



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**IMPACTO AMBIENTAL DE ZANJAS DE  
INFILTRACIÓN EN EL PARQUE NACIONAL  
IZTA-POPO (ESTADO DE MÉXICO)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN GEOGRAFÍA**

**P R E S E N T A**

**ANDREA RAMÍREZ SANTIAGO**



**ASESORA: DRA. SILKE CRAM  
2016**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es la conclusión de una de las etapas más importantes de mi vida, etapa que no hubiese sido posible sin la enseñanza directa e indirecta de múltiples personas de quienes aprendí tanto en el aula como fuera de ella, por lo cual quiero externar mis agradecimientos.

Agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Colegio de Geografía y al Instituto de Geografía por formarme como un ser humano con conciencia social y ambiental, así como por permitirme conocer lugares y personas que ayudaron a reforzar mi formación como Geógrafa.

A mis Padres para los cuales no tengo palabras que alcancen a agradecer su apoyo incondicional en mis decisiones en la vida, y por todo el amor que me han brindado en todos y cada uno de los días.

A mi hermana Alina persona a quien amo y admiro, por sentar en mí las bases de responsabilidad y superación.

A mis dos personas favoritas en el mundo, mis hermanos Jesús y Alejandro, por ser mi mayor motivación para seguir adelante y para pensar que nada en esta vida es imposible, los amo infinitamente.

A mi mejor amiga Alhelí por hacerme ver que así como los libros, los sueños nos eligen a uno, están dentro de nosotros y que lograrlos depende de nuestra capacidad de luchar día a día por ellos, gracias por alentarme a perseguirlos y a no dejar que se me escapen. Agradezco que pese a la distancia siempre estés conmigo para tranquilizarme, aconsejarme y apoyarme; y también por nuestras metas compartidas, que si bien no tienen el mismo rumbo llegan al mismo punto que es la realización de nuestra vida profesional y personal, supongo que no será fácil, pero sé que siempre estaremos ahí una para la otra.

A mis grandes e incondicionales amigos Emmaline, Marco, Karol y Manuel por ser personas inspiradoras, talentosas y llenas de pasión por la Geografía, también les agradezco por compartir locuras, conocimientos, sueños, risas imparables y ratos de extrema calidez, ustedes fueron son y serán las personas por la que la Universidad será de mis mejores recuerdos. Espero algún día la vida nos una para desarrollar nuestros talentos juntos y si no es así, espero tengan el mayor éxito en sus vidas...mi Lic. Emma agradezco infinitamente que fuera contigo mi primera conversación universitaria.

A mi Tutora y asesora de Tesis Silke Cram por su conocimiento, orientación, su manera de trabajar, su persistencia, su motivación, su apoyo , su confianza , por mostrarme que una persona puede apasionarse con su trabajo y por hacer que despertara en mi ese amor por el medio ambiente, en especial por el suelo.

A la Dra. Helena Cotler, al Dr. Sergio Martínez, a la Mtra. Pilar, a Eunice y a Marco, por ser un grupo que me brindo su compañía, conocimiento, puntos de vista y apoyo en campo, gabinete y laboratorio, aspectos que hicieron posible la realización de esta Tesis.

A mis sinodales el Dr. Lorenzo Vázquez, Mtra. Blanca Gonzales, Lic. Andrés Benítez, Lic. Manuel Vázquez y a la Mtra. Pilar Fernández por su tiempo, orientación, apoyo y corrección de esta Tesis.

Y al personal del Parque Nacional Izta-Popo por permitirme realizar esta investigación, así como por externarme su apoyo y su confianza en el tema.

También quiero dedicar esta tesis a todas las personas que logran ver más allá de su propio confort, y que hacen cosas que por muy pequeñas que parezcan ayudan a la mejora social y ambiental del país.

*“El fin de la ciencia no es abrir la puerta al saber eterno, sino poner límite al error eterno.”*  
*“Creo que en la discusión de los problemas naturales, no deberíamos comenzar con las escrituras, sino con experimentos y demostraciones.”*

**-Galileo Galilei**

*“Así como surgen entre las obras del Hombre escalonadas a través de la Historia alguna superiores e inconfundibles, así como se yerguen poderosamente entre la acumulación del trabajo humano un pensamiento de Confucio, una concepción religiosa Hindú, una teoría de Darwin, una ley de Keppler o de Newton, una creación de Miguel Ángel, así, sobre las convulsiones de la Tierra se levantan incomparables de belleza y de desprecio los grandes Volcanes de México.*

*Joyas de la Corona de América erguidas entre dos océanos —espuma del Planeta— joyas soldadas por el fuego primitivo, unidamente grabadas en la imaginación de las generaciones —sinfonías de piedra y nieve creada por la energía sin nombre— oleaje petrificado de un antiguo mar cósmico —grandeza desesperante y serena— montes augustos —levantados sobre la aspereza de los caminos— impasibles y formidables, iluminan y fertilizan en el reposo de su muerte toda la tierra de Anáhuac.”*

**-Dr. ATL**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1: PERSPECTIVAS TEÓRICO CONCEPTUALES</b>	<b>4</b>
1.1 Impacto Ambiental	4
1.2 Funciones del suelo	5
1.3 Calidad del suelo	7
1.4 Movimiento del agua en el suelo	15
1.5 Conservación de suelos	23
1.6 Zanjas de infiltración	28
<b>CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN AMBIENTAL Y PROGRAMAS DE CONSERVACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL PNIP</b>	<b>35</b>
2.1 Características Geográfico-Ambientales	35
2.2 Ordenamiento ecológico del PNIP	57
2.3 Problemática Ambiental	60
2.4 Coordinación institucional y Programas de conservación en el PNIP	62
<b>CAPÍTULO 3: IMPACTO AMBIENTAL EN SUELOS</b>	<b>66</b>
3.1 Metodología	66
3.2 Resultados	76
3.2.1 Zanjas de infiltración en el PNIP	76
3.2.2 Zanjas de infiltración en el municipio de Amecameca (Terrenos de bienes comunales fuera del PNIP)	82
3.2.3 Evaluación de las zanjas de infiltración en tres sitios	86
3.2.4 Características de los suelos en los sitios de estudio	97
3.2.5 Características de los Características de las Zanjas de Infiltración y sus Bordos	107
3.2.6 Velocidad de Infiltración	114
3.3 Discusión	117
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>121</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>124</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>129</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Importancia de las funciones del suelo en el ecosistema.	7
<b>Cuadro 2.</b> Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo.	14
<b>Cuadro 3.</b> Función y dimensión de los poros del suelo.	19
<b>Cuadro 4.</b> Efecto de la estructura del suelo en el movimiento del aire y el agua.	19
<b>Cuadro 5.</b> Características hídricas, vegetales, y procesos geomorfológicos del PNIP según la altitud.	39
<b>Cuadro 6.</b> Unidades de Suelo presentes en el PNIP, propuestas por Miehlich 1991.	42
<b>Cuadro 7.</b> Altitud de los perfiles en diferente posición en la catena.	45
<b>Cuadro 8.</b> Resumen de las propiedades edafo-ecológicas de la catena en la ladera solana.	46
<b>Cuadro 9.</b> Resumen de las propiedades edafo-ecológicas de la catena en la ladera umbría.	47
<b>Cuadro 10.</b> Uso de suelo y vegetación en el Parque Nacional Izta Popo (CONANP, 2013).	54
<b>Cuadro 11.</b> Actividades y acciones del programa de mantenimiento de servicios ecosistémicos en el PNIP.	64
<b>Cuadro 12.</b> Actividades y acciones del Proyecto Fabrica de Agua en el PNIP (Tomado de CONANP, 2013).	65
<b>Cuadro 13.</b> Diferencias ambientales de los sitios de estudio.	69
<b>Cuadro 14.</b> Indicadores utilizados para evaluar algunos impactos o efectos de las zanjas de infiltración sobre las funciones del suelo.	70
<b>Cuadro 15.</b> Cantidad y tipo de muestras de suelos tomadas para análisis de laboratorio.	71
<b>Cuadro 16.</b> Análisis de laboratorio por tipo de muestra.	73
<b>Cuadro 17.</b> Métodos utilizados en laboratorio.	74
<b>Cuadro 18.</b> Resumen de la implementación de las zanjas de infiltración dentro del PNIP.	78
<b>Cuadro 19.</b> Resumen de las características ambientales de los tres sitios de estudio.	87
<b>Cuadro 20.</b> Resumen de resultados de laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio1: Altzomoni.	99
<b>Cuadro 21.</b> Resumen de resultados de laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio 2: El Paraje.	101
<b>Cuadro 22.</b> Resumen de resultados de laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio 3. Zoquiapan.	103
<b>Cuadro 23.</b> Resultados de Slaketest de los perfiles de suelo (Sitio 1:Altzomoni, 2: El Paraje y 3: Zoquiapan).	103
<b>Cuadro 24.</b> Dimensiones de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio.	107
<b>Cuadro 25.</b> Comparación de las medidas de la zanja (ancho y largo) , la distancia entre zanjas (lateral y frontal) y el número de zanjas por hectárea, entre los tres sitios de estudio y lo establecido por CONAFOR (2007).	109
<b>Cuadro 26.</b> Remoción de suelo por hectárea en los tres sitios de estudio.	109
<b>Cuadro 27.</b> Pérdida de carbono orgánico (Corg) por hectárea en los tres sitios de estudio.	110
<b>Cuadro 28.</b> Dimensiones de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio.	110
<b>Cuadro 29.</b> Superficie de suelo cubierta por el material excavado de la zanja en los tres sitios de estudio.	111
<b>Cuadro 30.</b> Superficie de suelo cubierta por el material excavado de la zanja en los tres sitios de estudio.	112
<b>Cuadro 31.</b> Comparación de la densidad aparente (Da),volumen total de poros (VTP) de los suelos con zanjas de infiltración (bordo A, bordo B y fondo) y los suelo sin zanjas (control), en los tres sitios de estudio.	112
<b>Cuadro 32.</b> Comparación de la humedad actual (Hum), estabilidad de agregados y contenido de carbono orgánico (Corg) medidas en los bordos de las zanjas de infiltración y en el perfil de suelo (horizonte superficial).	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estratigrafía de suelo y modelo hidrológico basado en el relieve y propiedades del suelo.	20
<b>Figura 2.</b> Influencia de la forma y posición de la ladera sobre el flujo del agua en el suelo.	21
<b>Figura 3.</b> Afectación de las propiedades del suelo, composición de la vegetación y microclima por exposición de la ladera.	21
<b>Figura 4.</b> Movimiento del agua en una ladera.	22
<b>Figura 5 .</b> Algunas obras y prácticas de conservación de suelos en México y sus funciones.	27
<b>Figura 6.</b> Zanjas de Infiltración.	28
<b>Figura 7.</b> Dimensiones de una Zanja de Infiltración.	30
<b>Figura 8.</b> Sección transversal de una zanja de infiltración.	30
<b>Figura 9.</b> Diagrama de distribución de zanjas de Infiltración en “Tres Bolillo “.	31
<b>Figura 10.</b> Diagrama de Distribución de zanjas de infiltración en el terreno.	31
<b>Figura 11.</b> Distribución de zanjas de infiltración en una hectárea.	32
<b>Figura 12.</b> Mapa de Localización del Parque Nacional Izta–Popo.	35
<b>Figura 13.</b> Mapa de Tipos de Clima en el Parque Nacional Izta–Popo, de acuerdo a CONABIO.	36
<b>Figura 14.</b> Climograma construido con los datos de las normales climatológicas de la estación climatológica 00015252 Atlautla del periodo 1951-2010.	37
<b>Figura 15.</b> Climograma construido con los datos de las normales climatológicas de la estación climatológica 00015082 Rio Frio del periodo 1951-2010.	38
<b>Figura 16.</b> Esquema de la edad de los depósitos de ceniza de acuerdo a la altitud en los volcanes Iztaccihuatl y Popocatépetl.	40
<b>Figura 17.</b> Principales elevaciones en el Parque Nacional Izta–Popo sobre un MDE y perfil de la Sierra Nevada de norte a Sur.	41
<b>Figura 18.</b> Mapa de los tipos de suelo del parque nacional Izta-Popo, propuesto por Miehlich, 19991.	43
<b>Figura 19.</b> Variación de la capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de agua disponible (dCC), capacidad de campo (CC), pH y conductividad eléctrica (CE) en cada perfil de la ladera solana.	46
<b>Figura 20.</b> Variación de la capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de agua disponible (dCC), capacidad de campo (CC), pH y conductividad eléctrica (CE) en cada perfil de la ladera umbría.	47
<b>Figura 21.</b> Mapa del escurrimiento medio anual en la subcuenca del PNIP, de acuerdo a los datos de CONABIO.	50
<b>Figura 22.</b> Cambios en el área glaciaria del volcán Popocatépetl durante el periodo 1996-2001.	51
<b>Figura 23.</b> Pintura realizada por Gerardo Murillo (Dr. Atl) “ El Popocatépetl desde un avión” (1948).	52
<b>Figura 24.</b> Popocatépetl desde Iztaccihuatl , Postal producida por Hugo Brehme en el año 1930.	53
<b>Figura 25.</b> Fotografía del volcán Popocatépetl, de fondo el volcán Iztaccihuatl.	53
<b>Figura 26.</b> Afectación de la temperatura, humedad y vegetación por exposición de la ladera, (López, 2014).	55
<b>Figura 27.</b> Mapa del uso de suelo y vegetación de acuerdo a Escaramilla (2007) y Franco (2005).	56
<b>Figura 28.</b> Mapa de Zonificación del Parque Nacional Iztaccihuatl –Popocatépetl.	58

<b>Figura 29.</b> Localización de cambio de uso de suelo (en rojo) detectados dentro del Territorio del PNIP, y en su zona de influencia, en el periodo 2000-2007.	61
<b>Figura 30.</b> Esquema del método general que se siguió para llevar a cabo la evaluación sobre el impacto ambiental que las zanjas de infiltración tienen sobre los suelos del PNIP.	66
<b>Figura 31.</b> Agregados y contenedor, utilizados para la medición de la prueba de Slaketest.	71
<b>Figura 32.</b> Medición de las dimensiones de las zanjas de infiltración y de los bordos: a) longitud de la zanja; talud frontal al bordo b) ancho de la zanja; cara lateral de la zanja c) profundidad de la zanja, d) ancho del bordo; talud de bordo y e) largo del bordo.	72
<b>Figura 33.</b> Medición de la distancia entre zanjas: A) distancia lateral, B) distancia frontal.	72
<b>Figura 34.</b> Infiltrómetro de doble anillo utilizado para la prueba de velocidad de infiltración.	73
<b>Figura 35.</b> Mapa de localización de las tres áreas dentro del PNIP en donde diversos corporativos realizaron zanjas de infiltración entre el periodo 2000 al 2014.	79
<b>Figura 36.</b> Mapa de localización de zanjas de infiltración realizadas en Paso de Cortés entre el año 2000 y 2005 por Pronatura, grupo Bimbo y CONAFOR en un área total de 2,225.77 has.	80
<b>Figura 37.</b> Mapa de localización de zanjas de infiltración realizadas en Zoquiapan entre los años 2005 y 2008, por Pronatura y grupo Coca-Cola, en un área total de 1,370.40 has.	81
<b>Figura 38.</b> Mapa de localización de zanjas de infiltración realizadas en Altzomoni entre los años 2002 y 2013 por CONAFOR, TELEVISA y VW, en un área total de 191.60 has.	82
<b>Figura 39.</b> Zanjas de infiltración “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua” en el Parque Nacional Izta Popo, correspondientes a la zona de Altzomoni.	83
<b>Figura 40.</b> Mapa de localización de las zonas (marcadas en rojo) en las que se realizaron zanjas de infiltración en diversos predios de Bienes Comunales de Amecameca.	84
<b>Figura 41.</b> Diferencias en vegetación de los tres sitios de estudio.	87
<b>Figura 42.</b> Vista aérea del sitio de estudio 1: Altzomoni (Google Earth, 2015).	88
<b>Figura 43.</b> Foto panorámica del área con zanjas de infiltración en la ladera alta del cerro Altzomoni (2015).	88
<b>Figura 44.</b> Foto de la ladera alta del sitio de estudio 1: Altzomoni (2015).	89
<b>Figura 45.</b> Panorama de la vegetación dominante y de la aforestación en el sitio 1 “Altzomoni” (2015).	89
<b>Figura 46.</b> Vegetación en la ladera alta del sitio de estudio 1: Altzomoni (2015).	90
<b>Figura 47.</b> Vista aérea del sitio de estudio 2: El Paraje, terrenos de bienes comunales del municipio de Amecameca, Estado de México, (Google Earth, 2015).	91
<b>Figura 48.</b> Fotos de la ladera media del sitio de estudio 2: El paraje (2015).	92
<b>Figura 49.</b> Vegetación en la ladera media del sitio de estudio 2: El paraje (2015).	93
<b>Figura 50.</b> Foto de la ladera media del sitio de estudio 3: Zoquiapan, (2015).	94
<b>Figura 51.</b> Fotos de la vegetación que cubre el suelo en el sitio de estudio 3: Zoquiapan, (2015).	95
<b>Figura 52.</b> Vegetación en la ladera media del sitio de estudio 3: Zoquiapan, (2015).	96
<b>Figura 53.</b> Perfil del suelo en el sitio de estudio 1 Altzomoni, (2015).	97
<b>Figura 54.</b> Perfil de suelo ,(Sitio 2:El Paraje, 2015).	99

<b>Figura 55.</b> Perfil de suelo, (Sitio 3:Zoquiapan, 2015).101	101
<b>Figura 56.</b> Graficas de resultados obtenidos en el laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio1: Altzomoni.104	104
<b>Figura 57.</b> Graficas de resultados obtenidos en el laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio 2: El Paraje.105	105
<b>Figura 58.</b> Graficas de resultados obtenidos en el laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio 3: Zoquiapan.106	106
<b>Figura 59.</b> Dimensiones de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio, (2015).107	107
<b>Figura 60.</b> Azolve de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio, (2015).108	108
<b>Figura 61.</b> La mayoría de los bordos en Altzomoni tenían un árbol en el centro, 2015.111	111
<b>Figura 62.</b> La mayoría de los bordos en El paraje se encontraron dispersos, por lo que no fueron fáciles de distinguir, 2015.111	111
<b>Figura 63.</b> Los bordos del sitio Zoquiapan no se distinguieron a simple vista, por el azolve , 2015.111	111
<b>Figura 64.</b> Comparación de la Densidad aparente (Da) entre el suelo de los Bordos (Bordo A y Bordo B), el Fondo de la zanja de Infiltración (Fondo), y el suelo sin zanjas de infiltración (Control), de los tres sitios de estudio.113	113
<b>Figura 65.</b> Curvas de velocidad de infiltración medidas con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf_Tec) en diferentes puntos de suelo control de la ladera en Altzomoni.114	114
<b>Figura 66.</b> Curvas de velocidad de infiltración medidas con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf_Tec) en diferentes puntos de suelo control de la ladera en El Paraje.115	115
<b>Figura 67.</b> Curvas de velocidad de infiltración medidas con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf_Tec) en diferentes puntos de suelo control de la ladera en Zoquiapan.	116

## INTRODUCCIÓN

Los suelos cumplen con diversas funciones, mantienen la capacidad de retención de agua, regulan los gases de efecto invernadero y alojan una gran biodiversidad, por lo que son esenciales para la sociedad (Blum et al., 2006) el mantenimiento de estas funciones a través de prácticas de conservación, es cada vez más relevante ya que con ellas se busca recuperar y mejorar la calidad de los suelos al tiempo que minimiza el proceso de erosión. Sin embargo, la escasa evaluación de la eficiencia de estas prácticas, ha llevado a implementarlas de manera automática, sin supuestos, ni indicadores que permitan su adaptación a distintas condiciones ambientales (Cotler et al., 2013), por lo que la evaluación de las obras de conservación es el único medio para determinar si éstas logran los resultados esperados.

En México, se han privilegiado las prácticas mecánicas de conservación de suelos desde hace varias décadas (Trueba et al., 1981). En el 2003 se estableció un programa de conservación y restauración de suelos forestales en la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) con énfasis en las prácticas mecánicas (Magaña, 2007; Vargas et al., 2010; Vargas y Vanegas, 2012). En ellas se afirma que la principal práctica realizada por este programa corresponde a las zanjas de infiltración (también conocidas como tinas ciegas o zanjas trinchera), pudiendo abarcar más del 50% del total de las prácticas realizadas.

Como caso particular, la asociación civil Pronatura y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), llevaron a cabo esta obra de conservación como parte del “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua” dentro del PNIP, construyendo las zanjas de infiltración en las laderas inferiores del volcán Iztaccihuatl (CONANP, 2013).

El uso de estas zanjas es diverso ya que algunos estudios refieren que esta práctica es utilizada para reducir la longitud del recorrido de agua (Taboada, 2011); captar el agua que escurre y disminuir los procesos erosivos (Pizarro et al., 2004; Anaya et al., 1991); mejorar la eficiencia del uso de agua de la precipitación (Bulcock y Jewitt, 2013); conservar agua y favorecer la producción de biomasa y la aforestación en ambientes degradados (Singh et al., 2013) y regular el agua de escorrentía en zonas urbanas (EPA, 1999; Bhagu et al., 2012).

El uso diverso que se le da a las zanjas de infiltración ha hecho que se clasifiquen bajo distintas categorías: como una práctica hidrológica-forestal (Pizarro et al., 2004), una práctica mecánica (Loredo et al., 2005) o bien una técnica de cosecha de agua (Water Harvesting), (Oweis et al., 1998; Madan et al., 2014; Singh et al., 2013; Taboada, 2011).

La falta de artículos que mencionen de forma específica si las zanjas de infiltración son una obra para conservar la calidad de suelos , que mencione los objetivos que tiene la práctica en el país, y la falta de estudios que muestren el impacto ambiental, tanto negativo como positivo que estas zanjas ocasionan en el suelo, hacen relevante hacer una evaluación que nos permita conocer los impactos negativos que estas generan , ya que podrían estar perjudicando las funciones del suelo tanto físicas, químicas y biológicas, reguladas en gran medida por la parte más superficial del suelo y por la cobertura vegetal, las cuales son removidas para su construcción.

Este trabajo tiene como objetivo general evaluar el impacto ambiental que ocasionan las zanjas de infiltración sobre las funciones que cumple el suelo en el ecosistema en el PNIP.

De este modo se trabajó en 3 capítulos:

En el capítulo 1 “Perspectivas Teórico Conceptuales” , se describe el marco teórico conceptual, que se derivó del análisis de los conceptos base del trabajo: impacto ambiental ; funciones del suelo; movimiento del agua en el suelo (al ser las zanjas de infiltración utilizadas como captura de agua), calidad del suelo; conservación de suelos; y la descripción de las características de las zanjas de infiltración así como sus objetivos y usos en México.

En el capítulo 2 “Diagnostico ambiental del Parque Nacional Izta –Popo”, se hace una caracterización del área de estudio en base a bibliografía y cartografía existente así como al programa de manejo del PNIP (2013), para determinar las características geográfico- ambientales del PNIP. También se hace una descripción de los problemas ambiental que presenta el PNIP, del ordenamiento ecológico del PNIP, de la presencia y coordinación institucional dentro del PNIP y de los programas de conservación ambiental y proyectos que han incluido a las zanjas de infiltración como una obra de conservación de suelos dentro del PNIP.

Y finalmente en el capítulo 3 “Impacto ambiental en suelos” se desarrolla la metodología para evaluar el impacto ambiental de las zanjas de infiltración en los suelos del PNIP , y se dan a conocer los resultados obtenidos : descripción de los proyectos de zanjas de infiltración realizados (año y distribución espacial) ; características de los sitios de estudio; características físico-químicas de los suelos en los sitios de estudio; características que presentan las zanjas de infiltración y los bordos que forman párate de la construcción de las zanjas de infiltración; comparación de los suelos con y sin zanjas de infiltración; velocidad de infiltración en cada sitio de estudio; y los efectos que las zanjas de infiltración presenta en los suelos.

## **HIPÓTESIS**

Las zanjas de infiltración desarrolladas en el Parque Nacional Izta-Popo están ocasionando un impacto ambiental negativo en el suelo, efecto contrario al que se esperaba con su implementación, debido a la pérdida de sus funciones por la extracción de gran cantidad de suelo para su construcción y a su deposición en la superficie.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar el impacto ambiental de las zanjas de infiltración del Parque Nacional Izta-Popo (PNIP), sobre las funciones que cumple el suelo en el ecosistema.

### **Objetivos Particulares**

- Conocer los objetivos que se persiguieron con la implementación de las zanjas de infiltración en el PNIP.
- Localizar y determinar las características ambientales de los sitios con zanjas de infiltración implementadas en el PNIP.
- Evaluar y comparar la calidad de los suelos con y sin zanjas de infiltración en tres sitios del PNIP.
- Determinar la dimensión, distribución, cantidad y características de las zanjas de infiltración en tres sitios del PNIP.
- Determinar las características de los bordos de las zanjas de infiltración.
- Evaluar la capacidad de infiltración natural que tienen los suelos en tres sitios del PNIP.
- Analizar si las zanjas de infiltración cumplen las funciones para las cuales fueron instaladas.

# CAPÍTULO 1. PERSPECTIVAS TEÓRICO CONCEPTUALES

## 1.1. Impacto Ambiental

Impacto ambiental es la alteración favorable o desfavorable que produce toda actividad humana o ciertas acciones de la misma sobre el medio ambiente o sobre algunos componentes del medio ambiente, ocasionando alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente y afectando negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos, (Rodríguez, 2008;Zúñiga, 2004; LGEEPA, Art.3.,2015).

El termino impacto ambiental no implica negatividad ya que responde a la expresión: causa-efecto-impacto, es decir tiene su origen en una causa (acción natural o humana) que genera una perturbación positiva o negativa a los componentes del ambiente, cuyo impacto se comprende mediante la valoración de la afectación del área de influencia donde se desarrolló la acción, (Zúñiga, 2009; Conesa, 1997).

El impacto ambiental negativo se traduce en la pérdida de valor naturalístico, estético-cultural, paisajístico, de productividad ecológica o en aumento de los perjuicios derivados de la contaminación, erosión o colmatación y demás riesgos ambientales en discordancia con la estructura ecológico-geográfica, el carácter y la personalidad de una zona determinada; el impacto positivo o de regeneración es aquella acción que no causa ninguna alteración desfavorable o algún desequilibrio ecológico, mejorando alguna condición o elemento natural de manera que facilite los procesos naturales en forma espontánea. (Carrillo, 2009; Conesa, 1993).

