dimensiones de la zanja a diferencia de la que se estimó de manera puntual en el fondo. En la parcela A, la infiltración básica en la sección ( $21.48 \text{ cm h}^{-1}$ ) fue mayor que la infiltración registrada en entre zanjas ( $8.06 \text{ cm h}^{-1}$ ) (Cuadro 25 y Figura 40), además, la infiltración acumulada también fue mayor en comparación con el sitio entre zanjas (Figura 40), ya que, en las zanjas hay mayor carga de

presión hidrostática por la lámina de agua en la zanja. La parcela C registró infiltración básica en la sección de la zanja ( $27.88 \text{ cm h}^{-1}$ ) menor que en el sitio de entre zanjas ( $30.89 \text{ cm h}^{-1}$ ).

Los resultados indican que las zanjas favorecen la infiltración acumulada en suelos profundos como el de la parcela A, similar a lo que encontraron Pizarro *et al.*, (2004), en contraste en la parcela C por la restricción de la profundidad del suelo, se presenta un flujo subsuperficial que provocó una infiltración acumulada, lo cual explica que en esa zona se tenga la presencia de manantiales producto de dicho flujo. Esta es una de las posibles explicaciones del porque se presenta una mayor producción de biomasa de especies invasoras como es el zacate rosado.



**Figura 40. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada de una sección de la zanja bordo en las parcelas A y C.**

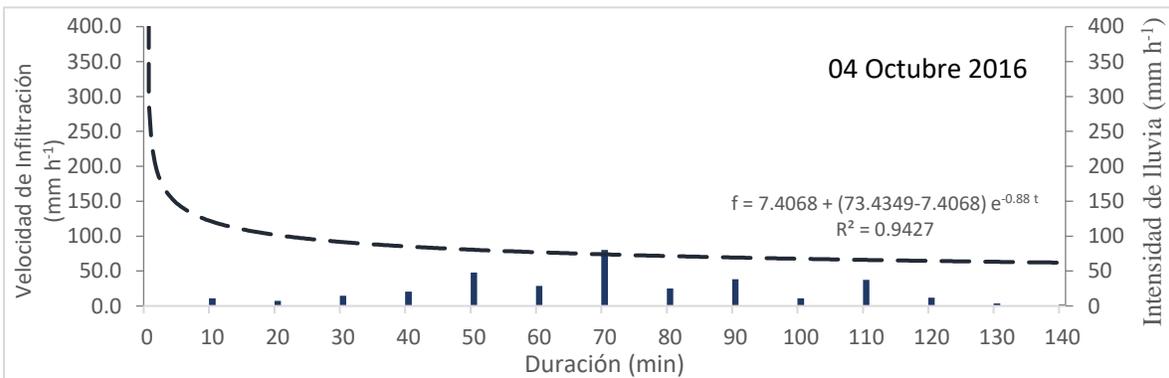
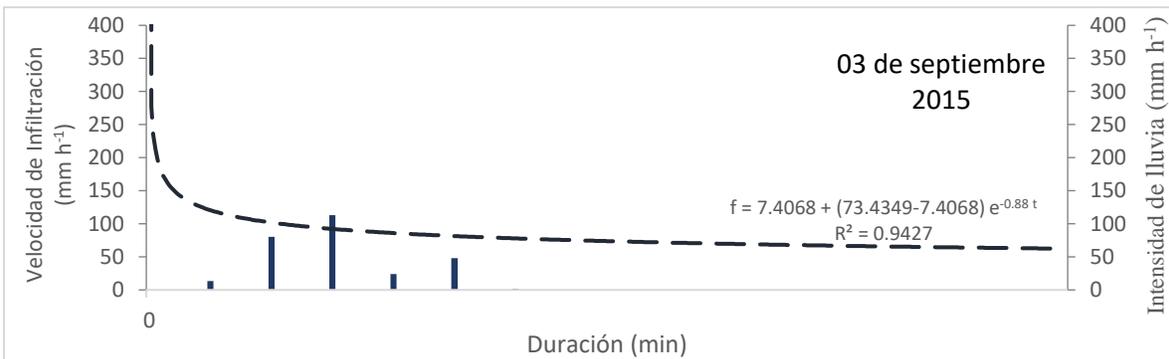
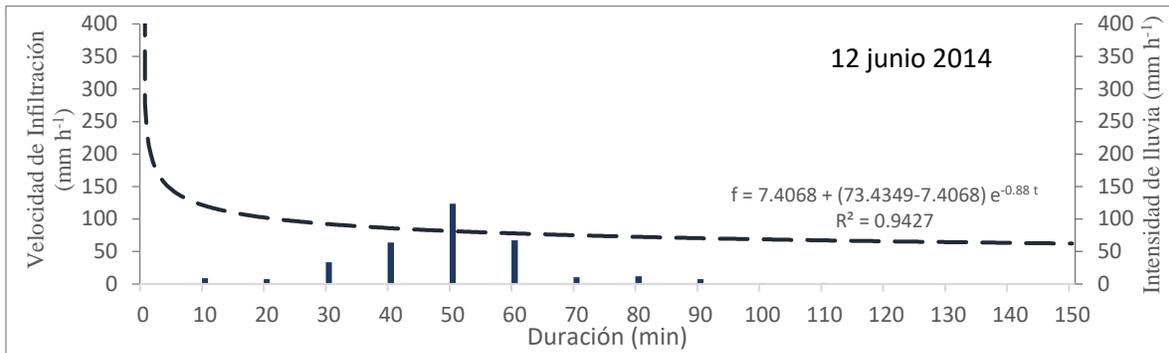
### Exceso de lluvia en el sistema zanjas bordo

El exceso de lluvia se produce cuando la intensidad de la precipitación es mayor que la velocidad de infiltración en el tiempo de duración del evento. La parcela A en los tres eventos analizados

hubo excesos de lluvia, en el evento de 2014 el exceso fue de 8.2 mm, en 2015 de 7.5 mm y en 2016 únicamente 1.1 mm (Cuadro 26 y Figura 41).

Cuadro 26. Exceso de lluvia por evento en la parcela A

Tiempo (min)	Precipitación (mm)	Intensidad de precipitación (mm h <sup>-1</sup> )	Velocidad de infiltración (mm h <sup>-1</sup> )	Infiltración real (mm hr <sup>-1</sup> )	Exceso de lluvia (mm h <sup>-1</sup> )	Exceso de lluvia (mm)
<b>Evento 12/06/2014</b>						
0-10	1.50	9	250.45	9	0	0
10-20	1.26	7.56	74.17	7.56	0	0
20-30	5.59	33.54	74.07	33.54	0	0
30-40	10.68	64.08	74.07	64.08	0	0
40-50	20.57	123.42	74.07	74.07	49.4	8.2
50-60	11.18	67.08	74.07	67.08	0	0
60-70	1.75	10.5	74.07	10.5	0	0
70-80	2.01	12.06	74.07	12.06	0	0
80-90	1.25	7.5	74.07	7.5	0	0
90-100	0.25	1.5	74.07	1.5	0	0
100-110	0.25	1.5	74.07	1.5	0	0
<b>Evento 03/09/2015</b>						
0-10	2.2	13.2	250.45	13.2	0	0
10-20	13.4	80.4	74.17	74.17	6.2	1.0
20-30	18.8	112.8	74.07	74.07	38.7	6.5
30-40	4.0	24	74.07	24	0	0
40-50	8.0	48	74.07	48.00	0	0
50-60	0.2	1.2	74.07	1.2	0	0
<b>Evento 04/10/2016</b>						
0-10	1.8	10.8	250.45	10.8	0	0
10-20	1.2	7.2	74.17	7.2	0	0
20-30	2.4	14.4	74.07	14.4	0	0
30-40	3.4	20.4	74.07	20.4	0	0
40-50	8.0	48.0	74.07	48.0	0	0
50-60	4.8	28.8	74.07	28.8	0	0
60-70	13.4	80.4	74.07	74.1	6.3	1.1
70-80	4.2	25.2	74.07	25.2	0	0
80-90	6.4	38.4	74.07	38.4	0	0
90-100	1.8	10.8	74.07	10.8	0	0
100-110	6.2	37.2	74.07	37.2	0	0
110-120	2.0	12.0	74.07	12.0	0	0
120-130	0.6	3.6	74.07	3.6	0	0
130-140	0.4	2.4	74.07	2.4	0	0