Existen diferentes tipos de impacto ambiental y en la práctica un mismo impacto puede ser catalogado en diferentes clases o categorías de impacto, entre los diferentes tipos de impacto se encuentran aquellos que se pueden clasificar por: variación de la calidad ambiental; grado de destrucción; extensión; momento en el que se manifiesta; persistencia; capacidad de recuperación; relación causa – efecto; interrelación de acciones; periodicidad; y por la necesidad de aplicación de medidas correctoras, (Conesa,1997).

Debido a la existencia de distintas maneras de clasificar y calificar el impacto ambiental, existen diversos instrumentos y metodologías para su evaluación, basados en estudios de campo y gabinete, encaminados a identificar, predecir, interpretar, valorar, prevenir y comunicar los efectos de una acción (causa) sobre el medio natural, (Rodríguez, 2008;Aguilar, 1994).

Sin embargo para cualquier tipo de evaluación de impacto ambiental se requiere conocer exactamente los componentes involucrados al interior del territorio o área de influencia afectada, es decir se necesita en principio realizar una descripción completa, adecuada y rigurosa del medio ambiente afectado con todos sus componentes e interrelaciones, teniendo en cuenta las actividades preexistentes, así como la delimitación y descripción cartografiada del territorio (Gómez, 2003).

También es necesario el uso de indicadores ambientales que demuestren problemas ambientales específicos, los cuales deben ser seleccionados de modo que evalúen las diferentes funciones ambientales, cuyo cambio sea lo suficientemente sensible y rápido para poder ser medido cuantitativamente por métodos sencillos, o apreciados de manera cualitativa. Así mismo los indicadores deben tener representatividad (el mayor grado de información relacionado con el impacto), relevancia (la mayor y mejor información significativa pertinente con el impacto, en cuanto a magnitud e importancia.), identificación (determinación precisa y fácil del indicador), y ser excluyentes (únicos), (Gao, 2010; López, 2008; Conesa, 1997).

Lo que se busca es una comparación de las condiciones del ambiente afectado con aquellas que son ideales, es decir de un ambiente no perturbado. Una vez conocidos y evaluados los impactos se valoran y jerarquizan para seleccionar las medidas de mitigación y tomar decisiones en relación a sus ventajas y desventajas desde el punto de vista ambiental.

## 1.2. Funciones del suelo

Los suelos son secciones de un continuo más o menos constante en el cual el material de la litosfera es transformado por la acción atmosférica, de la hidrosfera y de los organismos. De las diferencias locales de los factores formadores, resultan suelos distintos con características distintas.

El suelo varía con la profundidad y lateralmente sobre la superficie de la Tierra. Sus propiedades individuales también varían continuamente en el espacio, en diferentes formas, a diferentes escalas y en diferentes regiones.

El suelo funciona como cuerpo natural; como soporte de la flora y fauna; como productor de biomasa y diversidad de especies; como captador, filtro, amortiguador y transformador del agua y del aire; como una fuente de materias primas; y como base para la infraestructura. También en el suelo se llevan a cabo partes esenciales de los ciclos del C, N, P y S, por lo que este cuerpo dinámico, viviente y natural es vital para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y para el equilibrio entre la materia viva y muerta, (Buol *et al.*, 1975, Doran *et al.*, 1994).

Es vital la protección de los suelos no solo por la importancia de sus funciones, sino también porque es un recurso no renovable en tiempo de vida humano, ya que se forma o se regenera en periodos geológicos, es decir la cantidad de suelo que se forma es de algunos milímetros por siglo, dependiendo la velocidad de acción de sus factores formadores: clima (temperatura y precipitación), organismos (vegetación, microorganismos, animales del suelo y hombre), material parental, relieve (geoformas, pendiente, altitud y exposición) y tiempo; a diferencia de su destrucción o remoción que puede contarse en centímetros por año (Barrow, 1991; Jenny, 1980; Barrow, 1991; Jenny, 1980).

Los factores formadores del suelo pueden presentar diferencias locales, resultando en suelos con características distintas y específicas para cada lugar, de esta forma, realizarán diferentes funciones dentro de los ecosistemas de los que forman parte (Barrow, 1991).

Para Doran y Parkin (1994) las funciones ecológicas más importantes que desempeña el suelo son:

1. Hábitat y soporte biológico: el suelo constituye junto con el agua, el aire y la luz solar, el fundamento de la vida en los sistemas ecológicos terrestres, proporciona hábitat biológico para numerosos organismos y microorganismos, además de ser una reserva genética. Es el punto de partida y destino final de la mayor parte de las actividades desarrolladas por los seres humanos, por lo que un descenso en la calidad del suelo contribuye generalmente a un descenso en la biodiversidad.
2. Componente del ciclo natural: el suelo es un protagonista activo en los ciclos químicos de vital importancia en el equilibrio de la naturaleza y en el ciclo del agua el suelo ocupa una posición fundamental, ya que el agua que llega al suelo vía precipitación pasa a través de éste en forma de escorrentía superficial, en forma de flujo subterráneo o indirectamente a través de los fenómenos de evotranspiración o transpiración.
3. Generación de sustancias nutritivas: genera y transporta sustancias nutritivas para las plantas y microorganismos del suelo, las cuales intervienen en los ciclos de carbono, azufre, nitrógeno y fósforo fundamentales para el equilibrio de los ecosistemas, por lo que la intervención humana en el suelo altera estos ciclos biogeoquímicos y da origen a problemas ecológicos de carácter global.
4. Elemento filtrante, amortiguador y de transformación: La propiedad que posee el suelo como filtro y amortiguador de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuye de manera decisiva a proteger las aguas subterráneas y superficiales contra la penetración de agentes nocivos, evitando la transmisión de dichos agentes al ciclo de alimentación: plantas, animales y seres humanos.

El entendimiento de las funciones del suelo constituye un requisito importante para desarrollar habilidades que conlleven al logro de su aprovechamiento sostenido, y a la preservación de la condición saludable del ambiente en el sentido global (López, 2002).

**Cuadro 1.** Importancia de las funciones del suelo en el ecosistema, (Doran y Parkin, 1994; Amold *et al.*, 1990; Lal, 1997; Muckel y Mausbach, 1996).

Tipo de Función	Función	Importancia
<b>Función biológica</b>	Es un cuerpo natural, que brinda soporte a la producción de biomasa y a la biodiversidad (flora y fauna).	Diversidad de especies. Equilibrio de los ecosistemas.
<b>Función atmosférica.</b>	Los suelos contribuyen a la química, humedad y balance de calor de la atmósfera.	Equilibrio térmico.
<b>Función hidrosférica.</b>	Capta el agua mediante mecanismos de filtración, amortiguamiento y transformación. Redistribuye el flujo del agua en su interior.	Regulación de ciclo hidrológico y de los ciclos biogeoquímicos.
<b>Función Litosférica</b>	Transforman la precipitación en infiltración. Protege la litosfera del impacto destructivo de fuerzas exógenas.	
<b>Función Antrópica</b>	Brindar soporte a la estructura socioeconómica, cultural y estética, así como proveer de sostén a la ingeniería. Rinde productos para el consumo animal, vegetal y materias primas.	Extracción de materias primas. Soporta la producción agrícola ganadería y forestal. Base para la infraestructura
<b>Función cultural</b>	Preservar registros arqueológicos, geológicos y astronómicos.	urbana, industrial , vial , áreas de conservación, Registro Histórico del Paisaje.

### 1.3. Calidad del suelo

La calidad del suelo se refiere a la capacidad de un tipo específico de suelo de funcionar dentro de ecosistemas naturales o “artificiales (manejados por el hombre), sustentar la productividad animal y vegetal, mejorar la calidad del aire y del agua y sostener la salud y el hábitat del ser humano (Seybold, 1997), Arshad y Coen (1992) le dieron a este concepto una connotación más agronómica ya que la definieron como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la

producción de cultivos, preservando un ambiente sano, Lal (1998) en cambio, se refiere a la calidad de suelo como la capacidad de éste para desempeñar funciones económicas, ecológicas, culturales y estéticas; también destaca que, similar a la degradación del suelo, su calidad depende de características que le son inherentes (atributos de la estructura, profundidad de enraizamiento, densidad de carga, reserva de nutrientes, biodiversidad del suelo), esta definición se basa en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico.

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos. Así, la calidad es la interpretación de las propiedades del suelo en un tiempo particular y la salud debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia, es decir significa poder llevar a cabo un buen manejo del suelo de manera que éste pueda funcionar óptimamente no sólo ahora sino también en el futuro, así el monitoreo de los cambios en la calidad del suelo nos permite determinar si una serie de prácticas de manejo resultan productivas y sustentables, (Doran y Parkin, 1994; Carter *et al.*, 1997; Romig *et al.*, 1995).

La calidad del suelo y sus parámetros de referencia se pueden ligar al concepto de funcionalidad del ecosistema, ya que integra e interconecta los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo, en una situación determinada, de esta forma se desglosan tres tipos de calidades del suelo: calidad física, calidad química y calidad biológica, siendo cada una de ellas el resultado del conjunto de sus propiedades individuales (Astier - Calderón *et al.*, 2002; USDA-NRSC-SQI, 2001; Lal, 1997; Doran *et al.* 1994).

De acuerdo a Lal (1997) las dos funciones generales de la calidad del suelo son: su capacidad de regulación ambiental y el mantenimiento de su productividad. Como ejemplos de estas dos funciones generales, se incluyen la habilidad de (1) aceptar, tomar, liberar nutrimentos y otros constituyentes químicos, (2) aceptar, tomar y liberar agua a las plantas, a la superficie y recargar los mantos acuíferos, (3) promover y mantener el crecimiento de las raíces, (4) mantener la sustentabilidad del hábitat biótico del suelo y (5) responder al manejo y resistir a la degradación (Larson y Pierce 1991).

Agrupando las funciones anteriores, Nortcliff, (2002) incluye tres principios importantes en la definición de la calidad del suelo:

1. **La productividad del suelo**, que se refiere a la habilidad del mismo para promover la productividad del ecosistema, sin perder o alterar sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

2. **La calidad del ambiente biofísico**, entendida como la capacidad de un suelo para atenuar los contaminantes ambientales, los patógenos, y cualquier posible daño hacia el exterior del sistema, incluyendo también los servicios ecosistémicos que ofrece (reservorio de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, recarga de acuíferos, etc.).

3. **La salud del suelo**, que se refiere a la capacidad de un suelo para producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos

Se hace necesario definir una relación entre calidad de suelo y calidad del agua. Algunos índices pueden ser usados en algunas propiedades relevantes del suelo con efectos directos en la calidad del agua. De importancia entre estas se tiene: 1) erodabilidad que afecta la carga de sedimentos o turbidez, 2) CIC y reserva de nutrientes que afectan la intensidad del lavado (López, 2002).

Con relación a la producción del aire, los suelos tienen un importante papel en la concentración de gases emitidos a la atmósfera, ellos constituyen el mayor almacenamiento terrestre de C (Lal et al., 1995), juegan un papel principal en el ciclo global del C. El suelo juega un papel importante en la regulación de los flujos gaseosos debido a procesos de su propia naturaleza (López, 2002).

La máxima calidad de un suelo es cuando existe un equilibrio dinámico de todos sus componentes en el ambiente, y se alcanza cuando el suelo es capaz de mantener una alta productividad y de causar la mínima distorsión ambiental, alcanzando la vegetación su estado clímax, llamándosele de esta forma: suelo clímax (Gil-Sotres *et al.*, 2005).

Las dificultades en la evaluación de la calidad del suelo y la identificación de propiedades clave que sirvan como indicadores de la función del suelo ha sido un gran problema debido a la multiplicidad de factores biológicos, bioquímicos, físicos y químicos que controlan los procesos biogeoquímicos, a su variación a lo largo del tiempo y del espacio, y a la influencia de la precipitación y la temperatura en la actividad biológica que contribuyen a marcadas fluctuaciones estacionales (NRC, 1993).

### **Evaluación de calidad del suelo**

En general es evaluada midiendo un grupo mínimo de datos de propiedades del suelo para estimar la capacidad del suelo de realizar funciones básicas, los cuales deben considerar una estructura de metas prioritarias e identificar las funciones críticas del suelo, necesarias para lograr esas metas y además seleccionar indicadores que provean información útil para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre la funcionalidad del suelo durante un periodo de tiempo (Gil-Stores *et al.*, 2005).

Doran et al. (1996) opina que la calidad del suelo, así como sus cambios, deben ser determinados justamente en referencia a suelos nativos no degradados, entendiéndose que ocurrirá una degradación del suelo cuando éste tenga una menor calidad que un suelo nativo; es decir, sabremos que existe degradación de un suelo determinado si durante la evaluación de sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) obtenemos variaciones en función de un suelo nativo o suelo control, producto de la actividad antropogénica o de factores ambientales.

Cuantificar la degradación del suelo de manera comparativa con relación a un suelo nativo no degradado o a un suelo control es complicado, dado que en muchas ocasiones este suelo prácticamente ha desaparecido. Sin embargo, cuando este suelo existe, se convierte en una forma directa de determinar y evaluar las variaciones de su calidad, (Doran *et al.*, 1996; Gil-Sotres *et al.*, 2005).

Existen dos formas básicas para evaluar la calidad del suelo (Arshad *et al.*, 2002):

1. Hacer mediciones periódicamente, a lo largo del tiempo, para monitorear cambios o tendencias en la calidad del suelo.
2. Comparar valores medidos con los de una condición del suelo estándar o de referencia.

Empleando las dos formas de evaluar la calidad del suelo, se pueden realizar : comparaciones entre distintos sistemas de manejo para determinar sus respectivos efectos sobre la calidad del suelo; mediciones en un mismo lote a lo largo del tiempo para monitorear las tendencias de la calidad del suelo, determinadas por el uso y manejo del suelo; comparaciones entre áreas con y sin problema dentro de un predio; comparaciones entre valores medidos con condiciones edáficas de referencia o con el ecosistema natural (Arshad *et al.*, 2002).

La calidad de suelo y sus cambios no pueden medirse directamente, pero pueden cuantificarse mediante el uso de indicadores o propiedades clave que brinden un mínimo conjunto de datos, que permitan evaluar la condición del suelo (NRC, 1993) y conlleven a información acerca de los cambios o tendencias de esa condición, es así como surgen los indicadores de suelo (Dumanski *et al.*, 1998).

Un indicador de calidad de suelo se concibe como una herramienta de medición que debe ofrecer información sobre las propiedades de los procesos y las características. Esto se mide para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre el funcionamiento del suelo en un periodo dado (Astier- Calderon *et al.*, 2002). Los indicadores de la calidad del suelo pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, o los procesos que ocurren en él (SQI, 1996).

Las propiedades físicas, químicas y biológicas se pueden usar de forma individual para generar propiedades complejas que puedan indicar la calidad del suelo y su degradación (Gil-Sotres *et al.*, 2005). El uso de propiedades individuales es una forma común de estimar la variación de la calidad del suelo; el uso de índices sencillos es la relación entre dos parámetros medidos. (Gil-Sotres *et al.* 2005); y el uso de índices complejos: son derivados de la combinación de diferentes propiedades o de su deducción con base en procedimientos estadísticos.

Para captar la naturaleza de la calidad, o salud del suelo, deberán ser medidos todos las propiedades. Sin embargo, no todos las propiedades tienen la misma relevancia para todos los suelos, o situaciones. Un grupo mínimo de propiedades del suelo, o indicadores, de cada uno de los tres componentes del suelo son seleccionados sobre la base de su aptitud para indicar la capacidad del suelo para funcionar en usos y climas determinados. El equipo debería ser usado como un instrumento de análisis para detectar la tendencia o dirección general de la calidad del suelo: si los actuales sistemas de manejo están conservando, mejorando o degradando el suelo (USDA, 1999).

Según Hünne Meyer *et al.*, (1997), los indicadores deberían permitir:

1. Analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible;
2. Analizar los posibles impactos antes de una intervención;
3. Monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y
4. Ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

### **Condiciones que deben cumplirlos indicadores de calidad del suelo**

Es necesario una apropiada selección de indicadores de calidad que ofrezcan una rápida respuesta al cambio, clara discriminación entre los sistemas de manejo, mayor sensibilidad al estrés y a la restauración ambiental, y reflejo de la variabilidad espacial y temporal (Gil-Stores *et al.*, 2005). Sin embargo los indicadores que se determinan en un sitio, podrían no ser importantes al ser evaluados en otro sitio, ya que se utilizan comúnmente correspondiendo con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, de acuerdo con ello, los indicadores de calidad del suelo deben cumplir con las siguientes condiciones (Etchevers *et al.*, 2009; NRCS,2004):

- a) ser fáciles de medir en condiciones de campo, basados en información objetiva y fácil de reconocer;
- b) ser sensitivas a los cambios en el suelo, tanto en la degradación como en su recuperación;
- c) ser integradores de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo;
- d) ser preferentemente aplicables a un rango de ecosistemas y condiciones; y
- e) ser sensitivas a variaciones de clima y manejo.

Asimismo, los indicadores de calidad del suelo deben permitir (Etchevers *et al.*, 2009):

a) analizar la situación actual del suelo con respecto a la funcionalidad específica que se evalúa; b) Identificar los puntos críticos respecto de su sustentabilidad; c) prever los impactos de una intervención y minimizarlos; y d) ayudar en la toma de decisiones.

Doran y Parkin (1994) consideran un mínimo conjunto de indicadores para evaluar la calidad del suelo, los cuales son sensibles a cambios en el manejo del suelo y a su degradación, estos incluyen propiedades físicas (textura, densidad aparente y real, capacidad de retención de agua), químicas (pH, conductividad eléctrica, nivel de nutrientes) y biológicas (C y N presente en la biomasa microbiana, N potencialmente mineralizable y respiración del suelo).

Los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación del suelo (Arshad y Coen, 1992). Dependiendo del tipo de funcionalidad que está bajo estudio, las propiedades seleccionadas para medir la calidad del suelo pueden variar (Nortcliff, 2002; Etchevers *et al.* (2009). Se han reunido en cuatro grupos los atributos que pueden ser usados como indicadores de calidad de suelo en indicadores: físicos, químicos, biológicos y cualitativos.

### **Indicadores Físicos**

Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y promover el intercambio óptimo de gases (Etchevers *et al.*, 2008).

Existe una amplia variedad de indicadores físicos de la calidad del suelo, estos varían de acuerdo con las características predominantes del lugar en estudio. Doran y Parkin (1994), seleccionaron como indicadores la textura, profundidad, conductividad hidráulica, densidad aparente y capacidad de retención de agua, Nortcliff (2002), sugirió la textura, porosidad, densidad aparente y profundidad, del suelo. Por otra parte Brady (1990) seleccionó como indicadores físicos a la estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hídrica saturada.

De acuerdo a Lal (1994), la textura y estructura del suelo son las propiedades físicas más importantes de la fase sólida del suelo debido a que en conjunto regulan el transporte y curso del agua de lluvia, la translocación de los nutrimentos, la actividad biológica y diversidad de especies, la dureza y rigidez del medio de crecimiento para las raíces, así como los procesos de respiración en los suelos.

La degradación de las propiedades físicas originan reducción en la permeabilidad, la aireación, un aumento en la pérdida del mantillo del suelo por inundaciones, se favorece el encostramiento impidiendo o limitando la capacidad del suelo para aceptar, retener y transmitir agua, provee de energía a la microbiota y a las plantas mediante la pérdida de nutrimentos (NRC,1993; Oldeman, 1994).

### **Indicadores Químicos**

Entre las propiedades químicas propuestas como indicadores, se señalan aquellas que inciden en la relación suelo-planta como: la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas, entre otros (Etchevers *et al.*, 2009). Propiedades químicas como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) reducen la presencia de cambios drásticos en el pH y la disminución en la disponibilidad de nutrimentos en el suelo (Astier-Calderón *et al.*, 2002).

Doran y Parkin (1994), propusieron como indicadores químicos el contenido de materia orgánica (MO), carbono y nitrógeno orgánico, pH, conductividad eléctrica (CE), y N, P y K, disponibles. Los indicadores que reflejan estándares de fertilidad (pH, MO, N, P y K) son importantes en términos de producción de cultivos. Por su parte Nortcliff (2002), propuso al pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos como el Al y Mn.

### **Indicadores Biológicos**

La importancia de la evaluación de las propiedades biológicas del suelo, se relaciona estrechamente con la descomposición de la materia orgánica derivada de los residuos vegetales y animales, así como del reciclaje de la misma, ya que los subproductos de su acción influyen de forma directa en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Astier-Calderón *et al.*, 2002).

Las propiedades biológicas del suelo son muy dinámicas por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o de mejoría del suelo, Doran y Parkin (1994), seleccionaron como indicadores biológicos al carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana, el nitrógeno potencialmente mineralizable y

la respiración del suelo. Además consideran como indicadores biológicos a la población de lombrices y el rendimiento de los cultivos.

**Cuadro 2.** Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad de suelo (Karlen *et al.*, 1997; Nortcliff, 2002; Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; Seybold *et al.*, 1997).

Indicadores	Función del suelo a determinar
<b>Físicos</b>	
Textura	Retención y transporte de agua y minerales; erosión del suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros.
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces.	Estima la productividad potencial y la erosión, profundidad fisiológica, volumen de enraizamiento, disponibilidad de agua y nutrientes.
Infiltración y densidad aparente	Escurrimiento superficial, lixiviación de nutrientes, eficiencia de uso de agua y erosión, penetración de raíces, espacio poroso, actividad biológica.
Capacidad de agua disponible	Relación con la retención de agua, transporte, y erosión ;Agua disponible para las plantas.
Porosidad y compactación	Retención y transporte de agua y nutrimentos; erosión del suelo.
Estabilidad de agregados	Erosión potencial, infiltración de agua, estructura, respiración y erosión.
<b>Químicos</b>	
Materia Orgánica (N y C total)	Disponibilidad de nutrimentos, fertilidad del suelo, estabilidad de agregados, agregación, estructura, retención de agua, disminución de la erosión y aumento del potencial productivo.
pH	Actividad química y biológica, disponibilidad de nutrientes, límites para el crecimiento de las plantas, actividad microbiana, absorción y movimiento de pesticidas.
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y de las plantas. Limitante para el crecimiento de las plantas y la actividad microbiológica.
Capacidad de intercambio catiónico	Almacén de nutrimentos para las plantas, retención de contaminantes y amortiguación de pH.
<b>Biológicos</b>	
Biomasa microbiana (C y N)	Actividad biológica, reciclado de nutrimentos, potencial catalizador microbiano, degradación de pesticidas y otros tóxicos, disponibilidad de C y N, lixiviación de minerales, mineralización e inmovilización.
Respiración del suelo	Medición de la actividad microbiana, cantidad de C en el suelo.
Riqueza y abundancia de fauna	Relacionado con los procesos de descomposición y mineralización de residuos orgánicos y alerta temprana ante perturbaciones.
<b>De Relieve</b>	
Pendiente	Condiciones permisivas para la presencia de la erosión
Orientación del terreno	Diferencias en parámetros estructurales (biomasa, distribución de frecuencias), y comportamiento hídrico del suelo.
Altitud	Altitud Patrones de distribución de especies vegetales.
Unidad geomorfológica (posición en el relieve)	Forma del flujo del agua a lo largo de la ladera (zonas donadoras-zonas receptoras).

## Indicadores Cualitativos

La evaluación cualitativa es un enfoque alternativo para obtener indicadores de calidad del suelo, dentro de los cuales se pueden considerar las características que puedan revelar posibles cambios en la calidad del suelo (Etchevers *et al.*, 2009). Esta evaluación se basa en atributos visuales que muestran cambios en la calidad del suelo, que reflejen disminuciones en la calidad de los procesos del suelo como son: erosión por escorrentía, tanto difusa como concentrada, la pérdida de los horizontes superficiales, así como un pobre desarrollo de la vegetación, derivado de deficiencias nutrimentales, entre otras (Nortcliff, 2002).

Etchevers *et al.* (2009), proponen como indicadores cualitativos: la formación de costras, la cobertura y vigor de la vegetación, la pendiente, los colores oscuros en el suelo, la profundidad del horizonte superficial, la presencia de rocas en la superficie y la cantidad de raíces expuestas.

La evaluación de la calidad del suelo debe concebirse en un contexto en donde se establezca y especifiquen previamente, las escalas espaciales y temporales, así el seguimiento de la calidad del suelo podrá hacerse de manera comparativa o relativa. Existen dos vías fundamentales: a) comparar la evolución de un mismo sistema a través del tiempo, y b) comparar simultáneamente uno o más sistemas de manejo alternativo o innovador con una referencia (Masera, 1999).

Considerando que los suelos son muy diversos en sus propiedades, y desempeñan funciones con distinta intensidad y con potenciales diferentes la calidad del suelo debe ser evaluada con base en su papel multifuncional (Karlen *et al.*, 1997).

Considerando esto, la calidad del suelo debe evaluarse según sus funciones específicas, entendiendo cada función como el resultado de la interacción de las diversas propiedades del suelo, de modo que los mejores indicadores serán aquellas propiedades que influyan significativamente sobre la capacidad del suelo para proveer cada función, los usos a los cuales se destine este y el ecosistema en el cual se está realizando la evaluación (Astier- Calderón *et al.*, 2002; Doran *et al.*, 1996).

### 1.4. Movimiento del Agua en el Suelo

La comprensión del ciclo hidrológico es esencial para el efectivo manejo del agua de lluvia y el agua del suelo, ya que una vez que el agua caída alcanza la superficie de la tierra puede infiltrarse dentro del suelo, escurrirse por encima de la superficie como flujo de agua superficial, o acumularse en las hojas de las plantas o en charcos de donde se evapora hacia la atmósfera. Una combinación de estos procesos es el caso más común. Sin embargo el manejo del suelo puede afectar significativamente la escorrentía; la evaporación

directa de la superficie del suelo; la cantidad de humedad del suelo disponible para las plantas al alcance de sus raíces, y la profundidad de penetración de las raíces (FAO, 2000a).

La lluvia que se infiltra forma parte del agua del suelo, la cual puede ser usada por las plantas para su transpiración, alguna puede retornar a la atmósfera por evaporación desde la superficie del suelo y otra, si hay suficiente infiltración, puede moverse más allá de la zona radical hacia el agua subterránea (FAO, 2005).

La infiltración del suelo se refiere a la velocidad a la cual el agua de lluvia se mueve dentro del suelo, la cual está influenciada principalmente por la intensidad de lluvia, por lo que si la infiltración es baja comparada con la intensidad de la lluvia, los poros o espacios dentro de la superficie del suelo se saturarán rápidamente con agua resultando en la pérdida de la lluvia bajo la forma de escorrentía. Este fenómeno no está determinado solamente por la cantidad de lluvia, sino también es influenciado por las propiedades químicas y física del suelo como la abundancia, estabilidad y dimensión de los poros en la superficie del suelo, la textura, la profundidad, el contenido de materia orgánica, la actividad biológica y su contenido de agua. Aunque también la excesiva labranza y la pérdida de materia orgánica a menudo resultan en una tasa de infiltración reducida debido a la pérdida de porosidad de la superficie, (FAO, 2000b; FAO, 2005; Shaxson *et al.*, 2001; Stewart, 1985).