**Figura 41. Curva de infiltración (Entre Zanjas) parcela A y Hietogramas de los eventos seleccionados.**

La variación de los excesos de lluvias están asociados con las intensidades de lluvia ya que se espera que para evento de mayor magnitud los coeficientes de escurrimientos sean mayores y cuando la intensidad disminuye el suelo tiene la capacidad de infiltración par que escurra, esto coincide con (Pizarro *et al.*, 2008) quienes señalan que para el diseño hidrológico de las zanjas bordo es el coeficiente de escurrimiento es importante ya que está inversamente correlacionado con la capacidad de infiltración. Con los datos de exceso de lluvia y la lámina precipitada por evento se calculó el coeficiente de escurrimiento, para el evento de 2014 fue de 0.15, el de 2015

de 0.16 y el de 2016 de 0.02, estos valores indican que para eventos de alta intensidad hay más escurrimiento que contrasta los coeficientes de escurrimiento bajos que se reportan en eventos de baja intensidad como el 2016, esta información no coincide con los coeficientes de escurrimiento de 0.9 que proponen Pizarro *et al.*, (2008) para asegurar el funcionamiento de las zanjas.

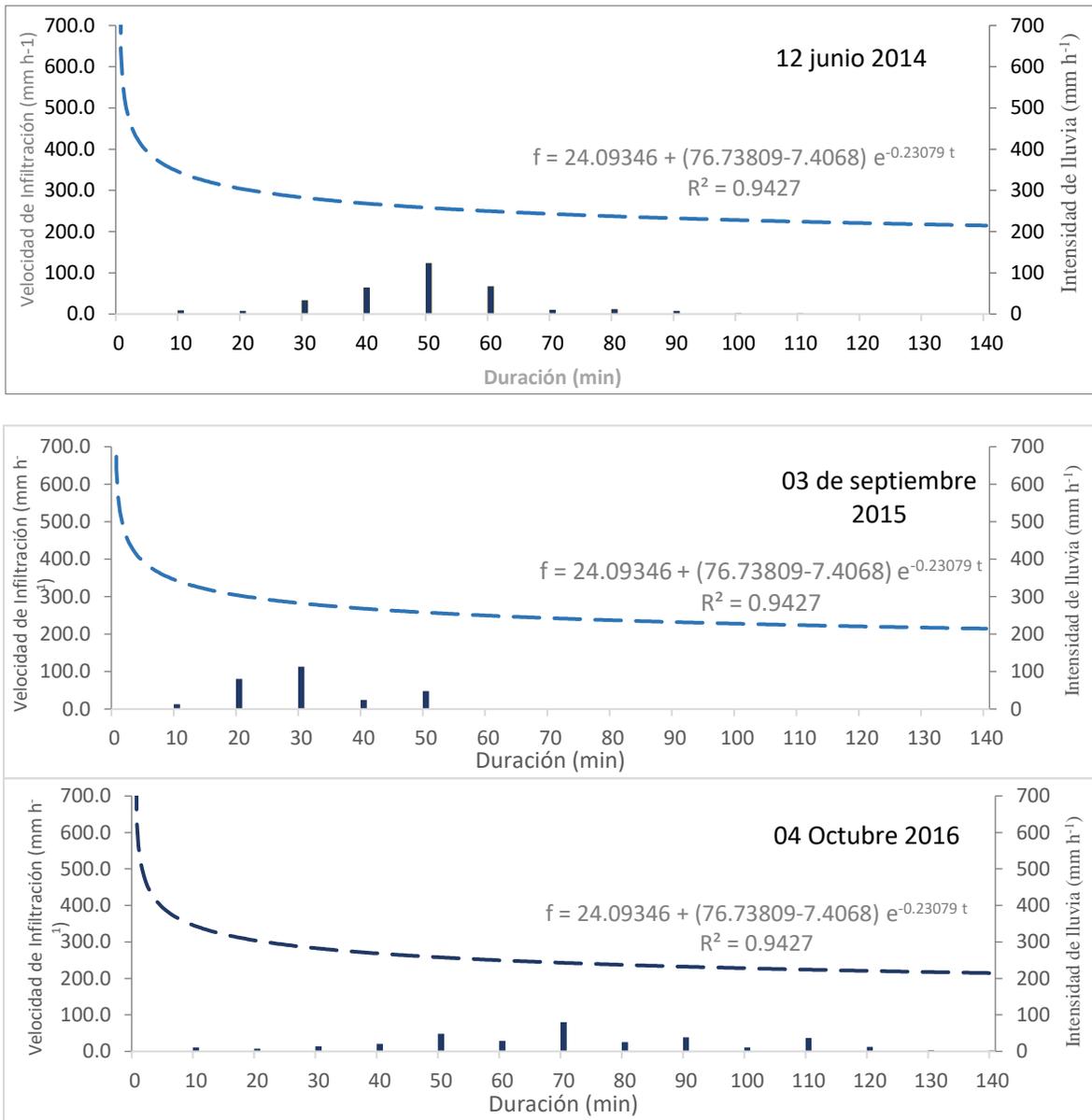
El volumen escurrido por metro lineal varió de acuerdo a la separación entre zanjas, en el evento de 2014 el volumen escurrido varió de 0.05 a 0.13 m<sup>3</sup> metro lineal, mientras que en el evento de 2016 fue de 0.1 – 0.2 m<sup>3</sup> metro lineal (Cuadro 27), estos valores fueron menores que la capacidad de captación real de las zanjas que en promedio para la parcela A fue de 0.28 m<sup>3</sup> metro lineal, incluso menores que el volumen que recomienda la CONFOR (2014) de 0.16 m<sup>3</sup> metro lineal, estos resultados muestran que el espaciamiento entre zanjas puede ampliarse, sin comprometer la capacidad de captación de agua.

Cuadro 27. Variación del volumen escurrido por metro lineal en las zanjas bordo de la parcela A

Espaciamiento entre zanjas (m)	Eventos de lluvia		
	12-jun-14	03-sep-15	04-oct-16
	m <sup>3</sup> metro lineal		
Máximo	15.5	0.13	0.12
Media	11	0.09	0.08
Mínimo	5.9	0.05	0.04

La parcela C no presentó excesos de lluvia en ninguno de los eventos seleccionados, ya que la infiltración básica de los suelos someros fue de más de 200 mm h<sup>-1</sup> que es mayor que las intensidades máximas de 123, 112 y 80 mm h<sup>-1</sup> reportada para los eventos de los años 2014, 2015 y 2016 respectivamente (Figura 42).

Esto indica que, aunque las parcelas están muy cercanas, los excesos de lluvia son muy diferentes en los tres eventos, por la profundidad del suelo. En la parcela A los excesos de lluvia son mucho menores que la capacidad de almacenamiento de las zanjas construidas, para eventos de altas intensidades, por lo que es recomendable aumentar el espaciamiento entre zanjas al doble en las de máximo espaciamiento y al más del triple en las de menor espaciamiento; en la parcela C no se deberían haber construidos las zanjas bordo a menos que las intensidades máximas de las lluvias fueran mayores que la infiltración básica de los suelos.



**Figura 42. Curva de infiltración (Entre Zanjas) parcela C y Hietogramas de los eventos seleccionados.**

Esta información sugiere que para el diseño de las zanjas bordo es recomendable considerar la profundidad y capacidad de infiltración de agua en el suelo, especialmente la infiltración básica, ya que al compararlo con la intensidad máxima de la lluvia para diferentes periodos de retorno (SCT, 2015) se puede definir la necesidad o no de construir zanjas bordo para captar los escurrimientos superficiales y propiciar la infiltración y percolación del agua en el suelo. Este procedimiento permitirá a los técnicos definir los sitios donde se recomiende la construcción de

estas zanjas, tomando en cuenta las lluvias extremas (intensidades máximas para un periodo de retorno de 5 años) y la permeabilidad estimada (Flores, 2012).

## 6.6 Producción de biomasa

Las parcelas de muestreo tuvieron exposición norte y noreste. En el hemisferio norte los terrenos con esta exposición reciben menor cantidad de calor en la superficie del suelo generada por el sol; como consecuencia, los ciclos de humedad y secado en el perfil son más largos, en comparación con terrenos con exposición sur. Por ello, las especies vegetales producen mayor acumulación de materia orgánica humificada (Chu-Chi *et al.*, 2004), por lo que la cantidad de biomasa producida en general se considera buena.

Los datos de biomasa muestreada en las dos fechas fueron normales (*octubre*  $p = 0.0001$  y *abril*  $p = 0.0001$ ) y con homogeneidad de varianza (*octubre*  $p = 0.0001$  y *abril*  $p = 0.0069$ ). Estos resultados permitieron realizar las pruebas de medias Tukey y obtener las diferencias en la producción de biomasa por sitio y por parcela, con un nivel de confianza de 95%.

Las zanjas bordo de la parcela A no mejoraron la producción de biomasa, ya que, la biomasa muestreada en la época de crecimiento máximo no presentó diferencias entre los sitios de entre zanjas, inicio, pie en comparación con la parcela AT; sin embargo, el bordo tuvo en promedio menos biomasa ( $155.65 \text{ g m}^{-2}$ ). Cuando se comparó la cantidad de biomasa que se produjo en el periodo de octubre 2015 a abril 2016, no se encontraron diferencias estadísticas entre el sitio de entre zanja y la parcela testigo, aunque en el sitio pie es donde se encontró mayor cantidad de biomasa ( $34.93 \text{ g m}^{-2}$ ), y en el bordo se encontró similar cantidad de biomasa que en la parcela testigo, con  $27.45 \text{ g m}^{-2}$  y  $27.37 \text{ g m}^{-2}$ , respectivamente (Cuadro 28). En el sistema zanjas bordo de esta parcela tampoco se registró diferencias estadísticas entre sitios.

En el caso de la parcela B, en comparación con la testigo BT, no se encontraron diferencias en la producción de biomasa entre los sitios de muestreo entre zanjas, inicio y pie, tampoco entre el bordo y la parcela testigo, para las dos fechas de muestreo. No obstante, en el sistema de la parcela B se observó que la biomasa que se tuvo en la zanja para las dos fechas ( $191.90$  y  $17.34 \text{ g m}^{-2}$ ) fue menor respecto a los demás sitios; consistente con las recomendaciones de la CONAFOR (2014). Las parcelas B y BT tuvieron mayor cantidad de biomasa en promedio que las parcelas A y AT,

sin embargo, no hubo diferencia estadística (Cuadro 28). Los resultados de la parcela A y B fueron similares a los que encontraron Singh *et al.*, (2013) donde las zanjas bordo, dada su profundidad (45 cm), no tuvieron buenos resultados para producción de pastos o herbáceas.

Cuadro 28. Efecto de las zanjas bordo en la producción de biomasa en las parcelas de muestreo.

Parcela	Sitio	Biomasa (g m <sup>-2</sup> )	
		Octubre 2015	Abril 2016
<b>A</b>	Entre Zanjas	181.45 a	34.45 a
	Inicio	181.85 a	28.55 a
	Zanja	246.80 a	33.08 a
	Bordo	155.65 b	27.45 a
	Pie	183.83 a	34.93 a
<b>AT</b>	Testigo	244.40 a	27.37 a
<b>B</b>	Entre Zanjas	336.88 a	29.28 a
	Inicio	331.89 a	32.98 a
	Zanja	191.90 a	17.34 a
	Bordo	282.29 a	23.87 a
	Pie	355.82 a	25.54 a
<b>BT</b>	Testigo	295.63 a	35.63 a
<b>C</b>	Entre Zanjas	124.99 b	7.61 b
	Inicio	120.84 b	7.46 b
	Zanja	293.43 a	15.01 a
	Bordo	249.23 a	18.90 a
	Pie	115.57 b	8.59 a
<b>BT</b>	Testigo	148.27 b	1.30 b
<i>DMS</i>		196.06	27.35

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). DMS: Diferencia mínima significativa.

La parcela C, en comparación con la biomasa de la parcela testigo, presentó mayor producción en el bordo (249.23 g m<sup>-2</sup>) para la época de máximo crecimiento (octubre 2015), en cambio, entre zanjas, inicio y pie no hubo diferencia. En el sistema zanjas bordo de esta parcela se observó que en el sitio de zanja hubo mayor producción de biomasa (293.43 g m<sup>-2</sup>) que en entre zanjas y que en la parcela testigo. En el periodo de octubre – abril en los sitios de zanja, bordo y pie también se

produjo más biomasa comparado con el testigo, no así, entre zanja e inicio. La cantidad de biomasa en la zanja y el bordo de esta parcela fue estadísticamente igual a la que se produjo en las parcelas A, AT, B y BT, a pesar que dichas parcelas tienen mejores condiciones edáficas (Cuadro 28). En las zanjas bordo someras de la parcela C se encontró evidencia de mayor producción de biomasa que el testigo, similar a lo que encontraron Singh *et al.*, (2013) con las zanjas en V.

Cabe señalar que a pesar de que en la zanja y bordo de la parcela C se tuvo mayor producción de biomasa, la especie que dominó en estos sitios fue el pasto rosado (*Melinis repens* (Willd.)). Este pasto es una especie con alta capacidad de asimilación de CO<sub>2</sub>, rápido incremento del área foliar (Figura 43), que no desarrolla sistema radicular a grandes profundidades y crece mejor en suelos perturbados (Castillo *et al.*, 2014), como ocurre con las zanjas y bordos de esta parcela. Es también una especie invasora en los agostaderos con regular a bajo valor nutritivo y un corto tiempo de palatabilidad para el ganado (Romo *et al.*, 2012), esto compromete la diversidad en el agostadero, ya que en entre zanja se encontraron más de ocho especies de pastos y herbáceas, mientras que en las zanjas y bordos sólo se encontró pasto rosado.



**Figura 43. Cantidad de biomasa por sitio de muestreo, de las parcelas C y CT.**

Fuente: Fotografías de campo

La comparación de la biomasa entre las parcelas con práctica (A, B y C) y las testigos considerando todos los tratamientos no mostró diferencias estadísticas en la producción de biomasa para la época

de máximo crecimiento (octubre 2015). Sin embargo, sí hubo diferencia en la cantidad de biomasa para la segunda fecha de muestreo (abril 2016) entre las parcelas C y CT con las demás parcelas, ya que estas parcelas presentan restricción en la profundidad del suelo (Cuadro 29). Cuando se comparó la producción de biomasa considerando solamente la biomasa en la zanja y el bordo de las parcelas con práctica, en comparación con las parcelas testigo tampoco se observó diferencias para la primera fecha de muestreo, pero en la segunda fecha se obtuvo diferencias entre las parcelas C y CT.

Lo anterior muestra que no hay un efecto claro de las zanjas bordo en la producción de biomasa a nivel de parcela, además que la separación entre zanjas en la parcela C influyó en que la producción de biomasa en el bordo no fuera significativa, ya que, la densidad de zanjas bordo fue bajo.

Los datos de biomasa de las parcelas fueron normales (*octubre*  $p = 0.0022$  y *abril*  $p = 0.0001$ ) y con homogeneidad de varianza (*octubre*  $p = 0.0214$  y *abril*  $p = 0.0024$ ) para las dos fechas y considerando todos los tratamientos. Los datos de biomasa para la comparación de zanjas, bordos y testigo también fueron normales (*octubre*  $p = 0.0092$  y *abril*  $p = 0.0017$ ) y con homogeneidad de varianza (*octubre*  $p = 0.0251$  y *abril*  $p = 0.0409$ ) para las dos fechas.

Cuadro 29. Efecto de las zanjas bordo en la producción de biomasa en las parcelas.