En un suelo bien estructurado, el agua de lluvia infiltra a través del suelo seco como un frente de humedad, saturando temporalmente el suelo y desplazando el aire. Esto es acompañado por el rápido drenaje del agua desde los poros más grandes (mayores de 0,05 mm). En suelos pobremente estructurados, el agua de lluvia drenará más lentamente. El drenaje muchas veces continúa por algunas semanas dependiendo de la profundidad del horizonte más bajo y de la continuidad de los poros más grandes en profundidad. (FAO, 1995; FAO, 2002).

Los factores más importantes responsables de las bajas tasas de infiltración de la lluvia son: exposición de los suelos a los impactos de las gotas de lluvia; la compactación del suelo que produce el deterioro de los poros; y la baja permeabilidad del suelo (FAO, 2005).

Cuando las gotas de lluvia caen directamente sobre la superficie del suelo sin ser antes interceptadas por la vegetación u otros materiales en la superficie del suelo, llevan energía que puede desintegrar los agregados del suelo en pequeñas partículas que salpican; estas partículas pueden cerrar los poros de la superficie del suelo y formar capas finas e impermeables de sedimentos en la superficie, conocidas como costras, que dificultan la infiltración de la lluvia. Mientras mayor sea la exposición de los suelos a las gotas de lluvia, o

lo que es lo mismo, cuanto menos cubierto está el suelo por vegetación, residuos de cultivo, capas de cobertura, etc., mayor será el cerrado de los poros de la superficie, la formación de costras, y menor será la infiltración de agua (Shaxson,2001).

La compactación del suelo por máquinas e implementos y por el tráfico de animales y hombres puede destruir o reducir enormemente las dimensiones de los poros del suelo y, por ende, reducir la tasa de infiltración del agua de las lluvias. El grado de afectación que tendrán los poros dependerá de la presión aplicada y del contenido de agua del suelo. A mayor presión y mayor contenido de agua en el suelo, más fácilmente serán comprimidos y destruidos los poros, (FAO, 2000a).

Una vez que el agua ha infiltrado en el suelo, es retenida de dos formas: 1) por acumularse en el suelo debido a la presencia de una capa impermeable debajo de la superficie, la cual impide el drenaje normal; tal acumulación resulta en una saturación del suelo, una condición frecuente llamada inundación, o 2) por capilaridad, la cual es causada por dos fuerzas: la adhesión, que es la atracción de las superficies de las partículas de suelo por las moléculas de agua; y la cohesión: la atracción de las moléculas de agua entre sí (USER manual, 1992).

La capacidad de retención de agua del suelo en un lugar particular depende de la profundidad del suelo, el volumen de los poros o espacios y la proporción de los vacíos que retienen agua contra el empuje de la fuerza de gravedad. En un suelo arenoso hay, por lo general, un volumen total relativamente grande de poros o espacios entre las partículas minerales grandes, pero la mayoría de los poros son tan grandes que el agua de lluvia drena a través de ellos y relativamente poca es retenida dentro del perfil. En suelos arcillosos puede ser esperada la situación opuesta: puede haber una proporción grande de poros o espacios tan pequeños que el agua de percolación puede entrar, parcialmente bajo la acción capilar, el agua no puede drenar y puede solo ser movida por las raíces de las plantas y/o la lenta evaporación dentro de cualquier espacio lleno de aire dentro del suelo. En suelos arcillosos muy compactos, tanto la entrada como la salida del agua pueden ser muy lentas (USER manual, 1992).

El volumen total de agua de lluvia retenida por unidad de volumen del suelo variará de acuerdo no solo con las dimensiones de las partículas de las fracciones de arena/limo/arcilla que constituyen el suelo, sino también con el tamaño de los poros entre las partículas. Los métodos de manejo del suelo afectan la porosidad total y la distribución por dimensiones de los poros en la zona radical (FAO, 2005).

Cuando el agua no es retenida por los suelos, puede movimiento dentro del mismo. Existen dos tipos de movimiento del agua dentro del suelo: movimiento capilar, el cual es lento y es causado por las fuerzas de atracción, conocidas como fuerza de tensión superficial, la cual es ejercida por las partículas de suelo en el agua; este movimiento puede ocurrir en cualquier dirección e incluye el movimiento del agua hacia arriba desde la capa freática (FAO, 2000b). 2); y movimiento como vapor de agua, el cual sucede cuando la concentración de vapor de agua en el suelo cerca de la superficie es más alta que aquella que hay en la atmósfera inmediatamente superior, el ejemplo más importante es la pérdida de vapor de agua por evaporación desde la superficie del suelo. (FAO, 2000b).

La escorrentía ocurre cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la velocidad a la cual la lluvia se infiltra en el suelo. En buena medida es la calidad de la superficie del suelo la que determina cuanta lluvia se infiltró y cuanta se perdió como escorrentía. La escorrentía solo ocurrirá en la tierra con pendiente y donde hay pocos obstáculos transversales que eviten el flujo del agua. En situaciones donde no se pierde agua de escorrentía, puede incluso ocurrir escorrentía dentro del suelo (FAO, 2005).

## **Factores que influyen sobre el contenido de humedad y movimiento del agua del suelo**

### **Clima**

La evaporación desde la superficie del suelo ocurre cuando la concentración de vapor de agua en el suelo cerca de la superficie es mayor que la concentración en la atmósfera inmediatamente superior. Los suelos de textura fina tienen abundantes poros pequeños, y por eso se producirá mayor movimiento capilar de agua hacia la superficie; generalmente ocurre en mayor proporción en los suelos de textura fina que en los de textura gruesa. La evaporación es por lo general mayor en suelos descubiertos que en suelos cubiertos (FAO, 2005).

### **Propiedades del suelo**

El contenido de humedad del suelo varía (además de la influencia del clima) con el tipo, la profundidad y la cantidad de materia orgánica del suelo. Para la óptima captación, percolación, almacenamiento y uso de la humedad del suelo, son importantes que estén presentes tres capacidades físicas: la capacidad de permitir que el agua entre, o sea la infiltración; la capacidad para permitir que el agua se mueva fácilmente a través del perfil, o sea la permeabilidad; y la capacidad para almacenar la humedad adquirida en la zona radical y liberarla a las raíces de la planta, o sea la capacidad de retención del agua (Hamblin, 1985).

Los suelos con vegetación natural generalmente tienen gran porosidad debido a la alta actividad biológica y a la ausencia de interferencias con el hombre. Los espacios de poros en los suelos varían en dimensiones, y tanto la dimensión como la continuidad de los poros tienen una importante influencia en los tipos de actividades que ocurren en los poros. El cuadro 3 muestra las dimensiones de los poros de diferentes medidas junto con su descripción y funciones (Hamblin, 1985).

**Cuadro 3.** Función y dimensión de los poros del suelo (Hamblin, 1985).

Dimensión de Poros (mm diámetro)	Descripción de los poros	Funciones de los poros
< 0,0002	Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar
0,0002-0,05	Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden usar
>0,05	Transmisión	Permiten drenar agua y la entrada de aire
>0,1 a 0,3	Enraizamiento	Permite libre penetración de raíces de plantas
0,5-3,5	Túneles de lombrices	Permiten drenar agua y la entrada de aire
2-50	Hormigueros y canales	Permiten drenar agua y la entrada de aire

El movimiento del aire y el agua es afectado por la estructura del suelo: la conformación geométrica del suelo y la textura del suelo son los materiales que forman el suelo (Hamblin, 1985), (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Efecto de la estructura del suelo en el movimiento del aire y el agua (Hamblin, 1985).

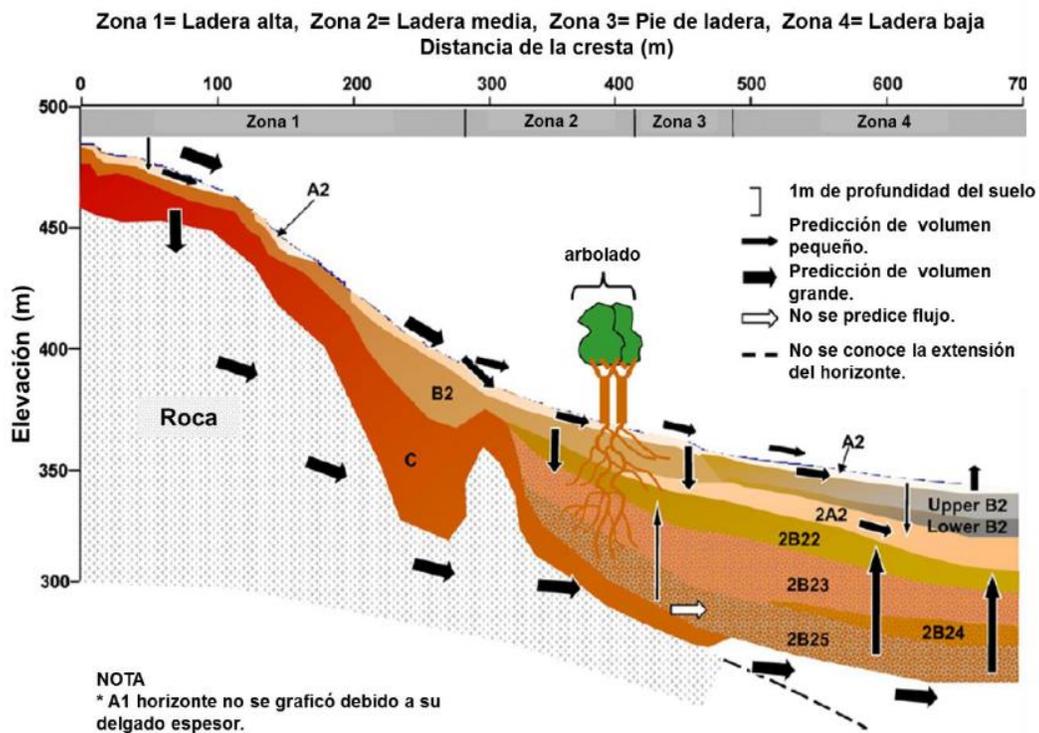
Tipo de estructura	Penetración de agua	Drenaje	Aireación
Columnar	Buena	Bueno	Buena
En bloque	Buena	Moderado	Moderada
Granular	Buena	El mejor	La mejor
Llana	Moderada	Moderado	Moderada

Los espacios o poros son además necesarios para que las raíces penetren libremente en los suelos con el fin de tomar nutrientes y agua. Cuanto más grande sea el volumen explorado por las raíces, más altas son las reservas de humedad a las cuales las plantas tienen acceso y mayor es la «acumulación de humedad que les permita sobrevivir en los períodos de menos lluvia. Si los suelos son muy poco profundos o están físicamente degradados, se reducirá la capacidad de las plantas para sobreponerse a los períodos de poca lluvia (Hamblin, 1985).

## Relieve

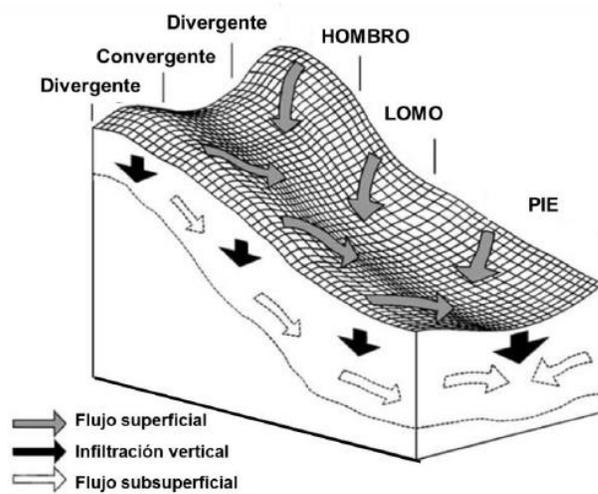
En una ladera el movimiento del agua y el material que transporta responde a las características ambientales del lugar, tales como la geomorfología y pedología (Conacher, 2002).

Los procesos activos en una ladera como lo son el drenaje superficial y subsuperficial, erosión y translocación de materiales, dependen de diferentes elementos: capacidad de infiltración del agua del suelo, la pendiente, la curvatura y la posición en el relieve (Schoeneberg & Wysocki, 2005). La superficie puede ser constructiva erosiva o una combinación de ambas y crear diferentes horizontes a lo largo del perfil del suelo (López, 2014), (Figura 1).



**Figura 1.** Estratigrafía de suelo y modelo hidrológico basado en el relieve y propiedades del suelo (Ticehurst *et al.*, 2007).

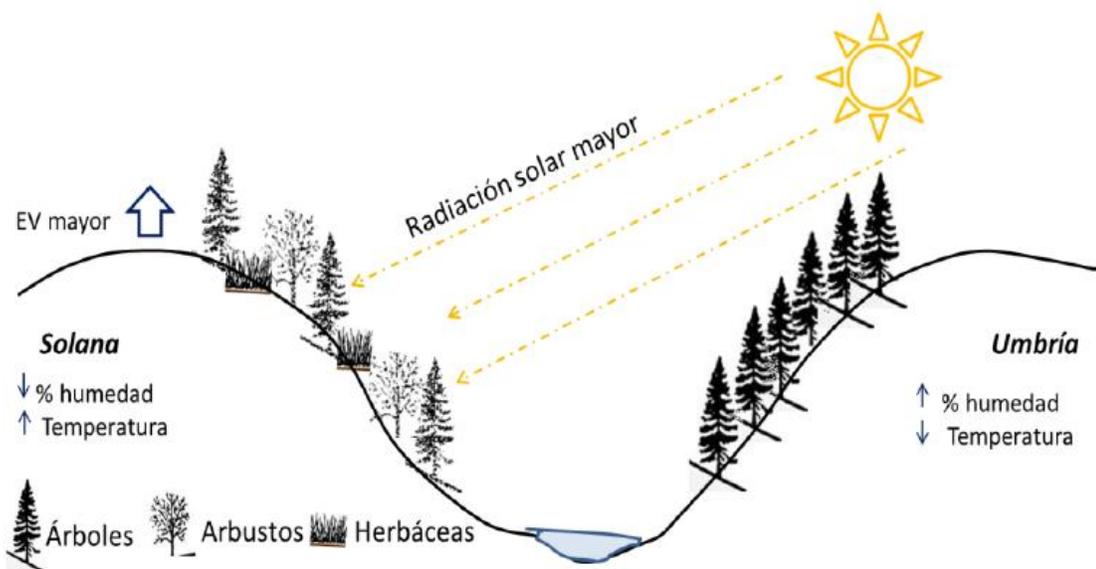
La superficie puede simplificarse mediante la evaluación de una catena, que es una secuencia de perfiles de suelo en un transecto perpendicular desde la parte superior a la base de una colina, los cuales están relacionados por su ubicación en el relieve (López, 2014).



**Figura 2.** Influencia de la forma y posición de la ladera sobre el flujo del agua en el suelo (Schoeneberger & Wysocki, 2005).

### Exposición de la ladera

La exposición de la ladera es un factor potencialmente significativo en generar características diferentes del ecosistema ya que indica la dirección e incidencia del sol, alternando principalmente el contenido de humedad atmosférico y edáfico (Yimer *et al.*, 2006).



**Figura 3.** Afectación de las propiedades del suelo, composición de la vegetación y microclima por exposición de la ladera. EV=evapotranspiración. (Tomado de López, 2014).

En el hemisferio norte los terrenos expuestos hacia el norte (laderas umbrías), la cantidad de calor generada por el sol y recibida por la superficie del suelo son menores; como consecuencia, los ciclos de humedad y secado en el perfil son más largos que en terrenos expuestos hacia el sur (laderas solanas). En concordancia, la composición de especies vegetales en suelos expuestos hacia el norte producen mayor acumulación de materia orgánica humificada que en los suelos expuestos al sur (Chu-Chi *et al.*, 2004), (Figura 3).

### Vegetación

En un ecosistema forestal las precipitaciones son modificadas por las características de la cubierta vegetal; ya que se altera la intensidad, cantidad y distribución de la lluvia, antes de alcanzar el suelo. Este proceso se conoce con el nombre de redistribución de precipitaciones y además, la evapotranspiración de estas comunidades puede ser substancial en el diseño local del flujo de agua (Llorens & Domingo, 2007).

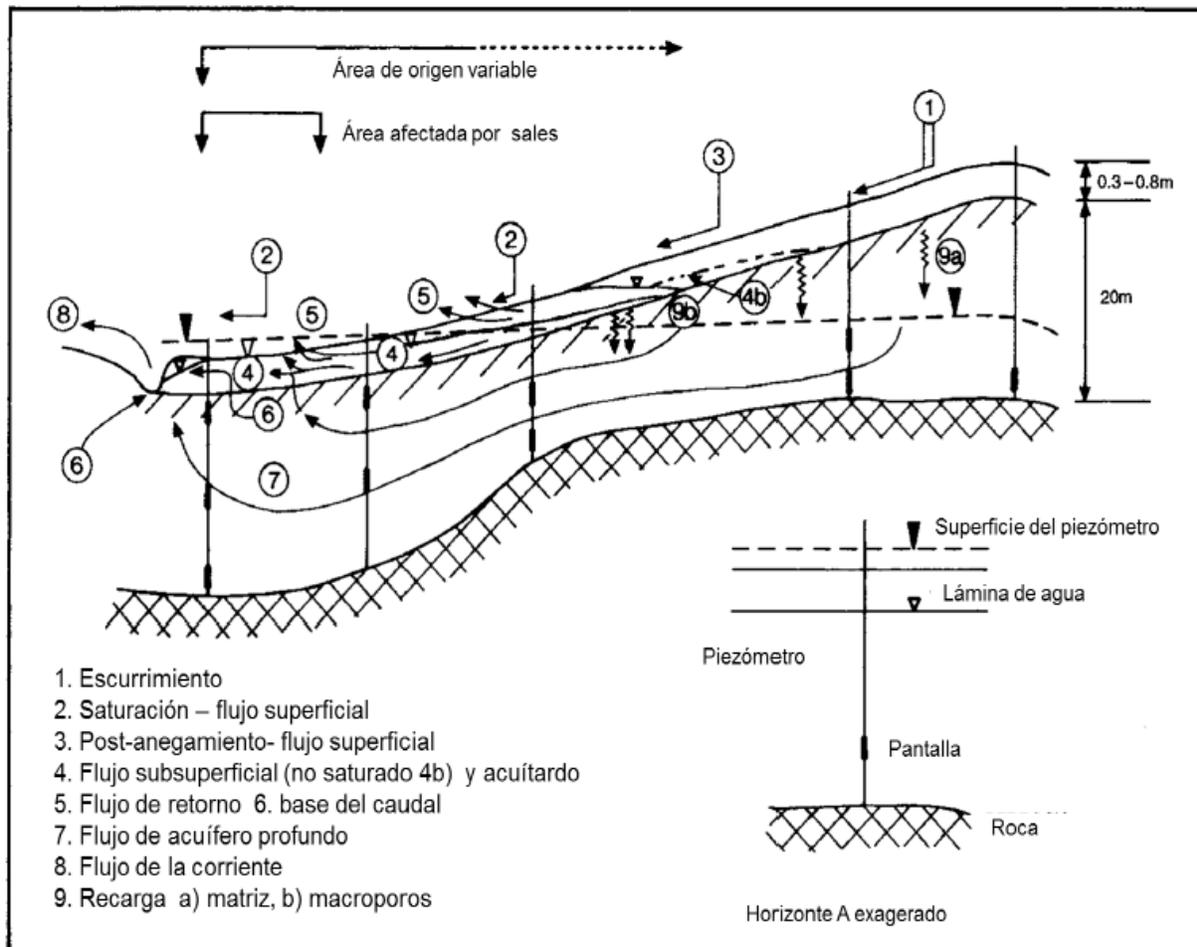


Figura 4. Movimiento del agua en una ladera (Conacher, 2002).

La vegetación puede interceptar el agua de la precipitación, la cual puede evaporarse o alcanzar la superficie del suelo; existen varias vías de recorrido: infiltrar y llegar al agua subterránea, fluir lateralmente o escurrir sobre la superficie (Figura 4), (Chu-Cin *et al.*, 2004).

Por otro lado el origen de nutrientes y recursos (sostén y agua) para la vegetación depende de las propiedades del suelo. Su establecimiento, crecimiento y distribución es heterogéneo, obedece a la posición del relieve y a las características edáficas (Chu-Cin *et al.*, 2004).

La deforestación, el sobrepastoreo y el cultivo sucesivo de una sola especie (monocultivo) son prácticas de manejo que conducen a la reducción del contenido de humedad en el suelo. Estas prácticas provocan la reducción de la porosidad lo que a su vez reduce la infiltración del agua de lluvia y la capacidad del suelo para retener la humedad (Chu-Cin *et al.*, 2004).

## 1.5. Conservación de suelos

La degradación del suelo se define como la pérdida de utilidad actual o potencial, pérdida de cualidades intrínsecas y de funciones del suelo. Cuando los procesos de degradación ocurren sin que el hombre interfiera, generalmente se produce una velocidad de restauración natural. Sin embargo la degradación acelerada del suelo se produce, comúnmente, como resultado de la intervención humana en el ambiente (Stocking y Murghan, 2003; Porta y López-Acebedo, 2005).

Las conservación de suelos se concibe como el conjunto de prácticas aplicadas para promover y preservar la calidad edáfica y productiva natural del suelo, con base en la sustentabilidad, con una visión preventiva enfocada a evitar la degradación o pérdida por contaminación, salinización, erosión, entre otros factores; estas prácticas por lo general son de tipo cultural agronómica o vegetativa, como la reforestación, barreras verdes, cortinas rompevientos, barreras muertas no convencionales y cultivos de cobertura, entre otras (Muller-Sharmann y Restrepo, 1999; Dorant *et al.*, 2000; Betancourt y Pulido, 2006).

Las prácticas conservacionistas de manejo de suelos, aguas y cultivos, en especial las labranzas, deben mantener y/o mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas. Ello permitirá proteger la superficie del suelo del impacto de las gotas de lluvia, aumentar la infiltración de agua en el perfil, mantener un ambiente favorable para la penetración y desarrollo radicular y reducir los volúmenes de escorrentía y erosión (Pérez, 2000).

Los sistemas de producción agropecuarios y forestales inadecuados son, en muchos casos, la causa de la erosión de suelos, mientras que con las prácticas de conservación de suelos se espera lo opuesto. Estas prácticas han sido diseñadas para mejorar la calidad de los suelos y minimizar el proceso de erosión. Sin embargo, su escasa evaluación nos ha llevado a implementarlas de manera automática, sin supuestos, ni indicadores que permitan su adaptación a distintas condiciones socio-ambientales (Cotler *et al*, 2013a).

En nuestro país, la degradación de los suelos ocurre a ritmos que rebasan su proceso de formación. Para crear unos cuantos centímetros de suelo productivo deben pasar varios cientos de años y, por el contrario, solo basta un periodo de lluvias para eliminar los mismos centímetros superficiales de un terreno despojado de su vegetación, lo cual afecta, además, otros sitios de depósito de sedimentos. En México, desde el gobierno federal se han privilegiado las prácticas mecánicas de conservación de suelos desde hace varias décadas (Trueba *et al*, 1981).

Como respuesta, en el año 2003 se estableció un programa de conservación y restauración de suelos forestales que mantiene el énfasis en las prácticas mecánicas, como lo aseveran las últimas evaluaciones externas realizadas a este programa (Magaña, 2007 y Vargas *et al*, 2010). En ellas se afirma que la principal práctica realizada por este programa corresponde a las zanjas de infiltración (también conocidas como tinajas ciegas), pudiendo abarcar más del 50% del total de las prácticas realizadas.

Asimismo, en México existen distintas técnicas para la conservación, restauración y mejoramiento de suelos, producto del conocimiento tradicional. Las prácticas conservacionistas de manejo de suelos, aguas y cultivos, en especial las labranzas, deben mantener y/o mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas. Ello permitirá proteger la superficie del suelo del impacto de las gotas de lluvia, aumentar la infiltración de agua en el perfil, mantener un ambiente favorable para la penetración y desarrollo radicular y reducir los volúmenes de escorrentía y erosión (Pérez, 2000), así la conservación del suelo es la utilización de medidas de protección y mejoramiento de la calidad del suelo.

Según el manual de CONAFOR (2007), para conservar y mejorar el suelo se deben considerar principalmente tres aspectos:

1. Proteger la superficie del suelo: Una cobertura vegetal protege el suelo contra el golpe de las gotas de lluvia y el arrastre del agua de escorrentía, también aumenta la infiltración del agua en el suelo porque, bajo la protección de la cobertura, éste no pierde su buena estructuración por la compactación, para evitar el arrastre del agua es necesario proteger con cobertura vegetal porque facilita la infiltración y mantiene la humedad.

2. Reducir el largo de la pendiente, hay varias prácticas que reducen el largo de la pendiente y con eso la velocidad de la escorrentía. También ayudan a aumentar la penetración del agua en el suelo y reducen así la cantidad de suelo perdido por los procesos erosivos. Con las obras de reducción o corte de la pendiente, el suelo que arrastra la escorrentía se sedimenta y se mantiene en cada estructura construida.
3. Incorporar materia orgánica al suelo. Estas prácticas ayudan considerablemente a mejorar la fertilidad del suelo. La materia orgánica se vuelve humus, que funciona como una esponja, lo que favorece mucho a la infiltración del agua en el suelo y su retención, la disponibilidad de nutrientes y también la disminución en la escorrentía en el suelo.

La conservación de suelos requiere la participación social para lograr una apropiación y réplica con la menor inversión gubernamental. Hoy en día, la participación en la conservación de suelos responde a un interés económico, motivado por los programas de gobierno; sin embargo, en la literatura se mencionan otros tipos de incentivo como el interés y el orgullo de mantener este capital natural para las generaciones futuras (Sheeder y Lynee, 2011; Ervin y Ervin, 1982; Cotler *et al*, 2013a).

El impacto de las prácticas de conservación de suelos son visibles a mediano y largo plazo, por ello en su planeación debe considerarse la variabilidad climática. Así, la elección actual de las prácticas debe considerar cambios de precipitación, incremento de temperatura, incremento de intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos y sus posibles repercusiones en el sistema ecológico (Ackerman *et al*, 2012).