Parcela	Biomasa (todos los tratamientos) (g m <sup>-2</sup> )		Biomasa (zanja, bordo y testigo) (g m <sup>-2</sup> )	
	Octubre 2015	Abril 2016	Octubre 2015	Abril 2016
A	189.92 a	31.69 a	201.23 a	30.26 a
AT	244.40 a	27.37 a	244.40 a	27.37 a
B	301.23 a	25.74 a	237.09 a	20.61 a
BT	295.63 a	35.63 a	295.63 a	35.63 a
C	180.81 a	11.51 b	271.32 a	16.96 a
CT	148.27 a	1.30 b	148.27 a	1.30b
<i>DMS</i>	166.57	23.23	162.87a	21.83

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). *DMS*: Diferencia mínima significativa.

## 7. CONCLUSIONES

Las zanjas bordo cumplen con el objetivo de reducir la longitud del tránsito de escurrimientos, sin embargo, las especificaciones de diseño como dimensiones, pendiente, espaciamiento y capacidad de almacenamiento de agua de las zanjas difieren de las normas, e inciden en un mayor volumen de obra, área de disturbio en su construcción y en menor eficacia para captar los escurrimientos.

El diseño de las zanjas no toma en cuenta las características y profundidad de los suelos, la pendiente de los terrenos y la relación precipitación e infiltración para estimar el exceso de lluvia que se requiere para definir el espaciamiento y dimensiones de las zanjas para captar los escurrimientos.

Las zanjas bordo no tienen efecto en los contenidos de humedad del suelo tanto en la zona de aportación (entre zanja, inicio, y pie) como en las zanjas y bordo en época de secas, a excepción del predio donde se realizó el trazo de las zanjas más cercano al nivel.

El contenido de humedad en las zanjas para la época de lluvias se incrementa en comparación con los sitios del sistema (entre zanjas, inicio y pie), y este es más alto que los del bordo y testigo en suelos profundos (Cambisol), y en suelos someros (Leptosol) el contenido de humedad también se concentra en la zanja.

Las zanjas bordo no tienen efecto en el tamaño de las partículas, en la densidad aparente, ni en el contenido de materia orgánica, a excepción del bordo que tiene menos materia orgánica en comparación con el testigo, y existe un incremento en la capacidad de retención de humedad y humedad aprovechable dentro de la zanja.

La infiltración básica no tuvo efectos en los sitios de muestreo, pero si existen diferencias entre los suelos someros y profundos. El diseño de un sistema de zanjas bordo debe considerar, la pendiente del terreno, la profundidad del suelo, la capacidad de infiltración del agua y la precipitación para determinar si existe exceso de lluvia por retener a fin de dar pertinencia a su establecimiento.

Las zanjas bordo no tienen efecto en la producción de biomasa a nivel de parcela, en suelos profundos y en suelos someros hay mayor biomasa en las zanjas bordo, con dominancia de zacate

rosado (*Melinis repens* (Willd.)) considerada como una especie invasora que se desarrolla en zonas degradadas con un bajo valor nutricional para el ganado.

## 8. RECOMENDACIONES

Las especificaciones de diseño deben considerar las condiciones locales; es necesario que exista un rango de variación en el diseño de este tipo de acciones de conservación en función con su objetivo y las características biofísicas de los sitios de implementación.

Es necesario realizar más investigación para corroborar las características de diseño ideales a condiciones específicas de las tierras, para alcanzar los objetivos de las prácticas y que promueva un manejo adaptativo.

## 9. LITERATURA CITADA

Anschütz, J., Kome, A., Nederlof, M., Neef, R. and T., Ven. 1997. Water harvesting and soil moisture retention. 2da ed, Agrodok. Editado por J. Anschütz y M. Nederlof. Wageningen: Agromisa Foundation.

Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A. and J. G., Arnold. 2008. Representation of agricultural conservation practices with SWAT, Hydrological processes, (22):3042–3055.

Assouline, S., 2013. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. Water Resources Research, 49(4): 1755–1772.

Arvidsson, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density , air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. Soil and Tillage Research, 49:159–170.

Balana, B. B., Muys, B., Haregeweyn, N., Descheemaeker, K., Deckers, J., Poesen, J., Nyssen, J. and E., Mathijs. 2012. Cost-benefit analysis of soil and water conservation measure: The case of exclosures in northern Ethiopia, Forest Policy and Economics. 15: 27–36.

Barrios, C. J. 2010. Evaluación de obras de conservación de suelos en el distrito de Coixtlahuaca (Oaxaca, México) y bases para actuaciones futuras. Tesis, Universidad Politécnica de Madrid. Pp. 183.

- Bartlett, M.S., 1937. Properties of Sufficiency and Statistical Test. En London: Royal Society, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 268–282 pp.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T. and C. García. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147(3–4): 159–171.
- Beven, K.J. and M.J., Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1):43–69.
- Blake, G.R., and K.H., Hartge, 1986. Bulk density. in Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis, part 1, Physical and mineralogical methods*, Am. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, USA, 363–375 pp.
- Blum, W.E., Warkentin, B.P. and F., Frossard. 2006. Soil, human society and the environment. Geological Society, London, Special Publications, 266(1): 1–8.
- Bockheim, J.G. and A.N., Gennadiyev. 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95(1–2): 53–72.
- Bockheim, J. G. and A. N., Gennadiyev. 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95(1–2): 53–72.
- Bockheim, J. G., Gennadiyev, A. N., Hartemink, A. E. and E. C. Brevik. 2014. Soil-forming factors and Soil Taxonomy, *Geoderma*. 226–227(1):231–237.
- Böhner, J., Köthe, R., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A. and T., Selige. 2002. Soil regionalization by means of terrain analysis and process parameterization, in Micheli, E., Nachtergaele, F., y Montanarella, L. (eds.) *Soil Classification 2001*. Luxembourg: European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398, 213–222 pp.
- Böhner, J. and T., Selige. 2006. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization, *SAGA - Analyses and Modelling Applications: Göttinger Aeographische Abhandlungen*, 115:13–28.

- Bouma, J. and A., McBratney. 2013. Framing soils as an actor when dealing with wicked environmental problems. *Geoderma*, 200–201: 130–139.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agronomy Journal*, 54(5): 464.
- Burnell, H. R. y Clawson, M. (2011) *Soil conservation in perspective*. 2nda ed. New York, USA: RFF PRESS. Resources for de Future, Vol. 4, 331 p.
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F. y T. Moramarco. 2012. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites, *Journal of Hydrology*. 454–455:101–112.
- Castillo, A. M., Valladares, M. I. B., Mata-González, R. y C. P., Álvarez. 2014. Biología del pasto rosado *Melinis repens* (Willd.) e implicaciones para su aprovechamiento o control. Revisión, *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 5(4): 429–442.
- Chu-Chi, T., Zueg-Sang, C., & Chang- Fu, H. 2004. Relationships between soil properties and slope position. *Geoderma*, 123: 131-142.
- COLPOS (Colegio de Postgraduados). 1991. *Manual de conservación de suelo y agua*. 3a ed. Editado por G. M. Anaya, M. M. R. Martínez, C. A. Trueba, S. B. Figueroa, y M. O. Fernández. Chapingo, México: SARH.
- COLPOS (Colegio de Postgraduados). 2008. *Evaluación Externa Ejercicio Fiscal 2007 Evaluación Externa Ejercicio Fiscal 2007*. CONAFOR. SEMARNAT. Disponible en: [http://www.era-mx.org/biblio/Evaluacion\\_Colpos\\_Reforestacion\\_2007.pdf](http://www.era-mx.org/biblio/Evaluacion_Colpos_Reforestacion_2007.pdf) (Consultado: 1 de enero de 2017).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014. *Protección, restauración y conservación de suelos forestales, Manual de Obras y Prácticas*. 1ra reimpresión. In. J. N. Bolaños, V. R. Cardoza, C. J. S. García, H. J. A. Guerrero, Q. M. de L. Lira, F. J. L. Nieves, E. F. A. Rodríguez, y S. D. Tejeda. Zapopan, Jalisco, México: SEMARNAT.
- Connolly, R.D., 1998. Modelling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: A review. *Soil and Tillage Research*, 48(1–2):1–19.