Existen principios generales que se deben considerar como lineamientos básicos para desarrollar obras de conservación de suelo y agua (CONAFOR, 2007):

- Aumentar la cubierta vegetal de los suelos
- Reduce la erosión hídrica y eólica.
- Aumenta la infiltración de la lluvia.
- Reducir los escurrimientos
- Reduce la pérdida de humedad por evaporación.
- Mantener la temperatura.
- Mejora las condiciones de germinación.
- Mejora la estabilidad estructural de los suelos.
- Estimula la actividad biológica del suelo.
- Aumenta la porosidad.
- Favorece el control biológico de las plagas y reducir el enmalezamiento.

Entre los mecanismos para aumentar la infiltración y la retención de humedad en los suelos están (CONAFOR, 2007):

- Mantener una cubierta protectora de residuos orgánicos sobre el suelo para evitar la formación de costras superficiales que impidan la infiltración.
- Aplicar abonos orgánicos para incrementar la capacidad de retención de humedad del suelo.
- Disminuir la pendiente del terreno para dar más tiempo para la infiltración de la lluvia. La construcción de melgas, terrazas y bancos reducen el grado de inclinación del terreno y se facilita la infiltración.
- Reducir los escurrimientos, la pérdida de suelo, agua y nutrientes.
- Aumentar el agua disponible para el cultivo.
- Mejorar el desarrollo y crecimiento de las raíces.

La conservación de suelos es un sistema que complementa y combina obras estructurales, medidas agronómicas, de fertilidad y agroforestales. Este sistema debe aplicarse de la forma más completa posible, si se desea tener éxito tanto en la protección del suelo como en la productividad. Tomando en cuenta esta combinación se puede, al mismo tiempo, lograr los siguientes objetivos (CONAFOR, 2009):

- Controlar la erosión evitando que la corriente arrastre suelo: las prácticas de conservación de suelos están orientadas a frenar la velocidad del paso de agua por sobre el suelo (escorrentía).
- Aprovechar mejor el agua: aumentar la infiltración del agua. Fuera del suelo se pierde toda el agua de la escorrentía que no logra infiltrarse, esta agua no puede ser aprovechada por los cultivos, las obras de manejo de suelo y agua permiten el almacenamiento y/o el aprovechamiento del recurso hídrico, dando un uso sostenible al suelo.
- Mejorar la fertilidad de los suelos y prevenir con más eficiencia las plagas y enfermedades. La conservación de suelos, además de contemplar la construcción de obras físicas para el manejo del mismo, consiste también en la aplicación de medidas que ayuden a mejorar la fertilidad del suelo con el propósito de evitar las pérdidas de suelo por erosión y mejorar el rendimiento de los cultivos.

Obras para el control de la erosión laminar y captación del agua	Prácticas vegetativas	Obras para el control de la erosión en cárcavas
 Terrazas de formación sucesiva	 Cortinas rompevientos	 Presas de mallas de alambre
 Zanja de infiltración	 Enriquecimiento de acahuales	 Presa de morillos
 Acomodo de material vegetal muerto	 Sistemas agroforestales	 Presa de ramas
 Barreras de piedra en curva a nivel	 Terraza de muro vivo	 Presa de piedra acomodada
 Roturación	 Barreras vivas	 Presas de geocostales
 Bordos en curva de nivel	 Barreras vivas, modalidad propagacion vegetativa	 Presa de llantas

**Figura 5.** Algunas obras y prácticas de conservación de suelos en México y sus funciones (CONAFOR,2009).

## 1.6. Zanjas de Infiltración

Son excavaciones de sección rectangular de 0.40 metro de ancho por 0.40 metros de profundidad y 2 metros de longitud, en promedio, trazadas a “tres bolillos” y separadas con un tabique divisor de 2 metros de largo, también se les denomina zanjas trinchera o tinas ciegas (Figura 6), (CONAFOR, 2007), se construyen transversalmente a la máxima pendiente del terreno, siguiendo las curvas de nivel, con el propósito de reducir la longitud del recorrido de agua (Taboada, 2011); captar el agua que escurre, disminuir los procesos erosivos (Pizarro *et al*, 2004; Anaya *et al*, 1991); mejorar la eficiencia del uso de agua de la precipitación (Bulcock y Jewitt, 2013); conservar agua y favorecer la producción de biomasa y la aforestación en ambientes degradados (Singh *et al*, 2013); regular agua de escorrentía en zonas urbanas (EPA, 1999; Bhagu *et al*, 2012), y en algunos casos, sin evidencia científica, para la recarga de agua subterránea, a pesar de los posibles impactos negativos a escala cuenca (Glendenning *et al*, 2012).

Las zanjas se clasifican bajo distintas categorías: como una práctica hidrológica-forestal (Pizarro *et al*, 2004), una práctica mecánica (Loredo *et al*, 2005) o bien una técnica de cosecha de agua (*water harvesting*) (Oweis *et al*, 1998; Madan *et al*, 2014; Singh *et a*, 2013; Taboada, 2011).



**Figura 6.** Zanjas de Infiltración (CONAFOR, 2007).

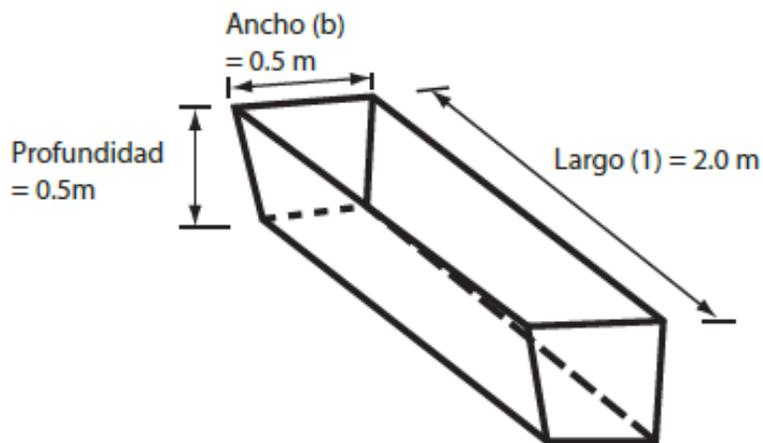
Las zanjas tienen como objetivo principal la recarga de mantos acuíferos para mantener la humedad en el suelo y fomentar el desarrollo de la vegetación natural, reducir la velocidad del escurrimiento superficial, así como utilizar las líneas de tinas como brechas cortafuego (SAGARPA, 2009). Durante muchos años se han construido como medida para conservar los suelos por los campesinos.

Como objetivos particulares están : control de la erosión hídrica para evitar riesgos de erosión severa que produzcan mayores pérdidas de suelo y arrastre a las partes bajas de la cuenca; control de los escurrimientos en forma ordenada disminuyendo el riesgo de avenidas que generen inundaciones con las consiguientes pérdidas económicas; almacenamiento de agua para la recarga que permita aportar cantidad y calidad a los mantos acuíferos; favorecer la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo para el uso de las plantas o de los cultivos forestales; prevenir las avenidas torrenciales o movimientos en masa del suelo; y controlar la erosión en laderas con cobertura vegetal deteriorada que requieren repoblación (SAGARPA, 2009).

Debe señalarse , que un sistema de zanjas de infiltración por sí solo, no controla totalmente el fenómeno erosivo, además, es necesario revegetar con pastos, o forestar los espacios intermedios entre zanjas, o adoptar otras prácticas conservacionistas como la aradura, el subsolado y la siembra en contorno (Carlson, 1990).

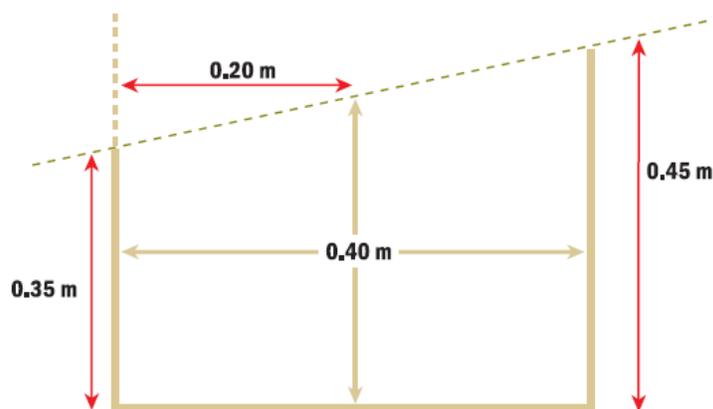
El diseño de la zanja de infiltración consiste en determinar el ancho del borde superior, ancho de la base, profundidad, inclinación de los taludes, espaciamiento entre zanjas y la gradiente longitudinal de la misma, este último aspecto sólo cuando fuese necesario.

1. Las Zanjas de infiltración se construyen a curva de nivel previamente trazada (CONAFOR, 2007)
2. El ancho del borde superior, profundidad, ancho de la base y la inclinación del talud, características que determinan la sección transversal, dependen principalmente del tipo de suelo y de la intensidad de la lluvia de la zona. En el caso de laderas, el ancho promedio del borde superior normalmente es de 40 – 50 cm. El ancho de la base es de aproximadamente 20 – 30 cm y la profundidad varía entre 20 – 50 cm. (SAGARPA, 2009) , (Figura 7).
3. En terrenos inclinados, se debe medir los 40 centímetros de profundidad a la mitad del ancho de las zanjas de infiltración, es decir, a 20 centímetros (CONAFOR, 2007) (Figura 8).

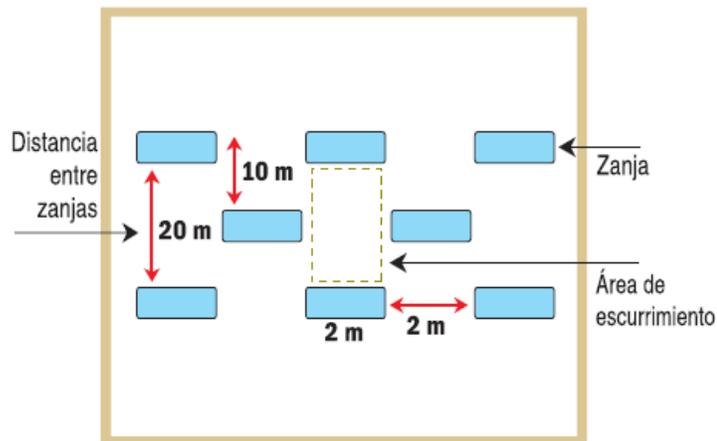


**Figura 7.** Dimensiones de una Zanja de Infiltración (SAGARPA, 2009).

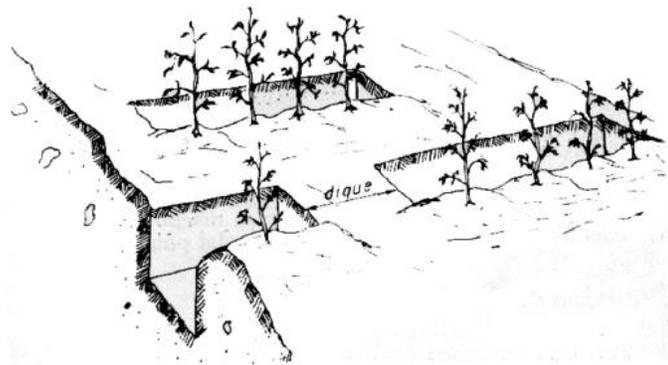
- En cuanto a la gradiente longitudinal de la zanja, normalmente debe ser cero (0%), salvo condiciones especiales de suelo y precipitación, casos en los que se puede optar por una gradiente máxima hasta tres por mil, en estas condiciones la zanja debe desembocar en una zona protegida o totalmente estabilizada.
- Cuando la zanja está a nivel debe construirse a lo largo de la curva de nivel con pequeños tabiques de tierra (o dejarse pequeños espacios sin excavar), a fin de impedir que el agua corra de un lado a otro, distribuyendo de este modo uniformemente el agua captada (SAGARPA, 2009).
- El espacio que se deja entre hileras de zanjas representa el área de escurrimiento superficial aguas arriba de las zanjas (CONAFOR, 2007) (Figura 9 y 10).



**Figura 8.** Sección transversal de una zanja de infiltración (CONAFOR, 2007).



**Figura 9.** Diagrama de distribución de zanjas de Infiltración en “Tres Bolillo “ (CONAFOR, 2007).

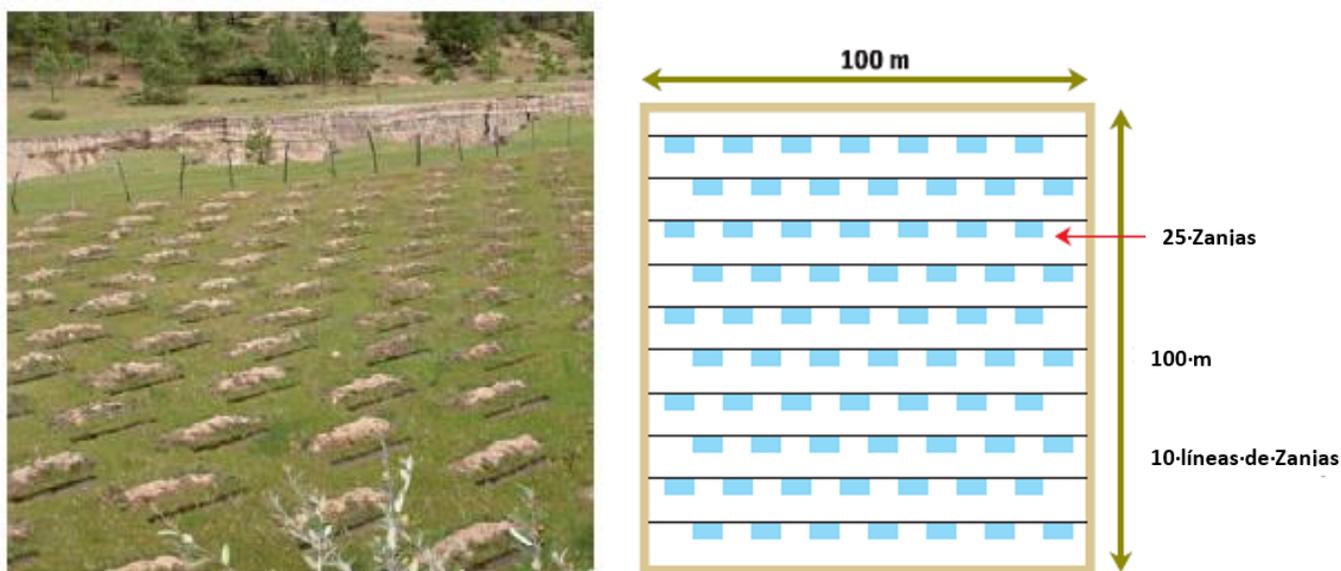


**Figura 10.** Diagrama de Distribución de zanjas de infiltración en el terreno (SAGARPA, 2009).

El suelo excavado se deposita aguas abajo, formando un bordo de una longitud igual a la de la zanja, y se debe compactar para evitar que la corriente arrastre el suelo (CONAFOR, 2007).

### Cantidad de tinas

- Si se considera una separación de 2 metros entre zanja y zanja en una misma curva de nivel, y cada una mide 2 metros de largo, entonces en 100 metros lineales se pueden construir 25 zanjas con dimensiones de 2.0 \* 0.4\*0.4 metros. La distancia entre hileras es de 20 metros y entre hileras alternas es de 10 metros; por lo tanto se construyen en promedio 250 zanjas por hectárea, que equivalen a 500 metros lineales, distribuidos cada 10 metros (CONAFOR, 2007), (Figura 11).



**Figura 11.** Distribución de zanjas de infiltración en una hectárea (CONAFOR, 2007).

### **Volumen de excavación**

- Considerando que una tina tiene 2 m de largo, 0.5 m de ancho y 0.5 m de profundidad, entonces el volumen de excavación sería de 0.50 m<sup>3</sup>/tina.
- Si una hectárea se cubre con 250 tinas, entonces 300 tinas x 0.50 m<sup>3</sup>/tina se tendría un volumen de excavación de 150 m<sup>3</sup>/ha. (SAGARPA, 2009).

### **Consideraciones (CONAFOR, 2007):**

- En el diseño de esta obra, se debe considerar al recurso agua como el elemento más importante de administrar, ya que es posible controlar el volumen y la velocidad de los escurrimientos superficiales mediante el uso de zanjas.
- La capacidad de almacenamiento de agua dependerá de las condiciones de vegetación, tipo de suelo y cantidad de lluvia que se presente en cada zona.
- El adecuado funcionamiento de las zanjas depende del mantenimiento de la obra, ya que los procesos de sedimentación disminuyen la capacidad de captación de agua de lluvia, así como también reducen el tiempo de vida útil para el que fueron construidas. Por ello, es conveniente que se desalojen los sedimentos acumulados durante el tiempo que requieren las plantaciones para asegurar un desarrollo adecuado (cinco años en promedio), dependiendo de cada especie, condiciones climáticas y edáficas para cada lugar.

### **Recomendaciones de construcción (CONAFOR, 2007,SAGARPA, 2009):**

- Cuando se busca retener humedad se recomienda compactar la base de la tina ciega para reducir la infiltración.
- Para lograr el mayor aprovechamiento en la captación de agua, se recomienda modificar la pendiente de tal manera que el agua se conduzca hacia las zanjas. También, se deben eliminar los obstáculos que desvíen los escurrimientos del sitio de interés.
- Se deben seleccionar especies forestales que se adapten en cada región y se establezcan en época de lluvia. Además, es necesario proporcionar cuidados suficientes para lograr mayor éxito en los beneficios de la obra.
- Este tipo de obra se recomienda para zonas semiáridas en donde la precipitación no es muy alta, y templadas con pendientes no mayores a 40%, ya que el movimiento de suelo que se hace en la zanja aguas arriba propicia que se deposite en la zanja de aguas abajo por el escurrimiento superficial.
- En los suelos con alta permeabilidad relativa (se examinan las tasas de infiltración del suelo y se comparan con los registros de la precipitación, utilizando un período de retorno de 10 años y la lluvia máxima en 24 horas).
- En las laderas desprovistas de vegetación de una cuenca hidrográfica donde se planea realizar una reforestación.
- En regiones donde es necesario favorecer la infiltración del agua en el suelo y la recarga de acuíferos.
- Para el control de avenidas que generen problemas de inundaciones y/o la acumulación de sedimento en las partes bajas de una cuenca.
- Para el desarrollo de huertos en terrenos de ladera.
- No realizar las zanjas en suelos con algún horizonte arcilloso en el perfil; en suelos con profundidad mayor a 15 cm; en suelos con horizontes superficiales oscuros, en suelos con cobertura vegetal y en laderas cóncavas.

### **Costos**

Para el presupuesto que se describe a continuación, se consideraron 100 zanjas con dimensiones de 2 metros de largo x 0.40 metros de ancho x 0.40 metros de profundidad y un tabique divisor de 2 metros, con un periodo de retorno de cinco años y captura de 35% a 50% de escurrimiento generado por precipitación pluvial. El costo de cada zanja es de \$7.77 y el costo por hectárea (250 zanjas) es de \$1,943, en promedio (CONAFOR, 2007).

Las zanjas de Infiltración, son prácticas de fácil aplicación, porque no requieren de herramientas complicadas. Sin embargo la evaluación previa a la realización de la zanja sí requiere de un conocimiento y análisis de las características ambientales del lugar, Pizarro *et al* (2004), proponen un diseño basado en el análisis y determinación de algunos parámetros edafoclimáticos particulares, entre ellos, la intensidad de la lluvia, el periodo de retorno de un evento extremo, el coeficiente de escorrentía y la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

En México las zanjas se han construido bajo diversas condiciones ambientales, lo cual sugiere que no se tienen claras las condiciones en las cuales esta práctica puede ser útil, ni las función u objetivos mismos de la práctica, a diferencia de la experiencia internacional donde las zanjas son utilizadas específicamente para el control de los escurrimientos (Cotler *et al*, 2015; Critchley *et al*, 1991; Pizarro *et al*, 2008; EPA, 1999; Bhagu *et al*, 2012; CONAFOR, 2007).

La ausencia de claridad en el objetivo ocasiona que la construcción de zanjas genere un gran número de externalidades. Entre ellas se reporta la erosión de suelos como consecuencia de la excavación, la cual puede generar de 5 a 11 veces más de erosión que el límite permisible (Cotler *et al*, 2015).

En los primeros 40 cm se puede encontrar el 50% del carbono (Balbontín *et al*, 2009), por ello su excavación puede ocasionar la remoción de carbono orgánico en rangos elevados. Esta pérdida es aún más desfavorable dado que el carbono orgánico constituye el detonador principal para el mantenimiento de las funciones básicas de los suelos (Janzen, 2006), por lo que en ambientes donde la vegetación está impactada, la fuente de carbono orgánico es muy limitada. Bajo esas condiciones, la pérdida de varias toneladas de carbono puede impedir la recuperación de las funciones de estos suelos.

Contrario a lo anterior, cualquier práctica de conservación de suelos debe buscar recuperar, mantener y/o incrementar el contenido de materia orgánica del suelo (Chabbi y Rumpel, 2009).

En términos de retención de agua, los bordos de las zanjas no presentan condiciones adecuadas para dar humedad a los cultivos y plantaciones; este resultado es similar a lo reportado por Pizarro *et al* (2004) y Vargas *et al* (2010), por lo que el uso de zanjas de infiltración no pueden mejorar propiedades indispensables para el funcionamiento hidrológico de los suelos (Cotler *et al*, 2013b).

Dada la complejidad de las interacciones suelo-planta, algunas evidencias demuestran que minimizar el disturbio del suelo constituye el mejor medio para conservar su humedad (Hartfield *et al*, 2001).

# CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN AMBIENTAL Y PROGRAMAS DE CONSERVACIÓN IMPLEMENTADOS EN EL PNIP

## 2.1. Características Geográfico-Ambientales

### Localización

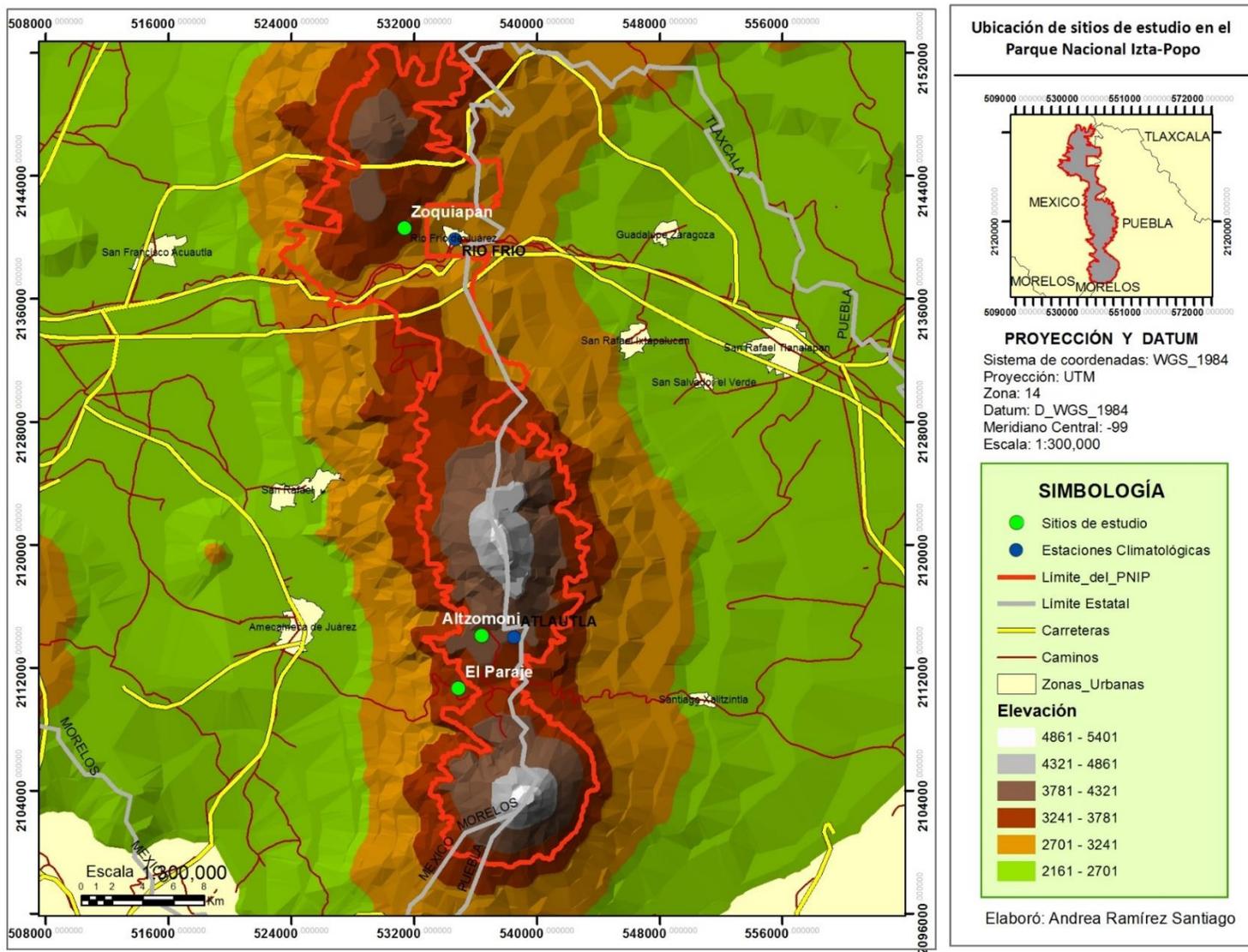
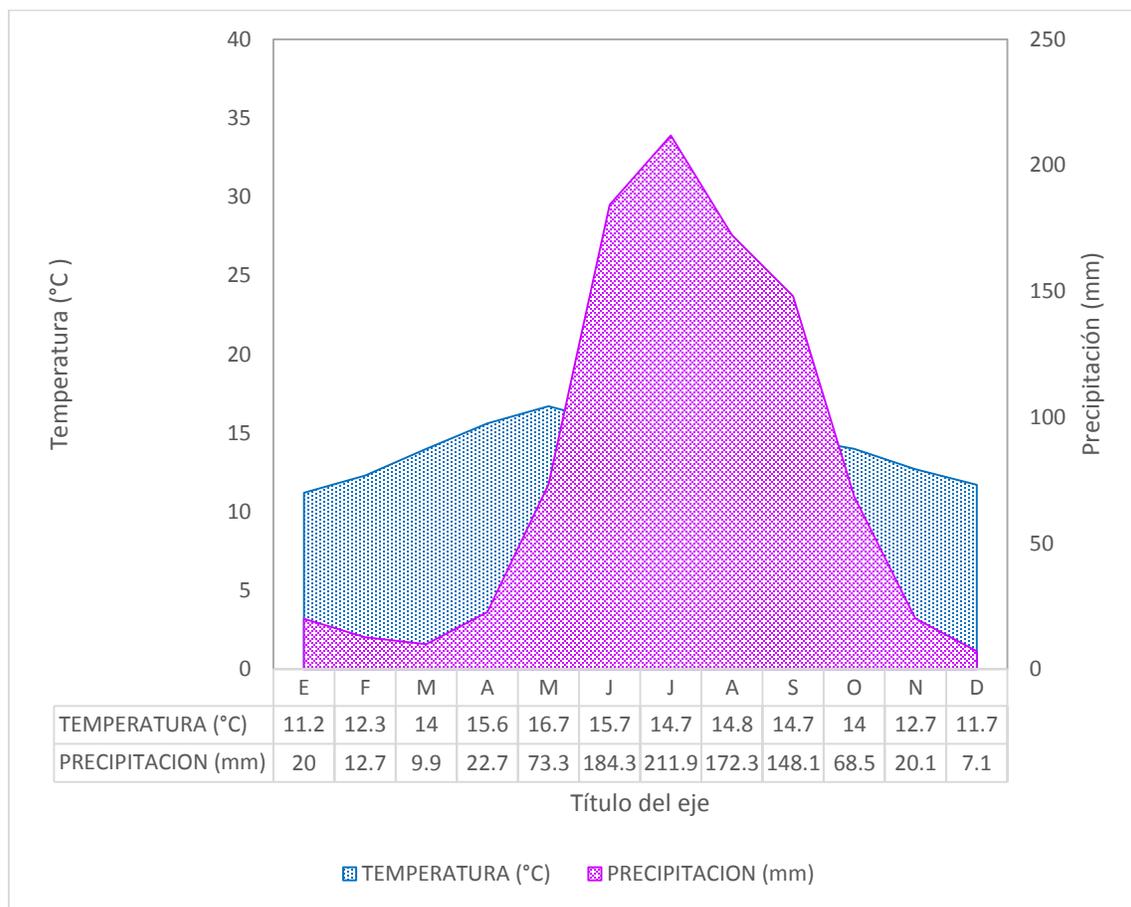


Figura 12. Mapa de localización del PNIP; sobre un modelo digital de elevación, (la información georeferenciada del polígono del PNIP, se obtuvo de la subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014).

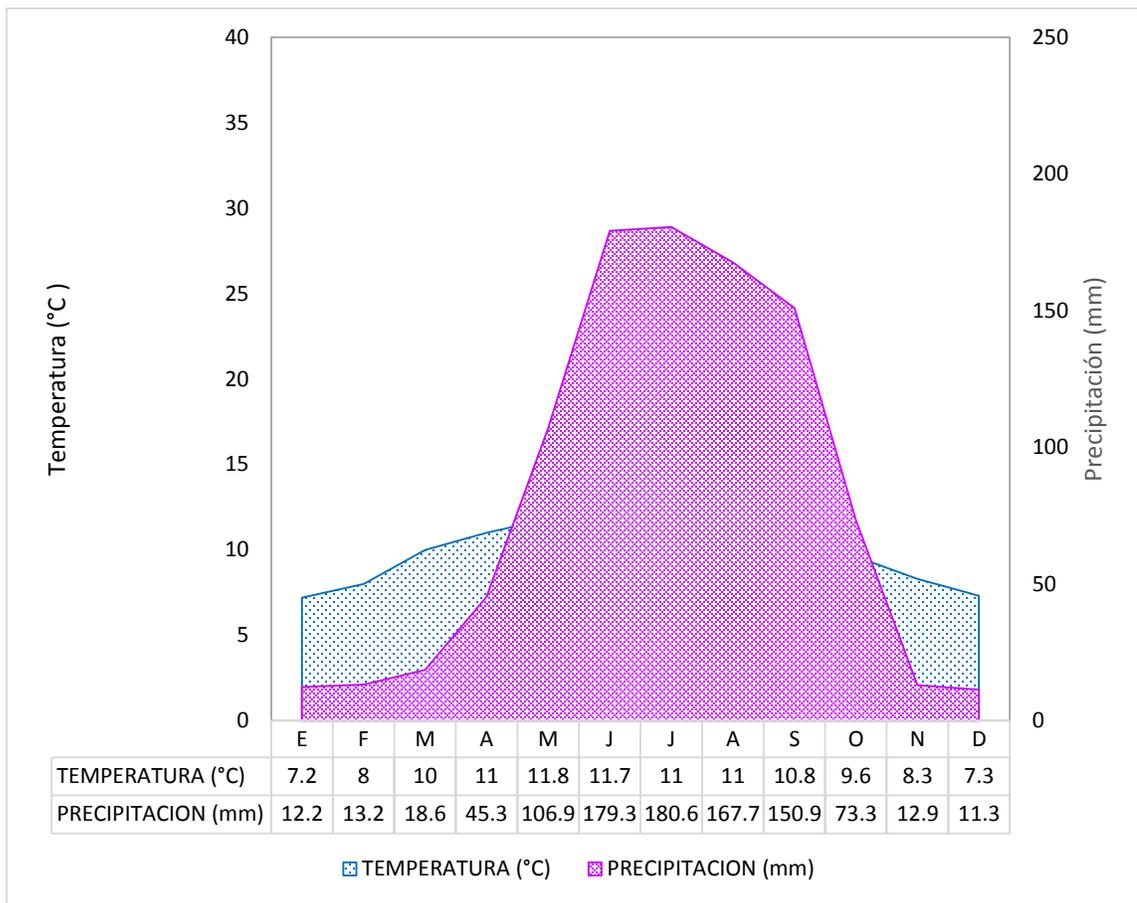


Debido a su relieve y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío (CONABIO). La temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68°C por cada 100 metros (Sistema de clasificación climática de Köeppen, modificada por Enriqueta García) (Figura 13). Dentro y fuera del Parque existe una red de estaciones climáticas, sin embargo, no se cuenta con estaciones a una altura mayor a los 4,000 metros sobre el nivel del mar, por lo que no se tienen registros de las zonas más frías en donde están los glaciares (CONAGUA, SMN).

La precipitación anual oscila entre 800 y 1200 mm, presentándose en diversas formas: nieve, lluvia, aguanieve, y granizo (CONAGUA, SMN). La precipitación alcanza su valor máximo (1200 mm) alrededor de la cota de 3600msnm, a partir de la cual, tiende a decrecer, fenómeno conocido como “techo de nubosidad” situado alrededor de los 3600 en montañas mayores a 4000msnm (Escamilla, 2007).



**Figura 14.** Climograma construido con los datos de las normales climatológicas de la estación climatológica 00015252 Atlautla (2,365.0 msnm) del periodo 1951-2010 (SMN,CONAGUA, 2015).



**Figura 15.** Climograma construido con los datos de las normales climatológicas de la estación climatológica 000150 82 Rio Frio (2,977.0 msnm) del periodo 1951-2010 (SMN,CONAGUA, 2015).

El cambio del gradiente térmico en el Parque oscila de  $-0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de altitud (Escamilla, 2007; CONANP, 2013), por lo que el gradiente térmico varía en las diferentes laderas de la Sierra Nevada, por condiciones locales de relieve, orientación y microclima de cada una, mientras que la disponibilidad hídrica tiende a incrementar gradualmente, resultando en un comportamiento inverso (López, 2014) (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Características hídricas, vegetación y procesos geomorfológicos del PNIP según la altitud.

Altitud	Características <sup>1</sup>	Vegetación <sup>1</sup>	Proceso Geomorfológico <sup>2</sup>
4500	Caída de nieve y granizo	Sin vegetación	Volcánico acumulativo (cono)
4000-4500	Pocos escurrimientos, primeros manantiales	Zacatonal alpino.	Piedemonte, volcánico acumulativo.
3500-4000	Incremento de la velocidad y volumen de los arroyos.	<i>Pinus hartweggi</i>	Erosión fluvial moderada
2500-3500	Incremento en la cantidad de escurrimientos.	<i>Abies religiosa, Pinus sp., Quercus sp, Alnus, Arbutus</i>	Erosión fluvial intensa
2300-2500	Disminución de la velocidad de escurrimiento.	<i>A. Religiosa, Pinus sp., Quercus sp, Alnus, Arbutus.</i>	Acumulativo fluvial (Abanico aluvial)

Tomado de <sup>1</sup>Escamilla, 2007 y <sup>2</sup>Franco, 2005.

## Geología

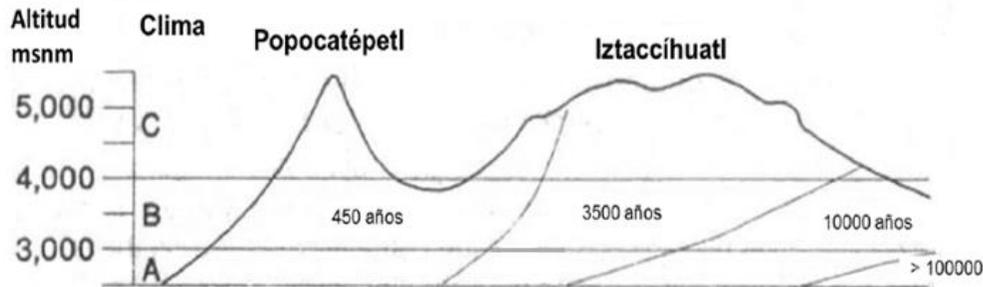
Los materiales más antiguos que componen la Sierra Nevada son lavas de composición intermedia del Pleistoceno temprano sobre un basamento de calizas a más de 2km de profundidad (Franco, 2005).

Los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, están formados por lavas andesíticas y dacíticas del Pleistoceno. El espesor y la disposición estructural de los derrames son variables, de acuerdo con el relieve sobre el que se asentaron. Los derrames constituyeron la unidad del Popocatepetl, pero su base está cubierta por abanicos aluviales que en su parte sur muestran un espesor considerable (Franco, 2005).

La mayor parte del desarrollo de los estratovolcanes que conforman esta cadena han ocurrido a lo largo del Pleistoceno medio y tardío. En el caso del Popocatepetl, la actividad se ha extendido al Holoceno y hasta la actualidad, mientras que la actividad del Iztaccíhuatl cesó antes de la última glaciación mayor (López, 2014).

El intenso tectonismo y vulcanismo ha causado fracturamiento en las rocas, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia en las montañas, alimentando de esta forma, los cuerpos de agua subterráneos.

La ceniza de las ultimas erupciones del Popocatépetl ocurridas en los últimos 25 mil años cubren la mayor parte de la Sierra Nevada (Miehlich, 1991) (Figura 16).



**Figura 16.** Esquema de la edad de los depósitos de ceniza de acuerdo a la altitud en los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl. (Miehlich, 1991).

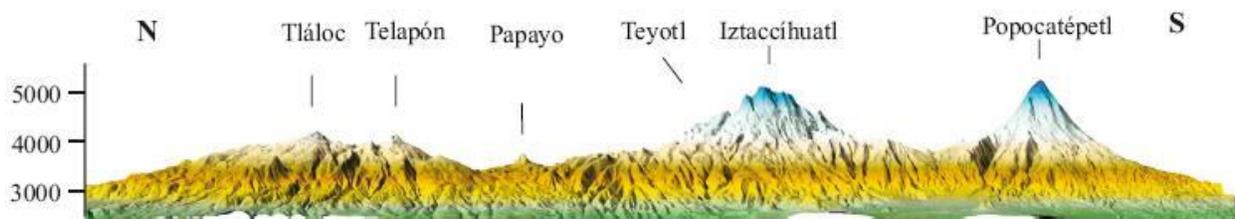
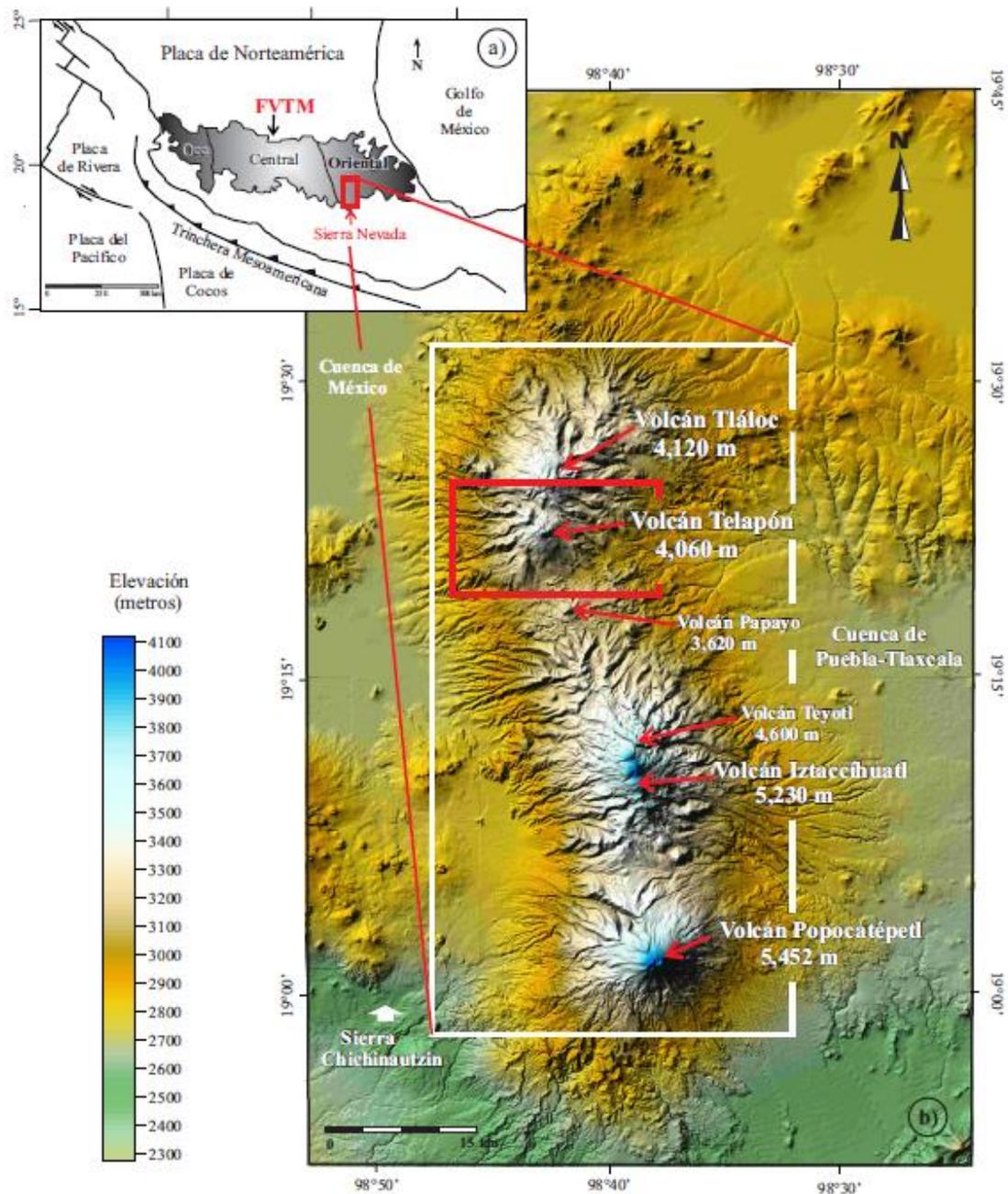
## Geomorfología

La Sierra Nevada cuya orientación forma parte del Eje Volcánico Transversal, es un macizo montañoso de alrededor de 100 km, que va de norte a sur separando las cuencas de México y Puebla. Sobre ella se encuentra la tercera cumbre más alta del país, el Iztaccíhuatl (5,230 msnm) y a 14 kilómetros hacia el sur, se encuentra la segunda cumbre más alta del país, el Popocatépetl (5,452 msnm) (Figura 16). La serranía de Ahualco une ambos volcanes en el lugar llamado Tlamacaxco o Paso de Cortés. El sector norte lo conforma el Complejo Volcánico Tláloc-Telapón, con una orientación preferencial NE-SW (García-Tovar, *et al.*, 2011), (Figura 18).

Las lavas de la Sierra Nevada se derivan de un mismo centro eruptivo, situado probablemente en la cima actual del Iztaccíhuatl; esta serranía presenta un drenaje bien desarrollado y recorre profundos barrancos (Miehlich, 1991).

El límite norte de la Sierra Nevada se encuentra en un puerto montañoso bajo ocupado por Río Frío por donde cruza la autopista que comunica a las ciudades de México y Puebla (CCMSS, 2008).

La Sierra de Río Frío está separada de la Sierra Nevada por una faja de flujos de lava que se derivaron de pequeños volcanes recientes; en esta Sierra la red hidrográfica y el drenaje están poco desarrollados (Miehlich, 1991). En esta serranía también se encuentran las otras cimas del Parque: el Tláloc a 4,120m, el Telapón a 4,600m, el Papayo a 3,600m y el Teyotl a 3600m, (Figura 17), (García-Tovar, *et al.*, 2011).



**Figura 17.** Principales elevaciones en el PNIP sobre un modelo digital de elevación y perfil de la Sierra Nevada de Norte a Sur (García-Tovar, *et al.*, 2011).

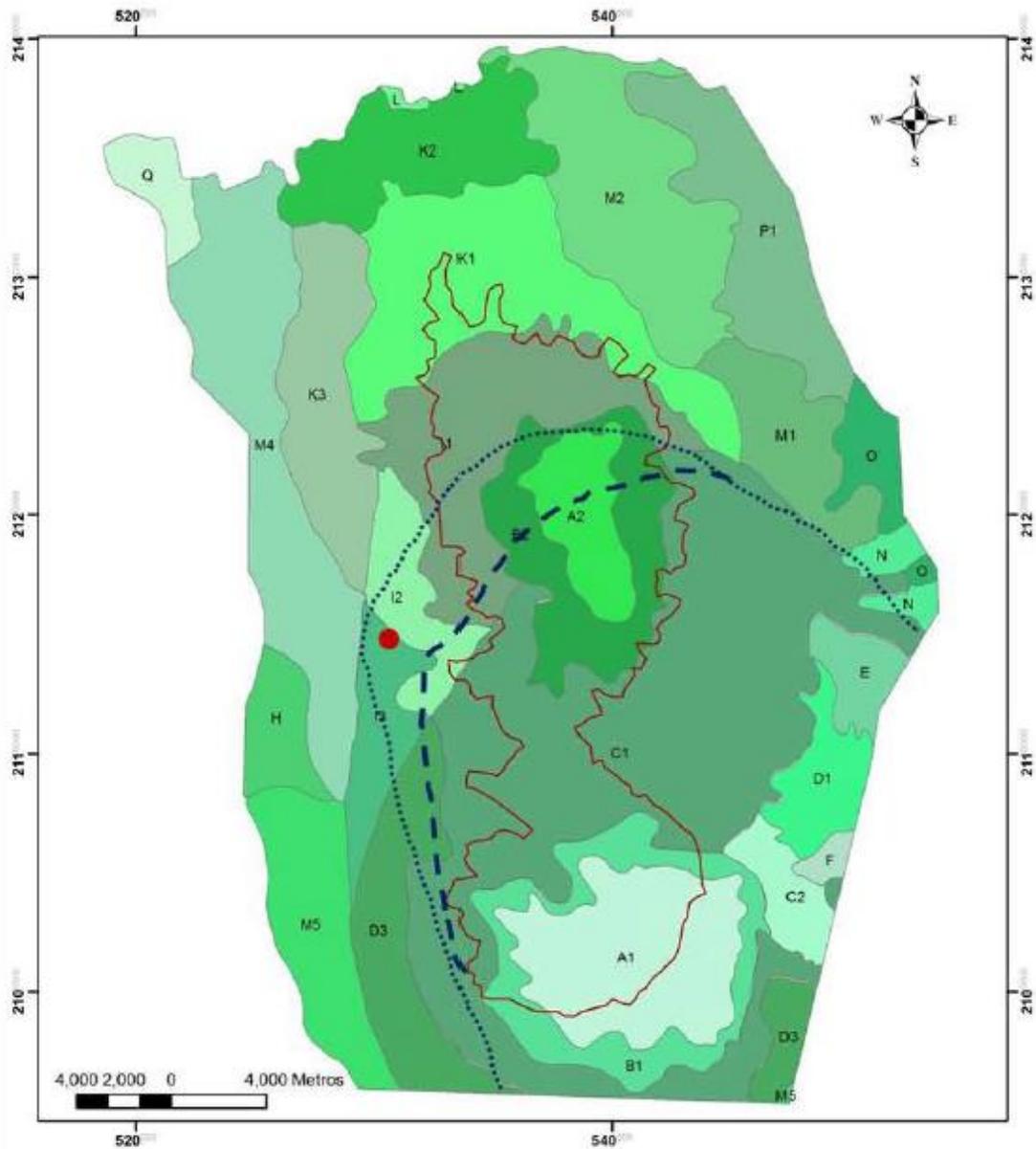
## Suelos

El material parental de los suelos está formado por cenizas volcánicas recientes y pómez (tefras) de diferente edad. El desarrollo de los suelos depende de la edad del material parental, en general los más jóvenes (450 años) se localizan cerca del Popocatepetl y los de mayor antigüedad al norte del Iztaccíhuatl (Miehlich, 1991), sin embargo el clima local, relieve y biota modifican dicho desarrollo (Cuadro 6 y Figura 18).

En la región adyacente a las grandes elevaciones, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc, debido a la continua actividad volcánica con la consecuente presencia de derrames y emisión de cenizas, el material parental de los suelos está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, por la acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por rocas de origen volcánico. La múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos de la erosión hídrica y eólica y del clima, ejercen efectos diferenciales sobre los procesos de formación de los suelos característicos de esta región que son los andosoles, los cuales debido a su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos, sin embargo, este aporte de ceniza continuamente interrumpe los procesos de erosión y formación de suelo (Miehlich, 1991).

**Cuadro 6.** Unidades de Suelo presentes en el PNIP propuestas por Miehlich (1991).

Unidad de suelo Miehlich 1991	Dominante	FAO (1974) Acompañante
B2	Andosol vítrico, Andosol húmico	Andosol vítrico, Andosol húmico
C1	Andosol vítrico	Regosol districo, Litosol
D3	Andosol vítrico	Fluvisol
I1	Andosol vítrico, Cambisol dístrico	Litosol
I2	Andosol húmico, Cambisol dístrico	Andosol vítrico
I3	Andosol húmico/ ócrico	Andosol vítrico
K1	Andosol vítrico	Andosol húmico, Cambisol districo, Fluvisol
K2	Andosol vítrico	Andosol húmico/ ócrico, Litosol
L	Andosol húmico, Andosol vítrico	Litosol, Fluvisol
M1	Andosol mólico, Andosol húmico/ ócrico	Andosol ócrico, fase duripan
M2	Andosol mólico, Andosol húmico/ ócrico	Andosol húmico, Regosol eutrico
M3	Andosol mólico, Andosol húmico/ ócrico	Cambisol eutrico, fase duripan, Andosol húmico, Litosol
M4	Andosol húmico/ ócrico, Andosol vítrico	Andosol mólico, Andosol vítrico, Cambisol eutrico, fase duripan,
M5	Andosol húmico/ ócrico, Andosol vítrico	Andosol mólico, Regosol eutrico, Cambisol vítrico
Q	Cambisol eutrico, fase de duripan, Cambisol eutrico, fase duripan, Cambisol vertico, fase duripan	Andosol mólico



I<sub>3</sub> Las letras simbolizan la unidad de suelo.

- ..... Capa de pómez 2P<sub>2</sub>
- - - - - Capa de pómez 1P<sub>2</sub>-1P<sub>4</sub>
- Área natural protegida

**Figura 18.** Mapa de los tipos de suelo del parque nacional Izta-Popo, propuesto por Miehlich, 19991 (López, 2014). Leyenda: ver cuadro 9.

El Programa de manejo del Parque Nacional Izta Popo (2013) se basa en el mapa de suelos realizado con los metadatos de CONABIO en donde el suelo dominante es el Andosol mólico, mientras que los suelos Andosol Húmico y Víttrico son los más frecuentes, además del Leptosol Lítico, Regosol éutrico y dístrico, así como Cambisol y Fluvisol, sin embargo el aporte de ceniza continuamente interrumpe los procesos de erosión y formación de suelo.

La relación entre las diferentes fases de formación de los suelos, la fisiografía y la vegetación predominante, de acuerdo con su altitud muestra que a elevaciones de 2,900 a 3,000 m, los suelos están bien desarrollados, y poseen un contenido de materia orgánica de 8 al 11 % ; a altitudes de 3,400 a 3, 800 m. El suelo tiene bajo contenido de materia orgánica (2 a 8 %) y presenta los efectos de la acción del intemperismo en el material parental; a elevaciones de 4,000 m, se observan afloramientos de rocas ígneas (pómez) y cenizas volcánicas, con fragmentos de suelo en laderas con fuerte pendiente, lo cual lo hace más susceptible al arrastre por la acción del viento y el agua (CONANP,2013).

En las áreas donde se presentan suelos bien desarrollados, que son las partes planas y planicies ligeramente onduladas se pueden encontrar suelos profundos, con texturas medias, con contenidos de limos más o menos constantes. Son suelos de gran potencial para la producción, pues tienen alta capacidad de retención de humedad, son ligeramente ácidos y con buen contenido de materia orgánica (CONANP,2013).

Otro tipo de suelos que se localizan en áreas escarpadas y que presentan una estructura débil o moderadamente desarrollada, son de buena profundidad, de textura media, pero también con alto potencial productivo por su capacidad de retención de humedad, pH y alto contenido de materia orgánica (CONANP,2013).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas pueden presentar perfiles bien desarrollados donde se delimitan perfectamente los horizontes A, B, o C (AC, ABC, BC) con profundidades de entre 0.5 a un metro y con texturas finas, aunque con buena aireación y drenaje, así como alto contenido de humedad (CONANP,2013).

En el estudio de propiedades físicas de suelos de ambientes ribereños den alta montaña en el PNIP, se estudiaron 24 sitios, dentro del parque, entre los 2149 y 4059 msnm, en los que se encontraron textura Franco-arenosas con dominio de la fracción arena (de 52 hasta 88%) en la mayoría de sitios, pHs ácidos (4.2-6.23), altos valores de porosidad (hasta 75%) que se explican por una densidad aparente cercana a  $1\text{g/cm}^3$  por el alto contenido de MO del suelo. Todas estas características son típicas de los suelos volcánicos de reciente origen; lo que permiten un excelente drenaje y filtración del agua hacia los mantos

acuíferos y para la aireación en el hábitat de microorganismos que mejoran el funcionamiento de la cuenca hidrográfica a la que pertenece. Aunque el suelo tiene alta erosionabilidad, la vegetación presente ayuda a la protección del suelo (Chargoy, *et al.*, 2014).