- Contreras, H. J., Volke, H. V., Oropeza, M. J., Rodríguez, F. C., Martínez, S. T., y G. A., Martínez. 2005. Reducción del rendimiento de maíz por la erosión del suelo en Yanhuítlán, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 23(3):399–408.
- Cotler, H., Cram, S., Martínez Trinidad, S. y V., Bunge. 2015. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: Caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geográficas*, 2015(88):6–18.
- Cotler, H., Cram, S., Martínez-Trinidad, S. y E. Quintanar. 2013. Forest soil conservation in central Mexico: An interdisciplinary assessment. *Catena*, 104:280–287.
- Critchley, W. and K., Siegert. 1991. Manual of Water harvesting. *Water*, p.154. <http://www.fao.org/docrep/U3160E/u3160e00.HTM> (Consultado: 01/01/2016).
- Cuanalo, D. la C.H., 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo 3a ed., Chapingo, México: Colegio de Postgraduados.
- de Graaff, J., Amsalu, A., Bodnár, F., Kessler, A., Posthumus, H. y A., Tenge. 2008. Factors influencing adoption and continued use of long-term soil and water conservation measures in five developing countries. *Applied Geography*, 28(4): 271–280.
- Dexter, A. R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201–214.
- Dunne, T. and Leopold, L.B., 1978. *Water in Environmental Planning* 1a ed. W. H. Freeman, ed., San Francisco.
- Entekhabi, D., Rodríguez-Iturbe, I. and F., Castelli. 1996. Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes. *Journal of Hydrology*, 184(1–2):3–17.
- FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura), 2008. Panorama mundial de enfoques y tecnologías para la conservación de suelos y aguas (WOCAT): Cuestionario (QT). Editado por H. Liniger, G. Schwilch, M. Gurtner, R. E. Studer, E. Hauert, G. Van Lynden, W. Critchley, and Karl. FAO.

- FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura), 2009. Guía para la descripción de suelos. 4ta ed. Editado por R. R. Vargas. Roma, Italy: FAO. 99 pp.
- FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura), 2015. Base referencial mundial del recurso suelo (WRB) 2014, Sistema internacional de clasificación de suelos P. (IUSS W. G. W. Schad et al., eds., Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Flores, V.J.P., 2012. Diseño de zanjas de infiltración en zonas no aforadas usando sig. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(2):27–39.
- Francesconi, W., Smith, D. R., Flanagan, D. C., Huang, C. H. y X., Wang. 2015. Modeling conservation practices in APEX: From the field to the watershed, *Journal of Great Lakes Research*. 41(3): 760–769.
- Haghighi, F., Gorji, M., Shorafa, M., Sarmadian, F. y M. H., Mohammadi. 2010. Evaluation of some infiltration models and hydraulic parameters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(1): 210–217.
- Hamblin, A. P. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake, *Advances in Agronomy*, 38: 95–158.
- Hengsdijk, H., Meijerink, G.W. and M.E., Mosugu. 2005. Modeling the effect of three soil and water conservation practices in Tigray, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105(1–2):29–40.
- Hillel, D. 1980 a. *Fundamentals of soil physics*. 1st ed. USA: ACADEMIC PRESS, A subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich. 413 pp.
- Hillel, D. 1980 b. *Applications of soil physics*. USA: ACADEMIC PRESS, A subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich. 385 pp.
- Horton, R.E., 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 5(C):399–417.

- INEGI (Instituto de Nacional de Estadística y Geografía), 2006. Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1: 250,000 Serie II (Continuo Nacional), Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto de Nacional de Estadística y Geografía), 2013. Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I. Available at: <http://www.inegi.org.mx/> (Consultado diciembre 15, 2016).
- INEGI (Instituto de Nacional de Estadística y Geografía), 2016a. Archivos RINEX - descarga. Red Geodésica Nacional Activa. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/drgna2.aspx> (Consultado: 03/06/2016).
- INEGI (Instituto de Nacional de Estadística y Geografía), 2016b. Coordenadas ITRF 2008 época 2010.0 - consulta. Red Geodésica Nacional Activa. Available at: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/coordenadas2010.aspx> (Consultado: 03/06/2016).
- ISRIC (World Soil Information), 2002. Procedures for soil analysis 6a ed. L. P. van Reeuwijk, ed., Wageningen: Technical Paper 9, International Soil Reference and Information Centre.
- Jačka, L., Pavlásek, J., Pech, P. y V., Kurá. 2016. Assessment of evaluation methods using in filtration data measured in heterogeneous mountain soils. *Geoderma*, 276: 74–83.
- Karlen, D. L., Ditzler, C. A. y S. S., Andrews. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61:4–10.
- Kato, E., Ringler, C., Yesuf, M. y E., Bryan. 2011. Soil and water conservation technologies: A buffer against production risk in the face of climate change? Insights from the Nile basin in Ethiopia. *Agricultural Economics*, 42(5): 593–604.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods, in Klute, A. ed. *Methods of Soil Analysis*, Part 1. Am. Soc. Agr., Madison, Wisconsin, USA, 635–662 pp.
- König, H. J., Sghaier, M., Schuler, J., Abdeladhim, M., Helming, K., Tonneau, J. P., Ounalli, N., Imbernon, J., Morris, J. and H., Wiggering. 2012. Participatory impact assessment of soil and

- water conservation scenarios in Oum Zessar watershed, Tunisia: *Environmental Management*, 50(1): 153–165.
- Lal, R. 1994. Sustainable Land Use Systems and Soil Resilience. In: Greenland, D.J. and Szabolcs, I., Eds., *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, CAB International Publishers, 41-67.
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development*, 12(6): 519–539.
- Lal, R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4): 437–450.
- Liniger, H., Van Lynden, G., Nachtergaele, F., Schwilch, G. y R., Biancalani. 2008. A questionnaire for mapping land degradation and sustainable land management 2da ed. A. Woodfine, ed., Roma, Italy: FAO.
- Liu, G., Dai, F., Nan, L. and S., Du. 2013. Assessing the suitability of soil and water conservation practices in Southwestern China. *Land Use Policy*, 30(1): 319–327.
- Loredo, O. C., Beltrán, L. S., Sarreón, T. J. L. and M. C., Domínguez. 2005. Prácticas mecánicas para el control de la erosión hídrica. En O. C. Loredo, ed. *Prácticas para la conservación de suelo y agua en zonas áridas y semi-áridas*. México: INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis, Libro técnico núm. 1:75–110.
- Magellan, 2007. Guía básica de utilización, ProMark TM 3 / ProMark3 RTK, Magellan Navigation, Inc.
- Martínez, J., Altieri, M., Fonseca, S. A., Caballero, J. J. y J. J., Hernández. 2006. Manejo del Agua y Restauración Productiva en la Región Indígena Mixteca de Puebla y Oaxaca. 1a ed. M. Noriega, ed., DF México: CEDEC México.
- Martínez, J., Altieri, M., Fonseca, S. A. y Caballero, Juan Julián Hernández, J. J. (2006) Manejo del Agua y Restauración Productiva en la Región Indígena Mixteca de Puebla y Oaxaca. 1a ed. Editado por M. Noriega. DF México: CEDEC México.

- Martínez, R. S., Bautista, S. G., Pedro, S. E. C. y C. P. D., Guerrero. 2014. Crecimiento y contenido de clorofila del maguey mezcalero (*Agave potatorum* zucc.) en policultivo con maíz y frijol. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3): 297–304.
- McBratney, A., Field, D.J. and A., Koch. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213:203–213.
- Mishra, S.K., Tyagi, J. V and V.P., Singh. 2003. Comparison of infiltration models. 2629–2652.
- Oldemann, L.R., 1988. Guidelines for General Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation. *Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD)*.
- Ortiz, S. C. A. (2014) Levantamiento de suelos para dar recomendaciones a nivel parcelario. 1a ed. Montecillos, Texcoco, Edo de Mex.: Programa de Edafología, COLPOS-CONACYT. 11pp.
- Pachas, R. 2009. El levantamiento topográfico: Uso del GPS y estación total, *Academia*, 8(16): 29–45.
- Phillips, J.D., Turkington, A. V. and D.A., Marion. 2008. Weathering and vegetation effects in early stages of soil formation. *Catena*, 72(1):21–28.
- Pizarro, T. R., Flores, V. J. P., Sangüesa, P. C., Martínez, A. E. y G. L., León. 2008. Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secoano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 29(2): 136–145.
- Ponce, V.M., 1989. *Engineering hydrology: Principles and practices*, Prentice Hall.
- Quero, C.A.R., 2015. *Comunicación personal*, Montecillos, Texcoco, Edo de Mex.
- Van Reeuwijk, L.P., 2003. *Procedimiento para análisis de suelos Estado de. C. A. T. Trad. al español por M. C. Gutiérrez Castorena & E. y C. A. O. Solorio., eds., Colegio de Postgraduados. Montecillo.*
- Ramírez, S. A. (2016) *Impacto ambiental de zanjas de infiltración en el parque nacional Izta-Popo (Estado de México)*. Tesis, Facultad de Filosofía y letras, Colegio de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 150 p.