Otro estudio realizado en el PNIP relacionó la capacidad de infiltración con propiedades hidrológicas y edáficas en las riberas de afluentes permanentes del PNIP y su área de influencia. En este estudio se realizaron 22 muestreos en campo, en donde el tipo de uso de suelo forestal fue el más registrado en los sitios de muestro con 8 sitios. Los resultados obtenidos dieron una relación entre la tasa de infiltración y la densidad aparente inversamente proporcional, ya que al aumentar la densidad del suelo la infiltración disminuía, lo contrario que ocurría con el porcentaje de materia orgánica, ya que cuando este aumentó también lo hizo la tasa de infiltración, ya que la materia orgánica puede retener más agua. (Pacheco y Guerra, 2014).

El estudio de López (2014), muestra de manera más detallada una descripción de 8 perfiles de suelos con su respectiva evaluación edafocologica distribuidos en dos laderas diferentes ( 4 en la ladera solana y 4 en la ladera umbría) en suelos del PNIP, las 8 diferentes posiciones en la catena en ambas laderas tenían altitudes de 2880 a 2948 msnm (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Altitud de los perfiles en diferente posición en la catena.

Posición en la catena	Catena 1 : Ladera Solana (s)			Catena 2: Ladera Umbría (u)		
	Perfil	Clave	Altitud (msnm)	Perfil	Clave	Altitud (msnm)
Hombro	1	SHs	2948	5	SHu	2948
Lomo de ladera	2	BSs	2925	6	BSu	2940
Pie de Ladera	3	FSs	2905	7	FSu	2885
Fondo de valle	4	TSs	2880	8	TSu	2883

Los resultados del estudio mostraron que las propiedades del suelo cambian entre laderas y entre posición de la catena. En la ladera alta los suelos son Andosoles Silándicos y en la ladera baja Andosoles Víttricos.

Los suelos de la ladera Solana (SH y BS) fueron 1°C más cálidos y 14.2% menos húmedos que los sitios de ladera umbría, ya que reciben mayor insolación; los suelos tuvieron alta CE, pH bajos, nula pedregosidad y mayor contenido de carbón, (Cuadro 8). Los suelos de la ladera umbría fueron más húmedos que la ladera solana ya que reciben menos cantidad de luz solar; mostraron baja CE y pH casi neutro (Cuadro 9).

**Cuadro 8.** Resumen de las propiedades edafo-ecológicas de la catena en la ladera solana.

Perfil	Espesor [dm]	Profundidad fisiológica [dm]	VTP Vol [%]	CA Vol [%]	dCC L m <sup>-2</sup>	CC Lm <sup>-2</sup>	Kf cm d <sup>-1</sup>	CIC Cmol Kg <sup>-1</sup>	Factor K <sup>*</sup>	Humus Kg m <sup>-2</sup>	Nd g m <sup>-2</sup>	P <sub>MO</sub> g m <sup>-2</sup>	Pen diente °	Piedras <sup>**sup.</sup> %
P1-SHs	18.5	10.7	46	8	329	579	10-100	64	0.38	10.8	1.15	21.5	28	0
P2-BSs	8.3	8.3	48	9	220	340	10-100	58	0.38	21	0.6	16	25	0
P3-FSs	8	4	46	8.5	199	298	10-40	18.5	0.34	5.57	0.45	8.36	20	15BPCg
P4-Ts	6.6	6.6	44	10-21	111	173	10-100	10-18	0.38	14.14	1.18	141	4	15BPCg

s: solana

VTP: volumen total de poros

CA: capacidad de aireación

dCC: capacidad de agua disponible

CC: capacidad de campo

CIC: capacidad de intercambio catiónico

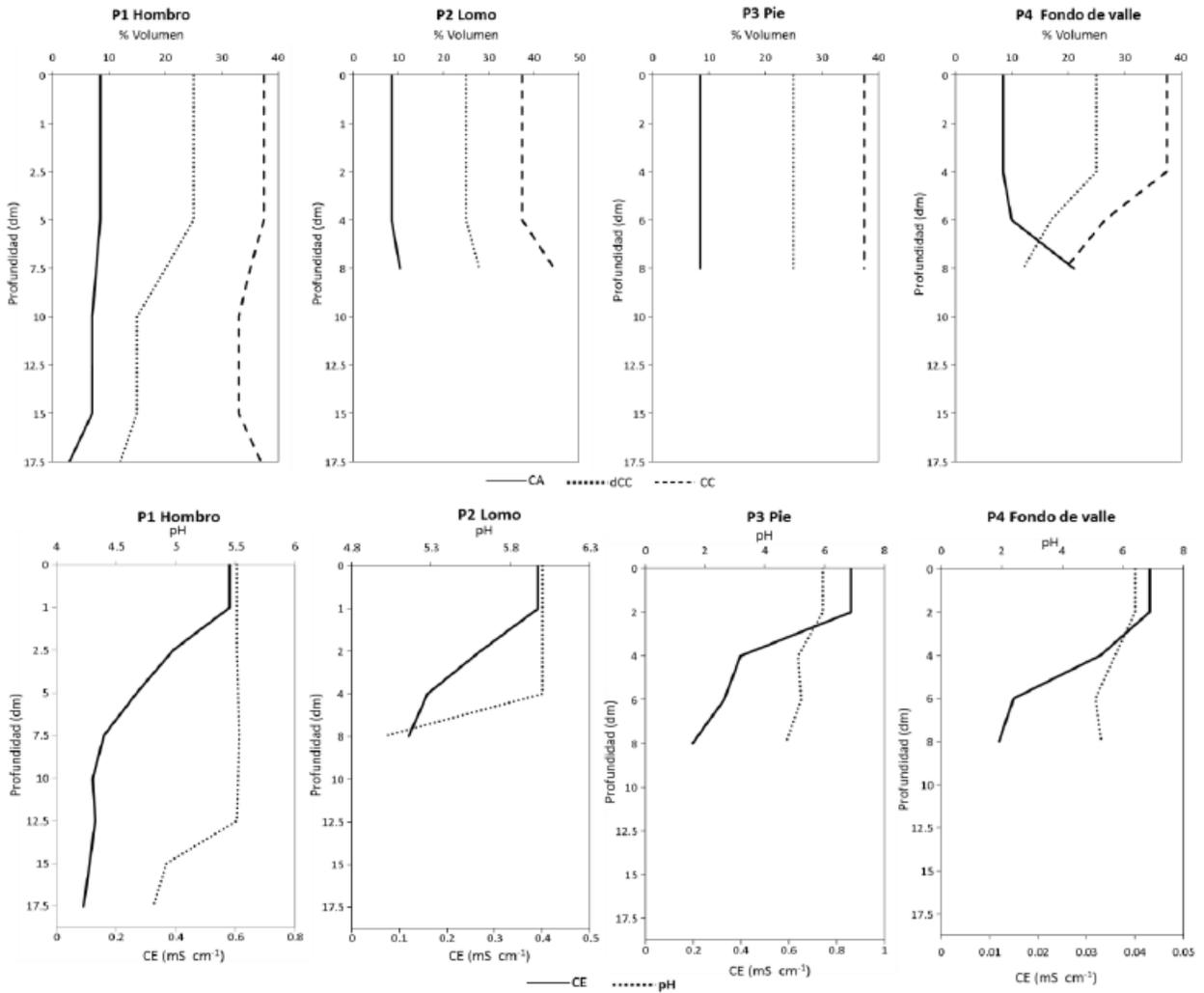
Kf: conductividad hidráulica

Nd: nitrógeno disponible

P<sub>MO</sub>: fósforo movilizable

\*Factor de erodabilidad

\*\* Piedras en superficie: Cg=cantos gruesos (20-60mm), P=piedras (60-200mm) y B=bloques (>200mm)



**Figura 19.** Variación de la capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de agua disponible (dCC), capacidad de campo (CC), pH y conductividad eléctrica (CE) en cada perfil de la ladera solana.

**Cuadro 9.** Resumen de las propiedades edafo-ecológicas de la catena en la ladera umbría.

Perfil	Espesor [dm]	Profundidad fisiológica [dm]	VTP Vol [%]	CA Vol [%]	dCC L m <sup>-2</sup>	CC L m <sup>-2</sup>	Kf cm d <sup>-1</sup>	CIC cmol Kg <sup>-1</sup>	* Factor K	Humus Kg m <sup>-2</sup>	Nd g m <sup>-2</sup>	P <sub>MO</sub> g m <sup>-2</sup>	Pen diente °	Piedras sup. %
P5-SHu	8.1	8.1	46	7.2	176	312	10-100	76	0.3	17.94	4.5	179	32	0
P6-BSu	14	10	47	8.1	326	539	10-40	68	0.14	25.20	6.3	252	30	0
P7-FSu	20.3	14	43	4-21	418	675	10-100	9-88	0.28	27.72	6.93	277	20	2CmP
P8-TS	5.5	2.3	44	4-20	90.7	149	10>100	2-21	0.14	10.62	2.66	106	2	5PCg

*u: umbría*

VTP: volumen total de poros

CA: capacidad de aireación

dCC: capacidad de agua disponible

CC: capacidad de campo

CIC: capacidad de intercambio

catiónico

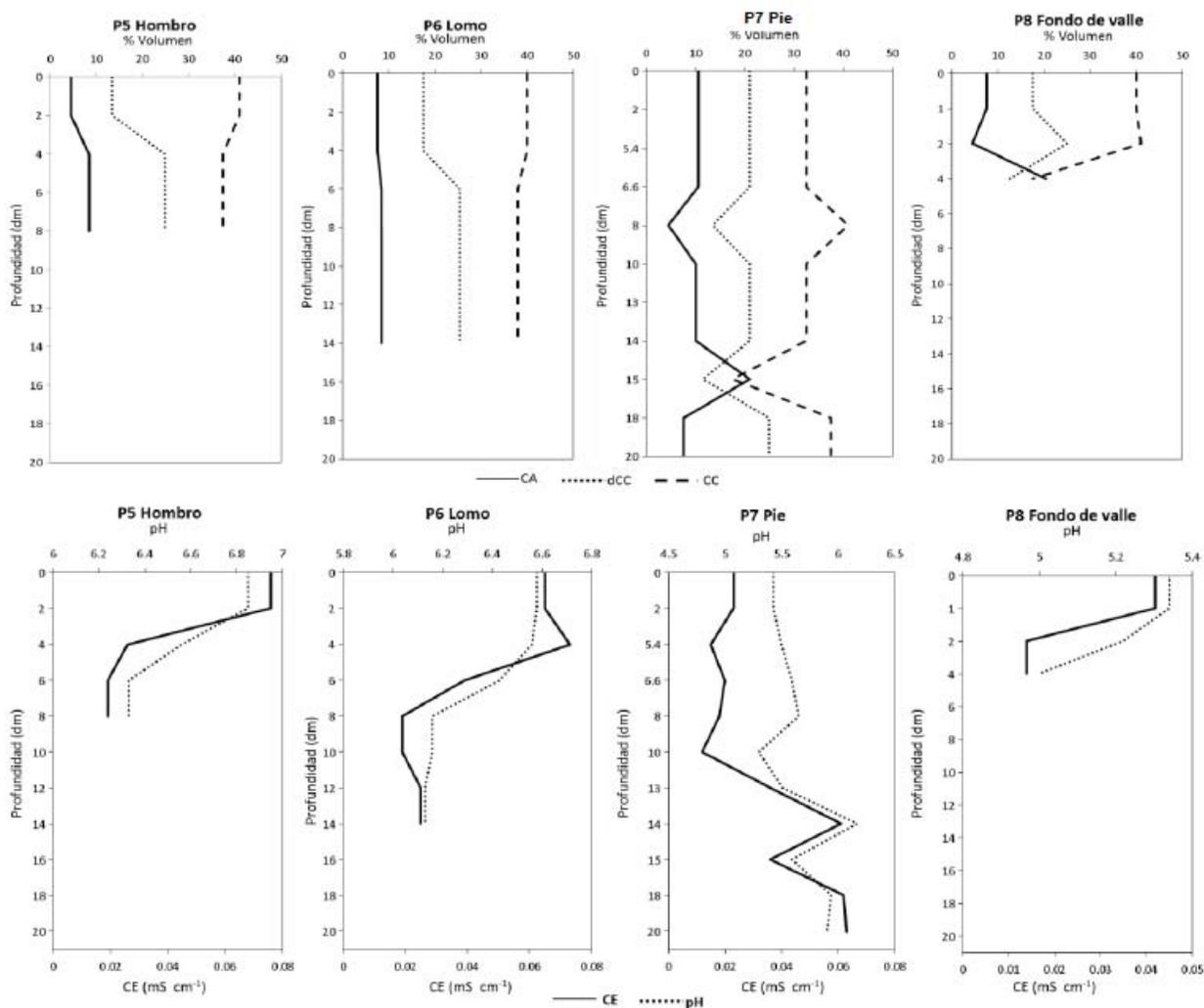
Kf: conductividad hidráulica

Nd: nitrógeno disponible

P<sub>MO</sub>: fósforo movilizable

\*Factor de erodabilidad

\*\*Piedras en superficie: Cm=cantos medios (6-20mm), P=piedras (60-200mm) y B=bloques (>200mm).



**Figura 20.** Variación de la capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de agua disponible (dCC), capacidad de campo (CC), pH y conductividad eléctrica (CE) en cada perfil de la ladera umbría.

En ambas catenas el porcentaje de pedregosidad en el perfil y en la superficie fue casi nula en la parte alta de la laderas y se observó que se incrementa en el piedemonte y fondo de valle. La textura de suelo en los sitios de ladera alta (hombro y lomo) de ambas catenas presentaron texturas más finas y en la ladera baja tuvieron mayor porcentaje de arenas. El pH y la CE tuvieron una tendencia a disminuir con la profundidad en todos los perfiles. El carbono orgánico fue mayor ( $<0.05$ ) en el fondo del valle que en los demás sitios de la catena.

La diferencia de vegetación entre las pendientes altas (pino) y bajas (vegetación de galería) de la solana provocan que los sitios tengan suelos ligeramente más ácidos en las partes altas. La menor acidez del suelo de la ladera umbría se vincula con el mantillo aportado por la vegetación que crece sobre esta ladera (no figuran especies de pino).

Los resultados de estructura y estabilidad de agregados fueron altos, característica de sitios con elevadas tasas de infiltración; la conductividad hidráulica fue más baja en el lomo de la ladera solana, y más alta en el fondo del valle en las dos catenas, en cuanto a su velocidad, fue extremadamente rápida bajo vegetación de galería ( $0.22 \text{ mm s}^{-1}$ ), y considerablemente baja en bosque alpino ( $0.018 \text{ mm s}^{-1}$ ) sometido a cambio de uso de suelo y vegetación, lo cual confirma la vulnerabilidad de las propiedades de los Andosoles e infiltración cuando se somete a distintas modificaciones (naturales o antrópicas), así como la influencia de la cubierta forestal sobre las propiedades de estos suelos. En general los suelos resultaron no estar saturados de agua por lo que se trata de suelos bien drenados.

El estudio también midió de manera general la velocidad de infiltración, en horizontes superficiales, en la cual se obtuvo que aumenta en horizontes profundos, influenciado también por la pedregosidad, texturas gruesas y pendientes suaves que inducen el flujo vertical y subsuperficial.

Otro de los aspectos importantes para la correcta función del suelo, es la diversidad biológica de la fauna edáfica ya que contribuye a mantener la fertilidad de los suelos. Esta característica se evaluó en el estudio sobre la edafofauna en suelos del PNIP (Molina, *et. al*, 2014), en el cual se recolectaron muestras en 3 sitios a diferentes profundidades (parte superior con mantillo, la segunda capa de fermentación y el suelo de una profundidad de 25 cm). En los resultados varió la cantidad de organismos así como la diversidad debido a la presencia de perturbación y a la reducción de humedad, y se dedujo que la cantidad de organismos es directamente proporcional a la humedad, por lo que en horizontes con buena retención de humedad habrá mayor diversidad biológica y por ende mayor fertilidad en los suelos.

## **Diseño Fluvial**

El diseño fluvial en la zona es radial centrifugo, a consecuencia de la estructura geológica, también presenta superficies cóncavas, generalmente en la cabecera de los escurrimientos y funcionan como una zona de captura de agua pluvial, formando circos de erosión. Su desarrollo depende del tipo de roca, inclinación, altitud y orientación. Otra forma dominante son los barrancos que se deben a la presencia de flujos de agua encausados. La parte acumulativo fluvial se presenta en zona de transición entre el relieve de montaña y las planicies (Franco,2005).

En el extremo occidental se ubican los denominados abanicos aluviales que forman lomeríos de relieve llano. Estos abanicos constituyen el sector de transición entre las montañas y la planicie baja de la Cuenca de México. También existen valles intermontanos, que son áreas de acumulación de materiales acarreados fluvialmente (CONANP,2013).

Gran parte de los escurrimientos funcionan como fronteras entre formas de relieve, por lo que se denomina de contacto geomorfológico.

## **Hidrología**

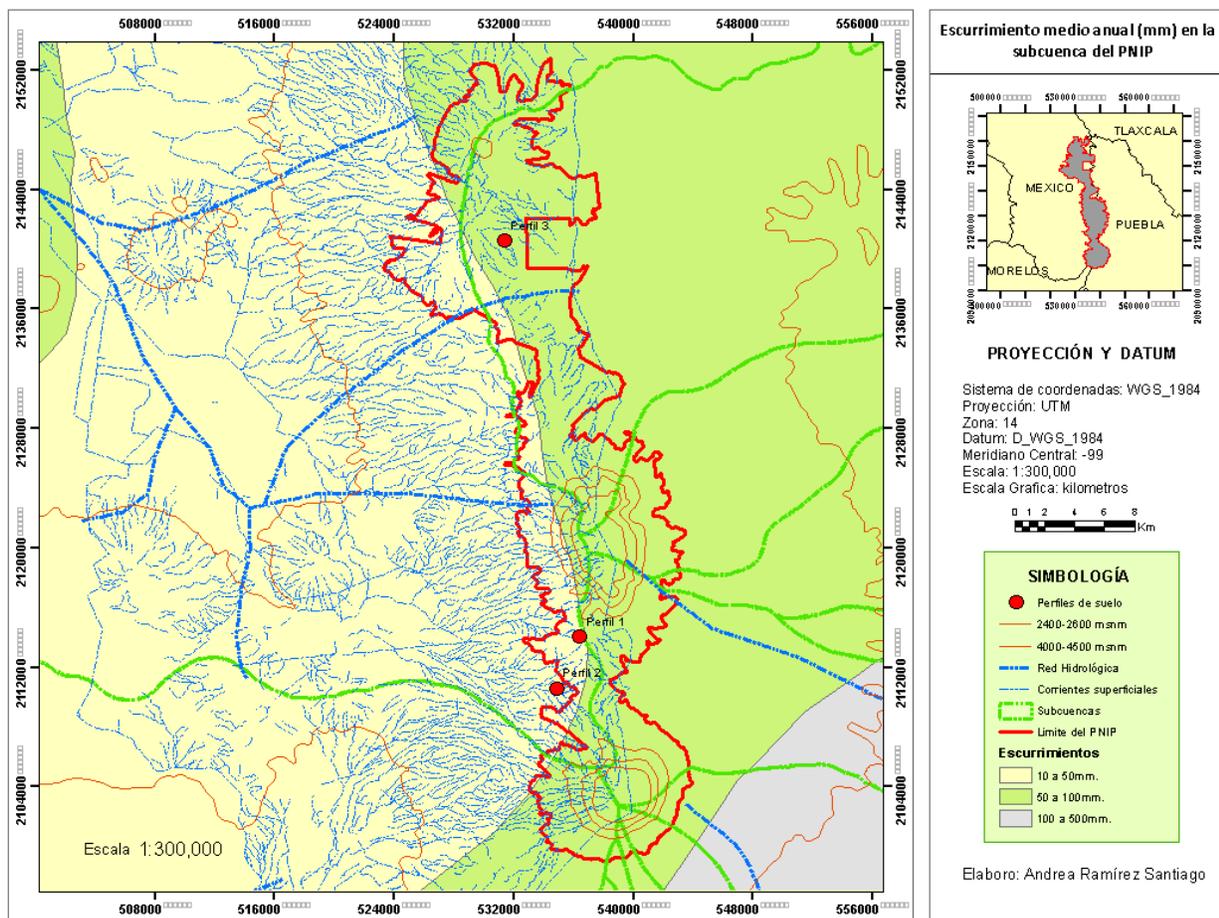
Los recursos hídricos del PNIP se originan por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial la cual es abundante en la región, y sobrepasa los mil milímetros anuales (CONANP,2013).

Las corrientes superficiales pueden ser permanentes o intermitentes, éstas últimas son innumerables durante la época lluviosa. El programa de manejo del PNIP (2013) indica que las corrientes superficiales (permanentes e intermitentes) produce una alta infiltración del agua que alimenta las corrientes subterráneas. Así mismo señala que los ecosistemas existentes en el PNIP ayudan al proceso de infiltración. Sin embargo no existen estudios documentados que indiquen si el agua infiltrada está llegando directamente a los mantos freáticos, o que indiquen la cantidad anual de agua que recarga los acuíferos, tampoco se tiene conocimiento sobre las características ambientales dentro del PNIP que favorecen la infiltración, esto es que sea más rápida y en mayores cantidades.

La característica de los recursos hídricos en el PNIP suele cambia según la altitud, los sitios arriba de los 4,500 msnm a la altura del partaguas se caracterizan por ser sitios de acumulación de la precipitación en forma de nieve y granizo, es en esta zona del relieve en donde se percibe la presencia de glaciares y en donde comienza su deshielo por lo que es ahí en donde se forman los primeros manantiales (Escamilla, 2007; y Franco, 2005), (Figura 21).

Entre los 4,000 y 4,500 en el piedemonte existe escurrimiento incipiente y lento; mientras se desciende a los 2,500 las pendientes suelen ser más pronunciadas por lo que existe un incremento en la velocidad y cantidad de escurrimiento los cuales generar arroyos y con ello una mayor erosión fluvial; de los 2,500 a los 2,300 la pendiente es cada vez más atenuada, por lo que disminuye la velocidad y la cantidad de escurrimientos generando una zona de acumulación fluvial (Escamilla, 2007; y Franco, 2005), (Figura 21).

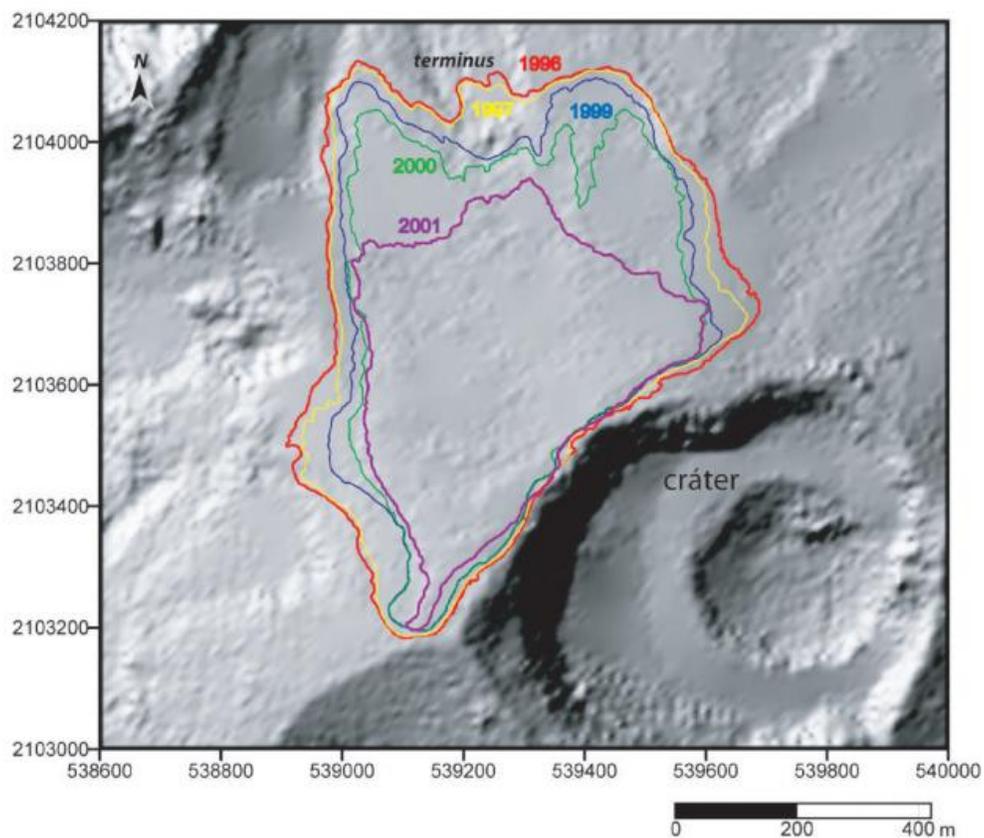
Todos los escurrimientos superficiales en el Parque Nacional Izta- Popo, conforman las trayectorias fluviales, subcuencas y cuencas hidrológicas que permiten el desarrollo de actividades socio económicas en un gran número de asentamientos humanos localizados, desde el centro de México hasta las desembocaduras costeras, por lo que la protección y conservación de los ecosistemas del parque son estratégicos (CONANP,2013).



**Figura 21.** Mapa del escurrimiento medio anual en la subcuenca del PNIP, de acuerdo a los datos de CONABIO.

En el Iztaccíhuatl, los glaciares son numerosos pero pequeños y cubren aproximadamente unas 76 hectáreas (CONANP, 2013). Actualmente se tiene conocimiento sobre el retroceso de los glaciares del volcán Iztaccíhuatl, este retroceso nos lleva a pensar en una disminución de manantiales y de escurrimientos, lo que puede influir directa o indirectamente a la cantidad de agua que infiltra y llega a los mantos freáticos.

El volcán Popocatepetl también presenta retroceso en sus glaciares, la Figura 22 muestra el retroceso del área glaciar en el periodo de tiempo de 1996 al 2001, debido a los procesos volcánicos como incremento en el flujo de calor, flujos piroclásticos, eyección de material incandescente y emisión y deposición de tefra sobre la superficie glaciar, lo cual aceleró la fusión e inhibió la acumulación, alterando así el balance de masa glaciar. El periodo de estudio permitió concluir que la actividad eruptiva aceleró el proceso de retroceso, que estaba ocurriendo desde el inicio de los ochentas, y que culminó con la fragmentación del área glaciar. La actividad eruptiva no fue el único factor, también se tiene el factor climático, que aunque en menor medida, también ha influenciado en el retroceso glaciar, (Julio, *et al.*, 2013).