- Richards, L.A., 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66(2): 105–110.
- Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. y O., Wendroth. 2008a. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*, 7(1): 358.
- Robinson, D. A., Binley, A., Crook, N., Day-Lewis, F. D., Ferré, T. P., Grauch, V. J. S., Knight, R., Knoll, M., Lakshmi, V., Miller, R., Nyquist, J., Pellerin, L., Singha, K. and L., Staler. 2008b. Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods, *Hydrological Process*, 22: 3604–3635.
- Romo, A. D., Ancira, E. F., De Luna Jiménez, A., De Jesús Luna Ruiz, J., Hernández, J. T. F. y V. O., Portugal, 2012. Biomasa aérea, cantidad y calidad de semilla de *Melinis repens* (Willd.) Zizka, en Aguascalientes, México, *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 3(1): 33–37.
- Santhi, C., Kannan, N., White, M., Di Luzio, M., Arnold, J. G., Wang, X. (Susan) y J. R. Williams. 2013. An Integrated Modeling Approach for Estimating the Water Quality Benefits of Conservation Practices at the River Basin Scale. *Journal of Environmental Quality*, 43(1): 177–198.
- SAS, 2009. SAS/STAT 9.2 User's Guide The GLM Procedure (Book Excerpt) 2nd ed., Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- SAS, 2013. Base SAS 9.4 Procedures Guide Statistical Procedures 2nd ed., Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- SAS, 2014. SAS/ETS 13.2 User's Guide The MODEL Procedure S. I. Inc., ed., Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Schoenholtz, S.H., Miegroet, H. Van and Burger, J.A., 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138(1–3): 335–356.

- Schwilch, G., Bestelmeyer, B., Bunning, S., Critchley, W., Herrick, J., Kellner, K., Liniger, H. P., Nachtergaele, F., Ritsema, C. J., Schuster, B., Tabo, R., van Lynden, G. and M., Winslow. 2011. Experiences in monitoring and assessment of sustainable land management”, *Land Degradation and Development*, 22(2): 214–225.
- SCT Secretaria de Comunicaciones y Transportes. 2015. Isoyetas de intensidad - duración - periodo de retorno para la república mexicana. <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/> (Consultado: 20 de julio de 2016).
- SEMARNAT-COLPOS. 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, Escala 1:250,000. In: Memoria Nacional 2002, México. 68 pp.
- Singh, G. 2004. Influence of soil moisture and nutrient gradient on growth and biomass production of *Calligonum polygonoides* in Indian desert affected by surface vegetation. *Journal of Arid Environments*, 56(3): 541–558.
- Singh, G., Khan, A. U., Kumar, A., Bala, N. y U. K., Tomar. 2012. Effects of rainwater harvesting and afforestation on soil properties and growth of *Emblica officinalis* while restoring degraded hills in western India. *Environmental Science and Technology*, 6(8): 300–311.
- Singh, G., Mishra, D., Singh, K. y R. Parmar. 2013. Effects of rainwater harvesting on plant growth, soil water dynamics and herbaceous biomass during rehabilitation of degraded hills in Rajasthan, India. *Forest Ecology and Management*, 310: 612–622.
- Soil Survey Staff, 1984. Soil Survey Manual. USDA. Govt. Printing Office, Washington, D. C. 332 pp.
- Soil Survey Staff, 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos 12a ed. S. C. A. Ortiz, C. M. del C. Gutiérrez, y C. E. V. Gutiérrez, eds., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS).
- Spectrum (Spectrum Technologies Inc), 2015. Manual de usuario Modelo 6430FS, Fieldscout TDR 300. Spectrum Technologies, Inc., 52(81), p.15. Available at:

[https://www.kosmos.com.mx/fileadmin/documentos/Manuales/Estaciones/Spectrum/6430FS\\_TDR300.pdf](https://www.kosmos.com.mx/fileadmin/documentos/Manuales/Estaciones/Spectrum/6430FS_TDR300.pdf) (Consultado: 04/02/2016).

- Sisti, C. P. J., Henrique, P., Kohhann, R., Alves, B. J. R., Urquiaga, S. and R. M., Boddey. 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil, 76: 39–58.
- Stocking M. 2009. A global systems approach for healthy soils, *Soils, Society & Global Change: Proceedings of the International Forum Celebrating the Centenary of Conservation and Restoration of Soil and Vegetation in Iceland, 31 August–4 September 2007, Selfoss, Iceland*, EUR, Scientific and Technical Research series.
- Saxton, K. and W. Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions, *Soil Science Society of America Journal*, 70:1569–1578.
- Teshome, A., Rolker, D. and de Graaff, J., 2013. Financial viability of soil and water conservation technologies in northwestern Ethiopian highlands. *Applied Geography*, 37(1): 139–149.
- Ullrich, A. and Volk, M., 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agricultural Water Management*, 96(8): 1207–1217.
- USDA (United States Department of Agriculture) .1999, *Soil quality test kit guide*. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service and Natural Resources Conservation Centre. Section I, Chapter 9, Pp. 20 - 21. Section II, Chapter 8, 72 p.
- Vargas E. y M. Vanegas. 2014. Monitoreo de restauración forestal y reconversión productiva 2014. Ejercicio Fiscal 2014, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México [http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/evaluaciones/documentos-y-alcances-de-las-evaluaciones: 4 abril 2017]
- Vohland, K. and Barry, B., 2009. A review of in situ rainwater harvesting (RWH) practices modifying landscape functions in African drylands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131(3–4): 119–127.

- Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29–38.
- Wang, X., Gassman, P. W., Williams, J. R., Potter, S. y A. R., Kemanian. 2008. Modeling the impacts of soil management practices on runoff, sediment yield, maize productivity, and soil organic carbon using APEX. *Soil and Tillage Research*, 101(1–2): 78–88.
- Warren, A., 2002. Land degradation is contextual. *Land Degradation and Development*, 13(6): 449–459.
- West, L. T., Drees, L. R., Wilding, L. P. y Rabenhorst, M. C. 1988. Differentiation of Pedogenic and Lithogenic Carbonate Forms in Texas, *Geoderma*, 43, pp. 271–287.
- Williams, B. K. y Brown, E. D. 2016. Technical challenges in the application of adaptive management. *Biological Conservation*. 195: 255–263.
- WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza), 2014. Conjunto vectorial de uso de suelo y vegetación escala 1:50,000, Oaxaca, México.
- WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza), 2015. Módulos demostrativos para el monitoreo de los servicios ecosistémicos de la Mixteca Oaxaqueña (convenio OP74), Oaxaca, México.

## 10. ANEXOS

### ANEXO I. Tablas de datos de las prácticas de conservación de suelo y agua de la cuenca Rancho Dolores

Cuadro 30. Zanjas bordo y presas de tierra por predio, superficie y lámina potencial de captación.

PREDIO	SECCION	NÚMERO DE ZANJAS BORDO	SUPERFICIE (ha)	LONGITUD TOTAL (m)	LONGITUD MEDIA (m)	CAP. DE ALMACENAMIENTO PROMEDIO (m3)	CAP. DE ALMACENAMIENTO POTENCIAL (m3 ha <sup>-1</sup> )	LÁMINA POTENCIAL (mm)	PRESAS DE TIERRA
1	A	7	0.4	224.4	32.1	96.2	240.5	24.1	0
1	B	36	2.51	1,030.7	28.6	386.3	153.9	15.4	0
1	C	19	1.57	508.7	26.8	173.2	110.3	11.0	0
1	D	15	0.77	323.5	21.6	104.9	136.2	13.6	1
1	E	57	5.2	2,061.3	36.2	1084.6	208.6	20.9	5
1	F	51	0.52	1,135.3	22.3	486.3	935.2	93.5	3
1	G	45	2.12	954.2	21.2	380.0	179.3	17.9	2
1	H	104	6.73	2,692.8	25.9	1173.0	174.3	17.4	5
1	I	119	6.71	3,295.3	27.7	1455.7	216.9	21.7	13
2	A	25	0.98	685.0	27.4	342.1	349.1	34.9	0
2	B	18	0.8	498.0	27.7	220.6	275.7	27.6	1
2	D	16	0.97	425.0	26.6	251.6	259.4	25.9	1
2	E	30	1.71	1,086.9	36.2	476.0	278.4	27.8	0
2	F	34	1.68	1,050.5	30.9	560.2	333.4	33.3	7
3	A	30	2.85	1,399.9	46.7	846.3	296.9	29.7	4
3	B	36	2.71	1,203.0	33.4	576.0	212.6	21.3	15
3	C	47	7.84	2,428.5	51.7	987.9	126.0	12.6	6
4	A	66	5.81	2,442.0	37.0	1094.3	188.3	18.8	7
4	B	32	2.54	1,111.8	34.7	589.6	232.1	23.2	5
5	A	37	1.65	1,054.8	28.5	340.2	206.2	20.6	2
5	B	9	0.47	229.0	25.4	61.2	130.1	13.0	0
5	C	39	2.84	1,120.0	38.6	497.2	175.1	17.5	1
5	D	75	2.26	2,134.4	31.4	887.4	392.7	39.3	7
5	E	34	1.91	1,048.8	30.8	422.1	221.0	22.1	1
5	F	59	2.79	1,866.3	31.6	814.3	291.9	29.2	4
5	G	13	1.1	594.0	45.7	330.3	300.3	30.0	0
5	H	36	5.5	2,903.2	80.6	1648.8	299.8	30.0	1
5	I	39	2.27	1,697.8	43.5	921.3	405.9	40.6	5
5	J	18	1.35	870.0	48.3	400.4	296.6	29.7	0
6	A	7	0.7	189.8	27.1	52.8	75.4	7.5	0
6	B	15	1.26	632.1	42.1	264.6	210.0	21.0	5
6	D	40	1.85	1,184.3	29.6	839.4	453.7	45.4	7

Cuadro 31. Presas filtrantes de piedra acomodada.

MURO DE PIEDRA	CLAVE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	TIPO DE SECCIÓN	SECCIÓN TRANSVERSAL (m)	CORONA (m)	ALTURA (m)
1	RD_MPA01	17.849056	-97.775494	1738.87	Rectangular	16.20	0.65	0.80
2	RD_MPA02	17.849135	-97.775292	1736.61	Rectangular	17.60	0.80	0.45
3	RD_MPA03	17.849601	-97.775306	1732.35	Semicircular	7.00	0.75	0.90
4	RD_MPA04	17.849510	-97.775259	1732.33	Semicircular	8.00	0.60	1.25
5	RD_MPA05	17.849566	-97.775093	1732.17	Irregular	7.60	1.00	0.80
6	RD_MPA06	17.849198	-97.774883	1734.99	Rectangular	16.40	0.90	0.98
7	RD_MPA07	17.849198	-97.774689	1732.75	Rectangular	12.70	0.90	0.80
8	RD_MPA08	17.849203	-97.774555	1733.70	Irregular	7.10	0.60	0.00
9	RD_MPA09	17.849649	-97.774681	1729.58	Rectangular	8.40	0.90	0.90
10	RD_MPA10	17.848771	-97.774389	1736.62	Irregular	6.50	0.60	0.40
11	RD_MPA11	17.848639	-97.774310	1736.71	Rectangular	6.90	0.70	0.90
12	RD_MPA12	17.848764	-97.774226	1735.15	Irregular	5.60	0.70	0.00
13	RD_MPA13	17.848767	-97.774130	1734.70	Rectangular	5.60	0.80	1.10
14	RD_MPA14	17.848810	-97.774054	1732.52	Triangular	5.20	0.80	0.80
15	RD_MPA15	17.848903	-97.773895	1730.36	Triangular	3.60	0.80	0.75

Cuadro 32. Presas de tierra compactada

PREDIO	SECCION	CLAVE	NO. PRESA	PUNTOS	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)	ALTURA PH (m)	SECCION (m)	CORONA (m)	ALTURA PS (m)
1	D	1D_R1	1	1	17.839111	-97.773722	1777	1.1	3.3	0.8	1.4
1	E	1E_R2	2	2	17.839278	-97.773306	1780	0.3	1.1	0.9	0.4
1	E	1E_R3	3	3	17.839583	-97.773167	1764	1.8	7.7	1.2	3
1	E	1E_R4	4	4	17.840583	-97.772556	1751	1	3.3	1.3	1.5
1	E	1E_R5	5	5	17.840583	-97.7725	1748	0.8	2.4	0.1	0.9
1	E	1E_R6	6	6	17.840694	-97.7725	1738	1.2	3.9	1.4	1.5
1	F	1F_R7	7	7	17.840639	-97.773278	1744	1	4.3	1	1.5
1	F	1F_R8	8	8	17.841583	-97.77225	1745	0.7	1.1	1	1.3
1	F	1F_R9	9	9	17.841694	-97.772139	1731	0.7	2.5	1.3	0.8
1	G	1G_R10	10	10	17.840806	-97.773444	1735	0.9	5.3	2	1.4
1	G	1G_R11	11	11	17.840639	-97.773528	1737	1.4	5.5	2.5	1.68
1	H	1H_R12	12	12	17.84225	-97.769	1731	1.7	5.5	3	2.4
1	H	1H_R13	13	13	17.842722	-97.768833	1726	1.2	5.5	2.5	2
1	H	1H_R14	14	14	17.842472	-97.768889	1731	2.2	5.5	2.5	2
1	H	1H_R15	15	15	17.842111	-97.767639	1734	1.2	3.4	1.7	0.8