**Figura 22.** Cambios en el área glaciar del volcán Popocatepetl durante el periodo 1996-2001, en la parte inferior izquierda se aprecia el cráter y un domo. El modelo sombreado fue elaborado con base en un modelo digital de elevación correspondiente al año 2000, (Julio, *et al.*, 2013).

## Paisaje

El Popocatépetl y la Iztaccíhuatl, son importantes y necesarios desde el punto de vista ecológico, pero a su vez son de una belleza emblemática y arraigada a la cultura nacional, con un atractivo singular que siempre han sido una fuente de inspiración artística, con múltiples representaciones.

El paisaje de los volcanes han sido inspiración para numerosos artistas, como Dr. Atl quien no solo pintó la belleza de los volcanes (Figura 23) sino también escribió unos poemas inspirados en el volcán Popocatépetl, en un volumen titulado “Sinfonías del Popocatépetl” en el año 1921; el fotógrafo Alemán Hugo Brehme, quien realizo varias fotografías del volcán Popocatépetl entre las que destaca la utilizada para la postal llamada “Popocatépetl desde Iztaccíhuatl” en el año 1930 (Figura 24); José María Velazco, quien pinto numerosas veces a los volcanes destacando sus pinturas llamadas “Valle de México desde el río de los Morales” (1891) y “desde molino del Rey” (1900); el pintor histórico Inglés James Walker con su pintura “Vista del Popocatépetl y el Iztaccíhuatl”; así como pintores contemporáneos como Jorge Obregón Ramos, quien realizó una tesis nombrada “Volcanes de México, una experiencia al aire libre”; entre otros.



**Figura 23.** Pintura realizada por Gerardo Murillo (Dr. Atl) “ El Popocatépetl desde un avión” (1948).



**Figura 24.** Popocatépetl desde Iztaccihuatl , Postal producida por Hugo Brehme en el año 1930.



**Figura 25.** Fotografía del volcán Popocatépetl, de fondo el volcán Iztaccihuatl, foto realizada por National Geographic en el año 2002.

Esa belleza paisajística, la espectacularidad de sus vistas y la grandiosidad de su paisaje, son parte de los atributos que se consideraron para declarar a esta región como uno de los primeros Parques Nacionales de México.

### Características biológicas

La situación geográfica y el intrincado relieve de esta región favorecen su alta diversidad ecológica y gran riqueza biológica que se distribuye en un gradiente altitudinal. La mayor diversidad se encuentra entre los 2 mil 400 y 3 mil 500 metros sobre el nivel del mar (CONANP, 2013).

En la Sierra Nevada se han registrado 467 especies; de las cuales 14 son endémicas y 36 se encuentran bajo alguna categoría en riesgo de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana Nom-059- Semarnat-2010. De las 36 especies en riesgo, 16 están sujetas a protección especial; 18 amenazadas; dos en peligro de extinción, una probablemente extinta en el medio silvestre y 14 de ellas, son endémicas.

Tiene un alto valor por la presencia de endemismos, así como un alto valor como corredor biológico, tal vez el más importante desde el punto de vista transicional, según la CONABIO (Arriaga *et al.*, 2000).

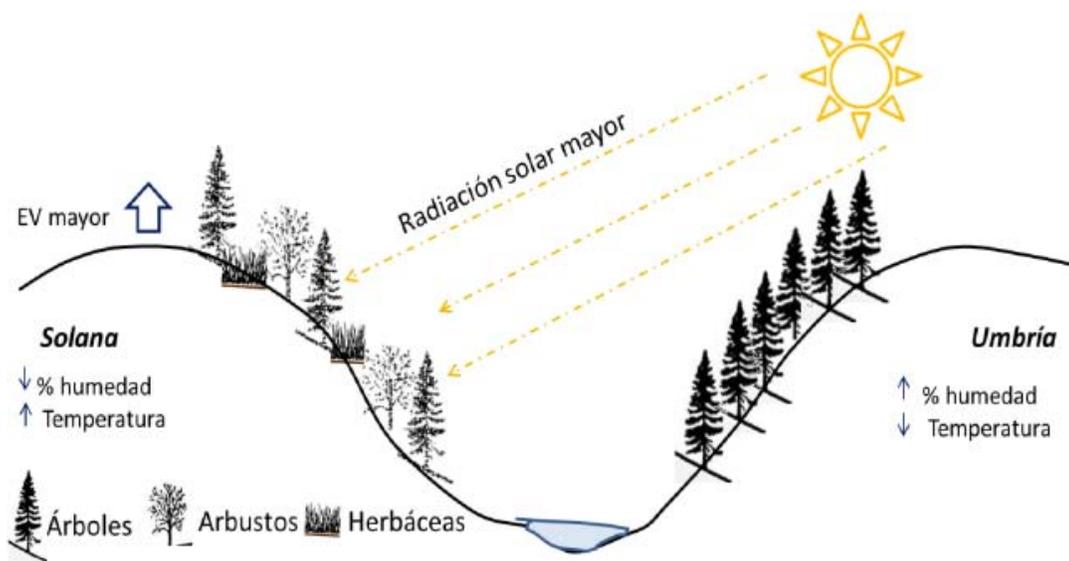
### Vegetación

El Parque Nacional es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación (más de 21 mil hectáreas que representan 52.33 % de la superficie total del parque), sino en la diversidad de su flora y fauna. La permanencia de estos ecosistemas permite la continuidad de los procesos naturales y garantiza la calidad de los servicios ecosistémicos (Cuadro 10), (CONANP,2013).

**Cuadro 10.** Uso de suelo y vegetación en el Parque Nacional Izta Popo (CONANP, 2013).

Uso de suelo y vegetación en el Parque Nacional Izta-Popo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Bosque conservado	21,260	53.39
Bosque con perturbación moderada	844	2.12
Bosque con perturbación alta	2,166	5.44
Superficies con nieve o sin vegetación natural	5,560	13.96
Pastizales	9,662	24.27
Superficies erosionadas	307	0.77
Otros usos	17	0.04
Superficie total	39,819	100.00

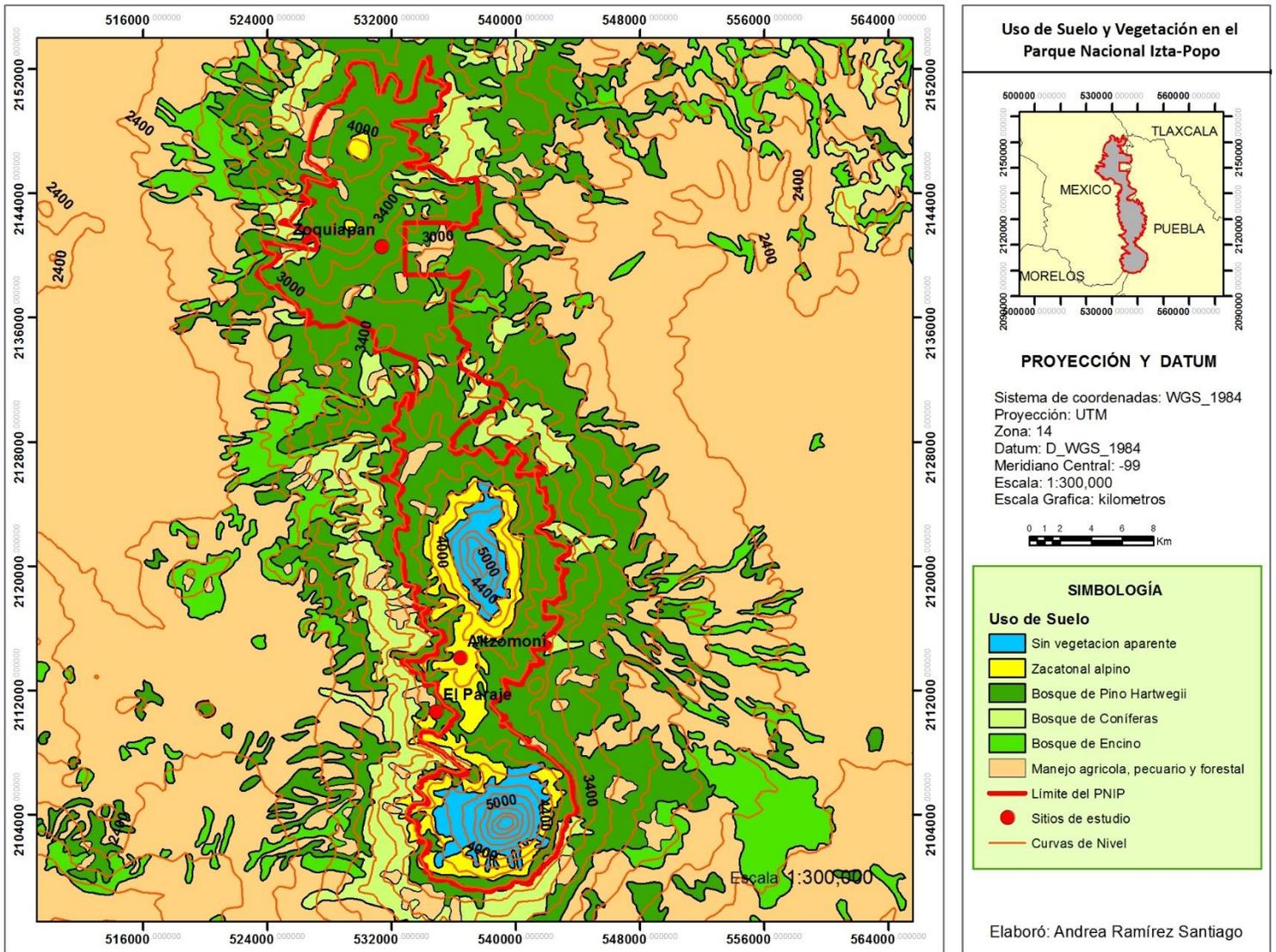
Los bosques de coníferas constituyen la vegetación dominante en el PNIP, los bosques de pino, cedro y oyamel predominan en la ladera umbría, que se caracteriza por tener mayor contenido de humedad en el suelo y temperaturas menores que las que se tienen en las laderas solanas. En cambio la ladera solana tanto en la parte alta como en el pie de la ladera, la vegetación dominante es la arbustiva, esto por su adaptación a una mayor incidencia de luz solar, a un déficit de humedad, a una carga de calor y a pocas precipitaciones, (López, 2014). Es por ello que existe una relación directa entre la exposición de en la ladera y la vegetación dominante (Figura 26); también existe una relación de la vegetación con la altitud y las características hídricas.



**Figura 26.** Afectación de la temperatura, humedad y vegetación por exposición de la ladera, (López, 2014).

En las partes más elevadas sobre los 4500 msnm no existe vegetación debido a las temperaturas extremas las cuales están acompañadas de caída de nieve y granizo; a alturas entre los 4000 y los 4500 msnm en donde las temperaturas aumentan conforme se desciende, se encuentra como vegetación dominante al Zacatonal alpino; a alturas entre los 3500 y los 4000 msnm se establece el bosque de *Pinus hartwegii* tolerante a las temperaturas bajas, frecuentes nevadas y probablemente uno de los pinos más adaptados a los incendios superficiales; a alturas entre los 2300 y los 3500 comienza a aparecer más especies de pinos que dan lugar a las grandes extensiones de bosques, y especies arbustivas, resistentes a temperaturas bajas, (Escamilla, 2007; Franco, 2005; y CONANP,2013).

En general las zonas boscosas dentro del PNIP se caracterizan por ser maduras, estar en buen estado de conservación y por presentarse en una alta densidad sobre todo en las zonas aledañas al Popocatepétl, en gran parte por la restricción de acceso al volcán y en la zona de las cañadas debido al bajo impacto de actividades antropogénicas, (CONANP,2013), esto nos puede mostrar indirectamente que el agua en los suelos en su estado natural está siendo aprovechada por la vegetación.



**Figura 27.** Mapa del uso de suelo y vegetación de acuerdo a Escamilla (2007) y Franco (2005), sobre el mapa base de curvas de nivel de CONABIO, con cotas cada 200 metros.

## **Fauna**

Los altos endemismos de la región han sido atribuidos a las características fisiográficas y de relieve, ya que conforman innumerables hábitats que han actuado como elementos aislantes, lo que ocasiona que muchos animales no puedan migrar fácilmente (CONANP, 2013).

En el Parque Nacional se distribuyen ocho órdenes, 15 familias y 48 especies de mamíferos; una de esas especies es endémica: el zacatuche o teporingo que se encuentra en peligro de extinción (CONANP, 2013).

Los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl están considerados por la CONABIO como Área de Importancia para la Conservación de las Aves. El grupo está representado por 10 órdenes, divididos en 38 familias y 161 especies. De ellas, 10 se encuentran bajo alguna categoría de riesgo de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana Nom-059- Semarnat-2010.

### **2.2. Ordenamiento ecológico del PNIP**

El ordenamiento ecológico del territorio es el instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente así como la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos.

La SEMARNAT junto con los gobiernos de los estados de México, Puebla y Morelos diseñaron el Programa de Ordenamiento Ecológico (2005) para regular el uso del suelo y las actividades productivas con el fin de lograr la conservación del medio ambiente y el desarrollo sustentable de la región.

El Programa Ordenamiento Ecológico es de carácter regional ya que involucra a los tres estados de la República de los que el Parque Nacional forma parte.

El Parque Nacional está comprendido en una sola poligonal, que abarca una superficie de 39 mil hectáreas, pero esta superficie tiene características tanto físico biológicas como socio ambientales diversas que requieren niveles de manejo específicos. De acuerdo a esas características que contemplan el grado de conservación y representatividad de los ecosistema, se han establecido diferentes “subzonas” (Figura 28), en donde se establecen estrategias de operación adecuadas para cada una de ellas. Las subzonas en las que se divide son las siguientes (CONANP, 2013):

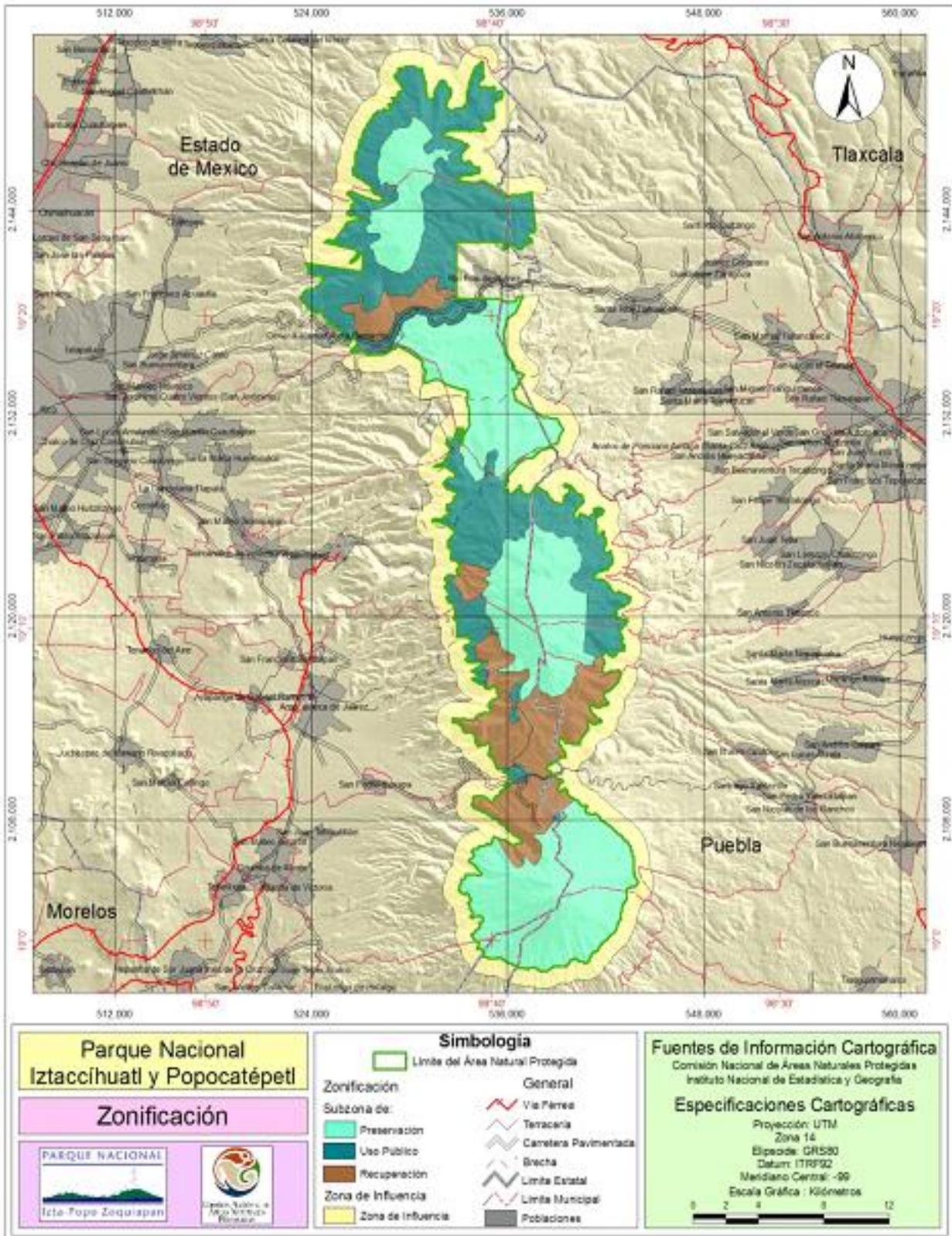


Figura 28. Mapa de Zonificación del Parque Nacional Iztaccíhuatl –Popocatepetl (Tomado de CONANP, 2013).

**I. Subzona de preservación o uso tradicional** Con una superficie total de 18,798.985 has. , conformada por cuatro polígonos: Tláloc-Telapón; Papayo; Volcán Iztaccíhuatl, y Volcán Popocatepetl, que se caracterizan por ser sitios en donde los recursos naturales han sido aprovechados de manera tradicional y continua por la población vecina, sin ocasionar alteraciones significativas en los ecosistemas.

**II. Subzona de uso público** Con una superficie total de 14,415.543 has. , conformada por seis polígonos: Zoquiapan Público; Falda de la Iztaccíhuatl; Nexcoalngo-Nahualac ;Altzomoni; Paso de Cortés, y Tlamacas, que se caracterizan por ser sitios que presentan atractivos naturales para la realización de actividades de recreación y esparcimiento, en donde es posible mantener concentraciones de visitantes en los límites que se determinen con base en la capacidad de carga de los ecosistemas.

En esta subzona hay un mediano grado de conservación debido a las actividades antropogénicas, particularmente la ganadería extensiva y el turismo. El cerro de Altzomoni y Tlamacas por su ubicación geográfica, facilita las Telecomunicaciones, por lo que en existe equipos de telecomunicación del Estado Mayor Presidencial, de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (Capufe) y de otras empresas privadas.

**III. Subzona de Recuperación o Restauración** Con una superficie total de 6,604.558 has, conformada por 4 polígonos: Zoquiapan; Llano Grande el Alto, Caracol-Ayoloco, y Tlamacas-Yolotxóchitl, que se caracterizan porque en ellas los recursos naturales son objeto de programas de recuperación y rehabilitación:

**IV. Zona de Influencia.** Para delimitar la zona de influencia del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl se consideraron las superficies boscosas en buen estado de conservación o susceptibles de restauración que van siguiendo, un anillo o buffer de un kilómetro de separación con respecto a los linderos del parque, delimitándose así un polígono de 17,442.1140 has. que se ubican alrededor de dicha área.

Las tierras aledañas al Parque Nacional pertenecen a ejidos o comunidades y por lo tanto se requiere de la participación directa de los dueños para su conservación y para la conservación a largo plazo de la misma Área Natural Protegida; ya que las acciones que se desarrollan en ellas tienen una estrecha relación con los ecosistemas del área y es en ellos donde las actividades realizadas tienen efectos positivos o negativos hacia la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que prestan.

Este polígono se generó con el fin de responder a las necesidades de atención primaria del parque. En consecuencia, los municipios comprendidos dentro de la zona de influencia son: Texcoco, Ixtapaluca, Tlalmanalco, Chalco, Amecameca, Atlautla y Ecatingo en el Estado de México; Tetela del Volcán en el

estado Morelos; Santa Rita Tlahuapan, San Salvador El Verde, San Felipe Teotlalcingo, Chiautzingo, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos, Calpan, Tianguismanalco, Tochimilco y Atlixco del estado de Puebla.

### 2.3. Problemática Ambiental

La importancia estratégica del PNIP radica en los invaluable servicios ambientales que presta a la macrorregión más poblada del país. Los más importantes son captación y filtración de agua, mitigación de los efectos del cambio climático, protección de la biodiversidad, conservación de suelo, refugio de fauna silvestre, belleza escénica, y generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes (Arriola, 2011).

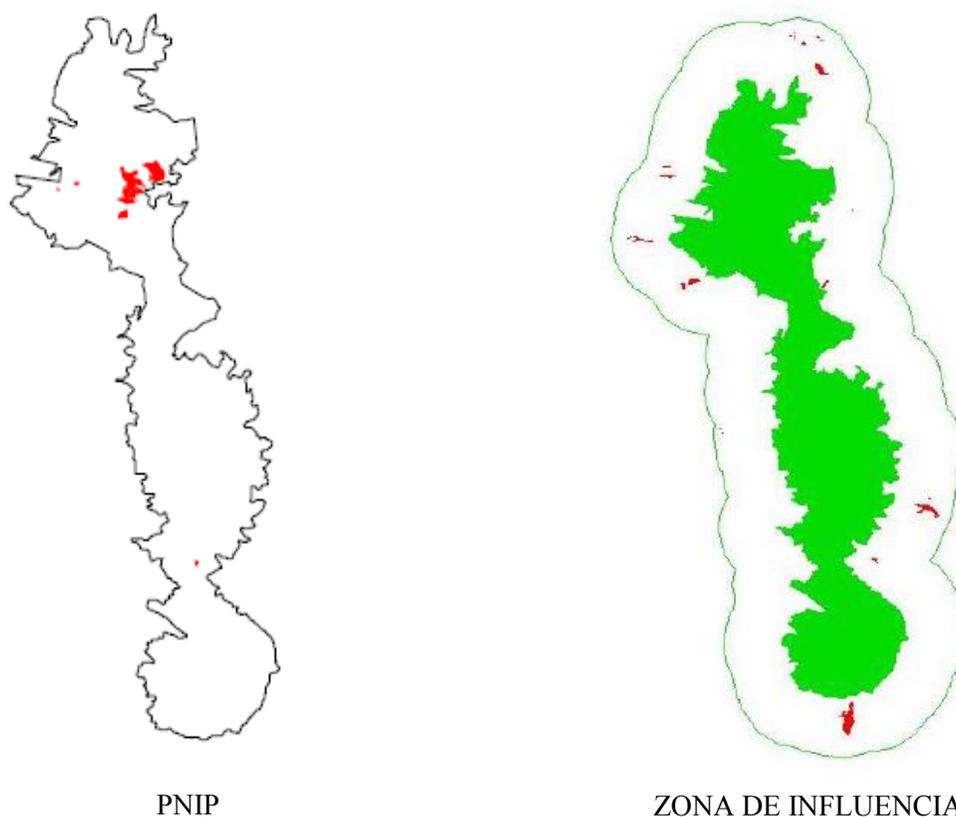
Es por ello que los bosques al ser la vegetación más representativa del PNIP , son lo que brindan mayor estabilidad de los servicios ambientales, ya que contribuyen a la conservación de especies, representan el hábitat para una fauna diversa de mamíferos, aves, reptiles, anfibios e insectos y de recursos no maderables útiles como hierbas y micorrizas (Spurr y Barnes, 1980).

Sin embargo, las perturbaciones y cambios en la cobertura dentro del PNIP que apuntan a lugares específicos y predominan en el sentido de degradación de los ecosistemas más que a los cambios entre tipos de uso de suelo, y la compleja dinámica social que se vive en la zona de influencia, ha provocado un desequilibrio ecológico que atenta contra la calidad de sus servicios ambientales (CCMSS, 2008).

En el análisis de imágenes satelitales realizado por el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS) llamado “Estudio sobre las condiciones territoriales y su percepción del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas” se detectó que en el periodo del 2000 al 2007 hubo cambios en un total de 511.7 ha. (Figura 29) , los bosques de pino, que cubren más del 50 % del territorio del PNIP es la clase en donde se manifestaron los cambios más relevantes en cuanto a superficie. Así, el ejemplo más notable es la clase de bosque de pino denso que perdió un total de 300.413 ha, lo que nos arroja un ritmo de 42.9 ha /año. En contraposición, las clases de pastizales que cubren poco más del 25% del parque, manifestaron en general ganancias relativas.

En el estudio llamado “Variación temporal del límite superior del bosque en el volcán Iztaccíhuatl” realizado con fotografías aéreas de 1955, Ortofotos de 1993 e imágenes de Google Earth de 2012, se compararon los límites de los bosques en el volcán, en donde se muestra que para 1955 el límite superior del bosque se ubicó en promedio a los 3983 m, los árboles más altos se encontraron a 4005 m., en total de

1995 a 2012 el límite ascendió 30 m , en los primeros 38 años del periodo estudiado ascendió 12 m, en comparación con los últimos 19 años en los que el ascenso fue de 17 m (Torres y Vázquez, 2013).



**Figura 29.** Localización de cambio de uso de suelo (en rojo) detectados dentro del Territorio del PNIP, y en su zona de influencia, en el periodo 2000-2007, (CCMSS, 2008).

El CCMSS en paralelo al análisis del territorio del parque nacional, muestra resultados del cambio de la zona de influencia del parque (Figura 29). En ésta zona se observaron cambios principalmente en el territorio que se encuentra cubierto por bosques, la región de agricultura no mostró cambios significativos y el uso urbano se mantuvo estable, se observa la tendencia a la degradación de los ecosistemas especialmente en los bosques de pino y oyamel en sus diversas asociaciones, debido a la pérdida de densidad en su cobertura. Por otra parte en cuanto a cambios de uso, la agricultura cedió territorio a cuerpos de agua, a minería y principalmente a pastizales lo que indica un abandono de este tipo de actividad. En los pastizales se mostraron cambios de detrimento al ceder territorio para la extracción de materiales pétreos y una pequeña fracción para agricultura, de manera positiva existieron cambios de pastizales a bosque de pino.

Entre los factores que influyen en la modificación del uso de suelo están los incendios forestales, los cuales han sido una de las principales causas del deterioro de estos ecosistemas en el PNIP (Cedeño, 1999), en

gran medida provocados por técnicas agrícolas no sustentables, como la “roza, tumba y quema”, aunque también se presentan casos de incendios accidentales provocados por las y los usuarios y visitantes del parque (CONANP, 2013).