PREDIO	SECCION	CLAVE	NO. PRESA	PUNTOS	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)	ALTURA PH (m)	SECCION (m)	CORONA (m)	ALTURA PS (m)
1	H	1H_R16	16	16	17.842722	-97.768472	1730	0.5	1.6	0.8	0.8
1	I	1I_R17	17	17	17.842583	-97.770278	1737	1	3	0.9	1.6
1	I	1I_R18	18	18	17.842528	-97.770472	1732	0.9	3	0.9	1.3
1	I	1I_R19	19	19	17.842722	-97.771111	1716	0.8	4	2.4	2.2
1	I	1I_R20	20	20	17.842861	-97.771194	1716	1.3	4.5	1.8	1.8
1	I	1I_R21	21	21	17.842861	-97.7715	1714	0.5	3.8	1	1.5
1	I	1I_R22	22	22	17.843056	-97.768333	1709	0.5	6	2.9	1.4
1	I	1I_R23	23	23	17.843139	-97.771361	1709	0.6	5	2	1
1	I	1I_R24	24	24	17.841819	-97.770434	1730	1	3	1.4	1.2
1	I	1I_R25	25	25	17.843	-97.770833	1723	1	3.5	1.3	1.5
1	I	1I_R26	26	26	17.843028	-97.770917	1720	0.9	3	1.4	1.5
1	I	1I_R27	27	27	17.843611	-97.770472	1713	1.4	4	1.2	1.2
1	I	1I_R28	28	28	17.842417	-97.769806	1738	1	3.8	1.2	1.1
1	I	1I_R29	29	29	17.844056	-97.769861	1715	1.1	4	1.2	1.2
2	B	2B_R1	1	30	17.843111	-97.767944	1733	0.8	1.2	0.6	0.7
4	B	4B_R2	2	31	17.847528	-97.767917	1728	1.2	2.5	1.2	1.3
4	B	4B_R3	3	32	17.844528	-97.768361	1683	3.5	3	1	4.5
4	B	4B_R4	4	33	17.844556	-97.769167	1701	1.1	3	1	1.2
4	B	4B_R5	5	34	17.844917	-97.769306	1691	1	3.5	1.2	1.6
4	B	4B_R6	6	35	17.845028	-97.769389	1683	0.9	2.5	1	1.35
2	D	2D_R7	7	36	17.845472	-97.769056	1690	2.2	8.5	3.5	1.5
2	F	2F_R8	8	37	17.840361	-97.773778	1703	1	4	1.2	1.4
2	F	2F_R9	9	38	17.840472	-97.773833	1704	1.3	6	2	2
2	F	2F_R10	10	39	17.844917	-97.768528	1705	1.8	5	1.8	1.5
2	F	2F_R11	11	40	17.845111	-97.768778	1706	1.4	5	1.6	1.4
2	F	2F_R12	12	41	17.845222	-97.768556	1696	1.3	6	2	2.7
2	F	2F_R13	13	42	17.845722	-97.768528	1694	1.6	4	1.5	2
2	F	2F_R14	14	43	17.845861	-97.768444	1691	1.2	5	1.5	3
3	A	3A_R1	1	44	17.846278	-97.766111	1705	1.4	1.4	2	2.2
3	A	3A_R2	2	45	17.846667	-97.765917	1699	1.2	5	1.7	2.5
3	A	3A_R3	3	46	17.846722	-97.765889	1698	1.2	5	1.5	1.7
3	A	3A_R4	4	47	17.846056	-97.766889	1702	1.3	5	1.5	1.6
3	B	3B_R5	5	48	17.845389	-97.767167	1704	0.4	0.6	1.1	0.15
3	B	3B_R6	6	49	17.845917	-97.767278	1702	0.4	0.6	1	0.2
3	B	3B_R7	7	50	17.8455	-97.767389	1699	0.4	0.7	1.3	0.3
3	B	3B_R8	8	51	17.845614	-97.767537	1787	0.9	3.5	1.5	1.5
3	B	3B_R9	9	52	17.845753	-97.767676	1784	0.7	3	1.2	1.1
3	B	3B_R10	10	53	17.846173	-97.768067	1784	0.8	4	2	1.2
3	B	3B_R11	11	54	17.846194	-97.767333	1785	0.8	3.8	2.4	0.9
3	B	3B_R12	12	55	17.846194	-97.767694	1688	0.8	6.5	2.5	2.2

PREDIO	SECCION	CLAVE	NO. PRESA	PUNTOS	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)	ALTURA PH (m)	SECCION (m)	CORONA (m)	ALTURA PS (m)
3	B	3B_R13	13	56	17.845837	-97.76776	1693	0.3	2.5	1.5	1
3	B	3B_R14	14	57	17.846003	-97.767815	1692	0.9	3	1.5	0.9
3	B	3B_R15	15	58	17.847	-97.766694	1694	1.7	10	3	3
3	B	3B_R16	16	59	17.847333	-97.767194	1685	0.8	3	2	1.3
3	B	3B_R17	17	60	17.847444	-97.76725	1679	0.8	7	3	1.1
3	B	3B_R18	18	61	17.847333	-97.766861	1685	1.8	8	1.7	2.5
3	B	3B_R19	19	62	17.847472	-97.766972	1680	1.5	6	1.5	1.1
3	C	3C_R20	20	63	17.847416	-97.764875	1670	0.4	0.7	0.4	0.2
3	C	3C_R21	21	64	17.847096	-97.765203	1671	0.4	0.6	0.4	0.2
3	C	3C_R22	22	65	17.847773	-97.764774	1673	0.4	0.7	1	0.3
3	C	3C_R23	23	66	17.848528	-97.764778	1671	1.1	5	2.5	1.3
3	C	3C_R24	24	67	17.848361	-97.764667	1676	1.5	8	2	2.5
3	C	3C_R25	25	68	17.848139	-97.765194	1662	1.3	5	3.3	1.5
4	A	4A_R1	1	69	17.846247	-97.764527	1698	0.9	3	1	1.3
4	A	4A_R2	2	70	17.846694	-97.764111	1683	1.5	5	1.5	1.4
4	A	4A_R3	3	71	17.847205	-97.763726	1698	0.9	6	3	1
4	A	4A_R4	4	72	17.848028	-97.763056	1678	4	13	3	4
4	A	4A_R5	5	73	17.845722	-97.763389	1683	0.6	0.8	0.7	0.1
4	A	4A_R6	6	74	17.845694	-97.763806	1685	0.5	1	0.8	0.2
4	A	4A_R7	7	75	17.846	-97.763972	1689	0.4	0.2	0.7	0.3
5	A	5A_R1	1	76	17.848444	-97.774861	1749	1	7	3	1.5
5	A	5A_R2	2	77	17.848167	-97.774611	1734	1	5	3	1.6
5	C	5C_R3	3	78	17.848139	-97.772417	1759	1.4	4.5	0.5	2.5
5	D	5D_R4	4	79	17.84741	-97.773534	1739	0.7	2	0.5	0.9
5	D	5D_R5	5	80	17.847316	-97.773504	1735	0.7	2	0.5	0.8
5	D	5D_R6	6	81	17.84708	-97.773434	1739	0.7	3	0.5	0.8
5	D	5D_R7	7	82	17.846861	-97.773167	1713	0.9	9	4.5	1
5	D	5D_R8	8	83	17.846722	-97.772972	1711	0.8	4	2	1
5	D	5D_R9	9	84	17.846583	-97.77275	1711	0.9	4	2	1.3
5	D	5D_R10	10	85	17.8465	-97.772667	1703	2.5	6	1	4
5	E	5E_R11	11	86	17.842417	-97.77325	1726	1.2	4	1	1
5	F	5F_R12	12	87	17.843917	-97.774389	1730	2	5	2	3
5	F	5F_R13	13	88	17.843778	-97.774139	1737	3	8	3	4
5	F	5F_R14	14	89	17.843472	-97.773861	1726	3	10	3	4
5	F	5F_R15	15	90	17.843417	-97.773556	1722	1	6	3	3
5	H	5H_R16	16	91	17.845056	-97.770889	1706	1.1	3.5	1.2	1.5
5	I	5I_R17	17	92	17.845056	-97.77325	1737	1.2	4	2	3
5	I	5I_R18	18	93	17.845167	-97.773056	1733	1.4	4.2	3	4
5	I	5I_R19	19	94	17.845889	-97.771833	1706	1	3.9	0.9	2
5	I	5I_R20	20	95	17.846028	-97.771861	1708	1.8	4.6	0.9	1.9

PREDIO	SECCION	CLAVE	NO. PRESA	PUNTOS	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)	ALTURA PH (m)	SECCION (m)	CORONA (m)	ALTURA PS (m)
5	I	5I_R21	21	96	17.845944	-97.772833	1719	1.1	9	1	2.7
6	B	6B_R1	1	97	17.858	-97.761667	1705	1.3	4.2	1.3	2
6	B	6B_R2	2	98	17.858222	-97.761611	1704	1.1	5	1.3	2.5
6	B	6B_R3	3	99	17.857556	-97.761333	1703	0.6	2	1	0.6
6	B	6B_R4	4	100	17.858306	-97.76125	1704	1.4	4	2	1.1
6	B	6B_R5	5	101	17.857306	-97.761306	1696	1.2	3	3	1
6	C	6C_R6	6	102	17.856722	-97.762361	1751	0.3	1	0.6	0.3
6	D	6D_R7	7	103	17.857472	-97.761722	1697	0.5	0.8	1.5	0.3
6	D	6D_R8	8	104	17.856917	-97.761361	1694	0.8	0.7	1	0.2
6	D	6D_R9	9	105	17.856722	-97.761278	1692	0.5	0.6	1.1	0.2
6	D	6D_R10	10	106	17.856583	-97.761278	1689	0.3	0.8	1.3	0.2
6	D	6D_R11	11	107	17.856083	-97.760861	1690	6	4.1	2.1	1
6	D	6D_R12	12	108	17.855944	-97.760861	1688	1.8	5.2	2	2.5
6	D	6D_R13	13	109	17.855806	-97.760833	1684	1.1	4.3	2	1.2