Tan solo en el periodo de tiempo del 2005 al 2009 , el Estado de México registro 949 incendios y 4651 ha de superficie afectada, de la cual el 50 % de la superficie afectada durante los 4 años perteneció al estrato arbustivo, afectando los municipios de Ixtapaluca, Chalco, Texcoco, Tlalmanalco y Amecameca, municipios pertenecientes a la vertiente occidental del PNIP (Hernández, 2009).

En el año 2010 se registraron 1108 incendios en el Estado de México, ubicando al estado como una de las entidades con mayor incidencia de incendios y declarando al PNIP como una zona de alto riesgo (PROBOSQUE, 2011).

Otro factor es la tala ilegal, la cual ha devastado grandes superficies de bosque y fragmentado los ecosistemas, principalmente en la zona de influencia. (CONANP, 2013).

En el caso de la perturbación de los pastizales, la ganadería en la región es el factor principal ya que el ganado pocas veces está estabulado y pasta sin control dañando los ecosistemas al compactar el suelo y destruir el arbolado joven. En la zona de pastizales, en las partes altas, aún es frecuente el pastoreo extensivo de ganado vacuno. (CONANP,2013).

## 2.4. Coordinación institucional y programas de conservación ambiental en el PNIP

Para el uso y conservación del parque se han establecido acuerdos de coordinación con los gobiernos de los estados de los cuales forma parte, y de colaboración con diferentes dependencias y entidades tanto del sector ambiental como de otros ámbitos y de los tres niveles de gobierno (CONANP, 2013).

Con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se tienen acuerdos a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), el Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable (CECADESU) y las delegaciones en los tres estados, para proyectos de restauración ecológica y ordenamiento territorial.

Con las delegaciones de la PROFEPA en la Zona Metropolitana y en los estados de México, Puebla y Morelos hay acciones de inspección y vigilancia y de organización comunitaria para el cuidado de los recursos naturales; la CONAFOR financia proyectos de restauración ecológica; y el CECADESU proporciona diversos materiales relacionados con la educación para la conservación.

Con SAGARPA existen convenios de colaboración para facilitar apoyo técnico a proyectos de restauración agroforestal y proveer financiamiento a propuestas agroforestales, ambos en la zona de influencia del parque.

La Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México (SEGEM) apoya proyectos de restauración y de ordenación ecológica en la zona de influencia. La Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE) apoya proyectos de restauración ecológica y hay colaboración para acciones de inspección y vigilancia.

En el Programa de Manejo del Parque Nacional Izta-Popo (2013) se desarrollan programas de conservación ambiental, estableciéndose para cada uno de ellos los objetivos, metas, actividades y acciones específicas, derivados del diagnóstico de la situación actual de los ecosistemas y su biodiversidad del Área Natural Protegida y del análisis de la problemática.

Los Programas de conservación ambiental son los siguientes:

### **Protección**

Este subprograma se enfoca en la prevención, el control y combate de los impactos negativos que inciden en la degradación y destrucción de los recursos naturales; en la conservación de las especies y sus hábitats y en la permanencia de los ciclos ecológicos y biogeoquímicos que aseguran la continuidad de los procesos evolutivos de la biota.

### **Manejo**

El Manejo es el conjunto de políticas, estrategias, programas y regulaciones establecidas con el fin de determinar las actividades y acciones de conservación, protección, aprovechamiento sustentable, investigación, producción de bienes y servicios, restauración, capacitación, educación, recreación y demás actividades relacionadas con el desarrollo sustentable en las Áreas Naturales Protegidas.

Entre sus estrategias están el promover la aplicación del Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl y su Zona de Influencia y , promover el pago por servicios ambientales en la zona de influencia del Parque Nacional como una alternativa de obtención de recursos financieros para las comunidades interesadas en la protección de los ecosistemas.

## Mantenimiento de servicios ecosistémicos

Este programa plantea las actividades y acciones a desarrollar a fin de mantener los servicios ecosistémicos del Parque Nacional y conservar el ecosistema forestal con el fin de retener la humedad, recargar los acuíferos y prevenir la erosión.

El objetivo general es recuperar y restablecer las condiciones ecológicas previas a las modificaciones causadas por las actividades humanas o fenómenos naturales, permitiendo la continuidad de los procesos naturales en los ecosistemas del PNIP.

Sus estrategias son: identificar los ecosistemas impactados del parque mediante un diagnóstico de los mismos, determinar las acciones necesarias de restauración y/o rehabilitación de sitios impactados.

El valor estratégico de la región en la prestación del servicio ecosistémico del agua, ha llevado a la implementación del proyecto “Fábrica de Agua”, que consiste en la construcción de zanjas de infiltración en las laderas de las montañas, el cual es una iniciativa conjunta de los sectores social, público y privado que ha permitido la suma de esfuerzos así como de recursos para realizar un proyecto de atención integral, orientado a la conservación de los recursos naturales y el desarrollo sustentable del Parque Nacional y su zona de influencia, en el corto, mediano y largo plazos.

**Cuadro 11.** Actividades y acciones del programa de mantenimiento de servicios ecosistémicos en el Parque nacional Izta-Popo (Tomado de CONANP, 2013).

Actividades* y acciones	Plazo
<i>Propiciar la realización de estudios para evaluar los bienes y servicios ambientales del parque</i>	
Evaluar la capacidad de captura de carbono del Parque Nacional	M
Promover ante diversas instituciones, la elaboración del inventario de la biodiversidad del parque	M
<i>Difundir la importancia de los servicios ecosistémicos</i>	
Transmitir la importancia de los servicios ecosistémicos entre los habitantes del área de influencia y las y los visitantes	P
<i>Continuar con el proyecto la “Fábrica de Agua”</i>	
Evaluar los 10 años de la “Fábrica de Agua”	C
Determinar, a partir de la evaluación del proyecto, las líneas a seguir	M
Mantener la participación de las empresas que participan en el proyecto	P
Incrementar la participación de la iniciativa privada en el proyecto	P

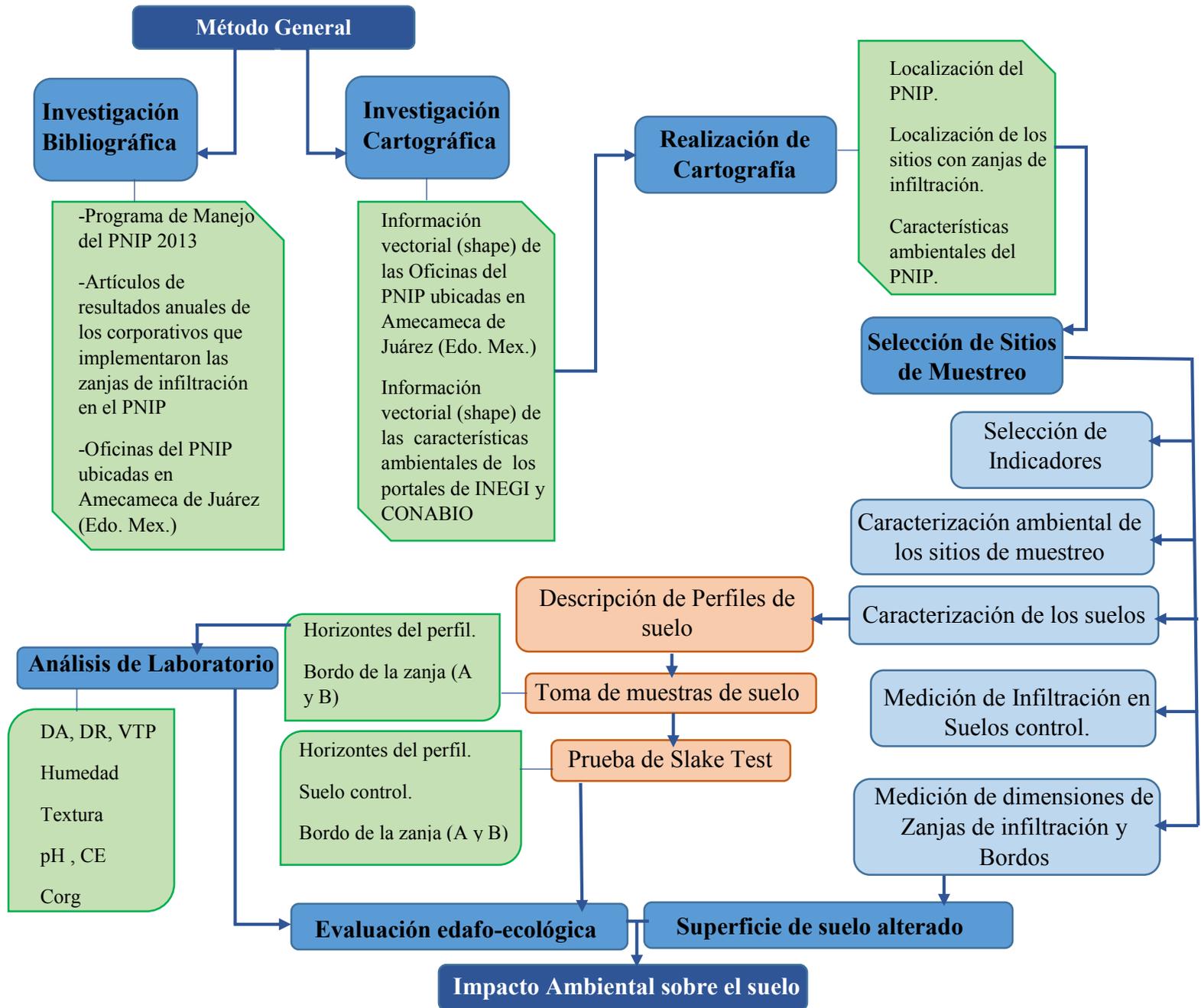
\*Las actividades se presentan en letra cursiva.

**Cuadro 12.** Actividades y acciones del Proyecto Fabrica de Agua en el PNIP (Tomado de CONANP, 2013).

Actividades* y acciones	Plazo
<i>Determinar las estrategias de conservación del recurso agua</i>	
Efectuar, en coordinación con el sector académico, de investigación, organizaciones de la sociedad civil y autoridades competentes, un diagnóstico del uso y estado del recurso hídrico en el parque	L
Desarrollar y aplicar un programa para la conservación, protección y restauración de cuencas hidrológicas	L
Determinar acciones para mejorar la calidad del agua en los acuíferos	P
Desarrollar un programa para el manejo de escurrimientos y control de la erosión	M
Dar seguimiento a las obras de retención de agua	P
<i>Determinar las estrategias de conservación del recurso suelo</i>	
Efectuar, en coordinación con el sector académico, de investigación, organizaciones de la sociedad civil y autoridades competentes, un diagnóstico del uso y estado del recurso suelo en el parque	L
Desarrollar un programa para monitorear la pérdida de suelo por erosión	P
Realizar talleres con los usuarios del agua y el suelo sobre el cuidado y manejo de estos recursos incluyendo a los habitantes de la zona de influencia	P
Fomentar el uso y manejo sustentable del suelo y del agua en coordinación con las delegaciones de la SEMARNAT, la CONAGUA y la CONAFOR	L
Realizar obras de conservación de suelo en superficies afectadas como presas de morillo, presas de roca, terrazas, entre otros	P
Realizar obras para el control de escorrentías y corrección de cárcavas	P

# CAPÍTULO 3: IMPACTO AMBIENTAL EN SUELOS

## 3.1. Metodología



**Figura 30.** Esquema del método general que se siguió para llevar a cabo la evaluación sobre el impacto ambiental que las zanjas de infiltración tienen sobre los suelos del PNIP.

## **Investigación Bibliográfica y Cartográfica**

Se realizó una investigación bibliográfica del Programa de Manejo del PNIP más reciente, correspondiente al 2013, para conocer los diferentes proyectos que implementaron la construcción de zanjas de infiltración dentro del PNIP.

Para conocer los objetivos que perseguía la construcción de las zanjas de infiltración, se realizó una investigación de los artículos (generalmente de resultados anuales) de los distintos corporativos que implementaron las zanjas de infiltración en el PNIP y su zona de influencia.

Se obtuvo información directamente del personal del PNIP con oficinas en Amecameca de Juárez, Edo. de México, sobre los de los proyectos que se han llevado a cabo entre los años 2000 y 2013. La información que se obtuvo fue: nombre de los proyectos, nombre del corporativo que implemento el proyecto, año de implementación, cantidad total de zanjas construidas y superficie construida de zanjas.

Se recopiló información cartográfica (vectores en formato shape) directamente proporcionada por el personal de las oficina del PNIP (ubicadas en Amecameca de Juárez, Edo. de México), con la georeferenciada del polígono que delimita el PNIP, así como de las coordenadas de la localización y delimitación de las áreas en donde se han llevado a cabo los proyectos de construcción de zanjas de infiltración.

Se recopiló información vectorial en formato shape de las características ambientales (climas, tipos de suelo, usos de suelo, vegetación y geomorfología) a nivel Nacional, tanto del portal de INEGI como de CONABIO, con el fin de elegir los datos vectoriales más detallados.

De la página del SMN (CONAGUA, 2015) se localizaron las estaciones meteorológicas más cercanas a los sitio de estudio de las cuales se recopiló información de clima, temperatura y precipitación.

Para los sitios de Alzomoni y El Paraje, se utilizó la información de la estación climatológica de Atlautla Repetidora T.V. con coordenadas X: 538530.00 y Y: 2113967.00, a una altitud de 2,365 msnm; la estación se encuentra a una distancia de 2129.46m (Planar) y a una diferencia en altitud de 1409 msnm respecto a Alzomoni; y a una distancia de 4 909.85m (Planar) y con una diferencia en altitud de 1135 m. con respecto al sitio de El Paraje, por lo que la información de esta estación es más representativa para el sitio de El Paraje por tener una menor diferencia altitudinal.

Para el sitio de Zoquiapan, se utilizó la información de la estación meteorológica de Rio Frio, Ixtapaluca con coordenadas X: 534688.00 y Y: 2139864.68, a una altitud de 2,977.0 msnm., la estación se encuentra a una distancia de 3735 m (Planar) y con una diferencia en altitud de 468 m. con respecto al sitio.

Posteriormente con la información de cada una de las estaciones (clima, temperatura y precipitación) se construyó un climograma.

### **Realización de la Cartografía**

Se reproyectaron y georreferenciaron en un mismo sistema de coordenadas, las capas vectoriales (en formato shape) obtenidas de las oficinas del PNIP y las capas vectoriales (en formato shape) obtenidas de INEGI y CONABIO.

Para conocer las características ambientales particulares del PNIP y de los sitios con construcción de zanjas de infiltración, se realizaron mediante ArcMap (ArcGIS 10.1) “CLIPS” (en base a los polígonos tanto del PNIP como de los sitios con zanjas de infiltración) de las diferentes capas shape de INEGI y CONABIO con las características ambientales del país.

Mediante la realización de los CLIPS del polígono del PNIP, se elaboraron en ArcMap (ArcGIS 10.1) los mapas de: localización del PNIP, localización de los sitios con construcción de zanjas de infiltración y los mapas de las características ambientales del PNIP (tipos de climas, tipos de suelo y uso y vegetación del suelo).

### **Descripción y muestreo de suelos en campo (por sitio de estudio)**

Una vez cartografiados todos los sitios con zanjas de infiltración, y conocidas de manera general las características ambientales de los sitios, se realizó un recorrido por los sitios en donde se han implementado zanjas de infiltración, y con base a ello se seleccionaron 3 sitios de estudio (1: Altzomoni; 2: El Paraje y 3: Zoquiapan), con distintas características. (Cuadro 13).

En el caso del sitio de estudio 3: El Paraje, a pesar de no estar dentro del Parque Nacional Izta-Popo, se escogió por ser una de las áreas pertenecientes al “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua” realizado por Pronatura en colaboración con los Bienes Comunes de Amecameca, y por estar dentro de la zona de influencia del Parque Nacional Izta-Popo.

**Cuadro 13.** Diferencias ambientales de los sitios de estudio.

Sitios de estudio.	Material Parental	Precipitación Media Anual	Pendiente	Altitud	Exposición	Vegetación	Posición en el relieve	Corporativos que implementaron zanjas de infiltración
Altzomoni PNIP	Ceniza Volcánica	950.9 mm	28 %	3774 msnm	Sureste	Pastizal alpino presencia de aforestación	Ladera Alta	CONAFOR Televisa VW
El Paraje Zona de Influencia	Ceniza Volcánica	950.9 mm	25 %	3500 msnm	Suroeste	Zacatonal con presencia de especies arbustivas y herbáceas	Ladera media	Pronatura Bimbo CONAFOR
Zoquiapan PNIP	Ceniza Volcánica	972.2 mm	27 %	3445 msnm	Suroeste	Especies Forestales.	Ladera media	Pronatura CONAFOR Coca-Cola

Para llevar a cabo la evaluación de impacto ambiental que genera la construcción de zanjas de infiltración, se identificaron variables que permitieran describir efectos sobre el funcionamiento del suelo (Cuadro 14).

Una vez seleccionados los indicadores a utilizar, se realizó en cada uno de los sitios:

-La caracterizaron de las condiciones ambientales: material parental, precipitación anual, pendiente, altitud, exposición de la ladera y vegetación.

-Una descripción de un perfil de suelo (Siebe *et al.*, 2006), en donde se describió de manera general el sitio (pendiente, posición en la ladera, coordenadas, etc.) y de manera particular las características del suelo (horizontes: espesor, textura, color, pH, estructura, densidad aparente, densidad de raíces, forma y abundancia de poros, y estabilidad de agregados). La descripción completa del perfil se observa en las hojas de campo, (Anexo 1: Sitio 1-Altzomoni; Sitio 2-El paraje y Sitio 3-Zoquiapan).

-La toma de 1 muestra de suelo, con cilindros de volumen conocido, por cada uno de los horizontes de los perfiles, para la determinación en laboratorios de Densidad aparente, Retención de Humedad, Textura, pH, C.E. y Carbono Orgánico.

**Cuadro 14.** Indicadores utilizados para evaluar algunos impactos o efectos de las zanjas de infiltración sobre las funciones del suelo.

Función del suelo	Probables efectos	Indicadores
Documento histórico del paisaje	Destrucción de los horizontes del suelo.	Perfil del suelo
Soporte de vegetación	Reducción de la calidad del suelo	Pérdida de suelo, DA, porosidad, estructura, capacidad de retención de humedad, infiltración
Hábitat de organismos	Reducción de la calidad del suelo	Carbono Orgánico
Regulador del ciclo hidrológico	Modificación de la infiltración	DA, porosidad, estructura, estabilidad de agregados, infiltración.
Capacidad de filtrar, amortiguar y transformar (fijación de gases de efecto invernadero)	Disminución de secuestro de carbono.	Carbono Orgánico Textura pH
Almacén y reciclador de nutrientes	Disminución de la fertilidad	Nitrógeno y Carbono.

-La toma de 6 muestras de suelo, con cilindros de volumen conocido, en sitios control (misma unidad de paisaje, sin zanjas de infiltración) o áreas no influenciadas por las zanjas, para la determinación en laboratorio de Densidad aparente, Volumen total de poros, Retención de humedad y Carbono Orgánico.

-La toma de muestras de suelo, con cilindros de volumen conocido, para la determinación de la Densidad aparente, Densidad real, y Carbono Orgánico de 3 bordos por sitio. Debido a que el Bordo de la zanja corresponde al suelo que se ha excavado de la zanja y que se coloca en la parte superior (el suelo superficial de la zanja queda en la parte baja del bordo) se dividió en Bordo A (suelo superficial del bordo, formado por el suelo de los horizontes más profundos de la zanja) y Bordo B (suelo subsuperficial del bordo, formado por el suelo de los horizontes más superficiales de la zanja), por lo que se obtuvieron 6 muestras de suelo de Bordo por sitio (3 de BordoA y 3 de BordoB).

**Cuadro 15.** Cantidad y tipo de muestras de suelos tomadas para análisis de laboratorio.

Sitio	Perfil de suelo	Tipo de Muestra		
		Bordos A	Bordos B	Suelos Control
Altzomoni	5 muestras	3 muestras	3 muestras	6 muestras
El Paraje	4 muestras	3 muestras	3 muestras	6 muestras
Zoquiapan	4 muestras	3 muestras	3 muestras	6 muestras

-Se realizaron pruebas de Slake Test (Figura 31), la cual mide la estabilidad de los agregados del suelo cuando se expone a humedad rápida (USDA, 1999). Esta prueba se midió tanto en los agregados del suelo de los horizontes del Perfil como en los agregados del suelo de los Bordos.



**Figura 31.** Agregados y contenedor, utilizados para la medición de la prueba de Slaketest.

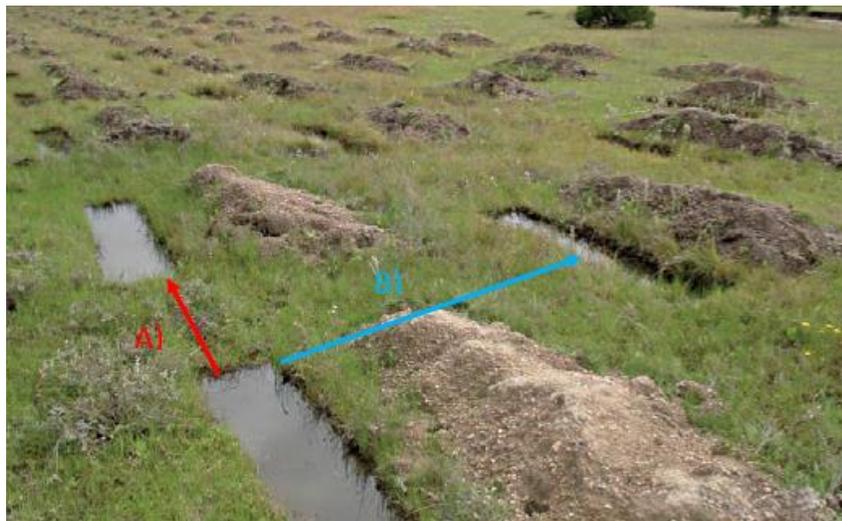
-Se realizó la descripción de las zanjas de infiltración, así como las mediciones (con cinta métrica) de ancho, largo y profundidad de 9 zanjas (Figura 32); el cálculo cualitativo del porcentaje de azolvamiento de las mismas; las características particulares de cada zanja (observaciones).

- Se realizó la descripción; y las mediciones (con cinta métrica) de ancho y largo de los bordos (correspondiente al suelo excavado y colocado en la parte superior) de 9 zanjas de infiltración (Figura 32).

- Se realizaron las mediciones de la distancia frontal (esta se midió del talud del bordo de una zanja al talud frontal del bordo de la zanja continua) y lateral (distancia entre las caras laterales de la zanja) de 9 zanjas de infiltración (Figura 33).



**Figura 32.** Medición de las dimensiones de las zanjas de infiltración y de los bordos: a) longitud de la zanja; talud frontal al bordo b) ancho de la zanja; cara lateral de la zanja c) profundidad de la zanja, d) ancho del bordo; talud de bordo y e) largo del bordo.



**Figura 33.** Medición de la distancia entre zanjas: A) distancia lateral, B) distancia frontal.

- Dado que las zanjas de infiltración se construyeron como una medida para infiltrar agua, se procedió a evaluar también la velocidad de infiltración, la capacidad de campo y la estabilidad de agregados (Siebe, et al. 2006). Para medir la velocidad de infiltración que tiene el suelo en condiciones naturales (Suelo control) se utilizó un infiltrómetro de doble anillo marca Turf\_Tec International (Figura 34), que mide la velocidad en condiciones de saturación del suelo. Para ello se seleccionaron 4 sitios no disturbados (suelo control) en diferentes partes de la ladera (ladera alta, media alta, media baja y baja) en cada uno de los sitios de estudio, en los cuales se colocó el Infiltrómetro, se saturó el suelo con agua; y una vez saturado el suelo se tomaron las lecturas de velocidad de infiltración hasta que éstas fueron constantes, mínimo 3 lecturas continuas con el mismo resultado, (ver en Anexo 6).



**Figura 34.** Infiltrómetro de doble anillo utilizado para la prueba de velocidad de infiltración.

## Análisis de laboratorio

**Cuadro 16.** Análisis de laboratorio por tipo de muestra.

Tipo de Muestra	DA	DR	VTP	Hum CC	Textura	pH	CE	Corg
Perfil	*	*	*	*	*	*	*	*
Bordo A	*	*	*	*				*
Bordo B	*	*	*	*				*
Control	*	*	*					

El pre tratamiento de muestras y los análisis de densidad aparente, densidad real, retención de humedad, pH y conductividad eléctrica se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos del Instituto de Geografía, UNAM; el análisis de Textura se realizó en la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias, UNAM; y el análisis de carbono orgánico total se cuantificó en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Geología.

**Cuadro 17.** Métodos utilizados en laboratorio.

Determinación	Método	Fuente
Densidad aparente (DA)	Densidad aparente (DA): determinación gravimétrica usando muestras inalteradas tomadas con cilindros de 100 ml de capacidad después de secar la muestra a 105 °C hasta obtener peso constante.	Schlichting <i>et al.</i> , 1995.
Densidad Real (DR)		Black, 1965.
Porosidad	Densidad real (DR): determinación gravimétrica con picnómetros.	ISRIC, 1992.
	Porosidad total: se calculó a partir de la densidad real (DR) y aparente (DA) según la siguiente ecuación (Schlichting <i>et al.</i> 1995): porosidad total = $100 - ((DA \times 100)/DR)$	
Carbono orgánico total	Con el Analizador Elemental CHNS/O.	Sikora <i>et al.</i> , 1996.
pH	Valor pH: el valor pH de las muestras de suelo se determinó potenciométricamente en una solución de cloruro de calcio 0.01 M en el sobrenadante de una suspensión relación suelo: solución de 1 a 2.5 a temperatura ambiente	Schlichting <i>et al.</i> , 1995.
Humedad del suelo	Determinación gravimétrica usando muestras de suelo tomadas con cilindros de 100 ml de capacidad. Esta medida se obtiene de pesar la muestra de suelo, secar la muestra a 105 °C, y volver a pesar la muestra hasta obtener peso constante.	Ortiz <i>et al.</i> , 1980.
Textura	Método de Bouyoucos, el cual determina la distribución de tamaños de partículas minerales del suelo fino (tamizado <2mm).	Bouyoucos, 1963.
Conductividad eléctrica (CE)	La muestra se mezcla con agua destilada/desionizada y se mide la CE de la solución acuosa. Conductímetro suelo: agua proporción 1:2.5	SSSa Book, 1996.
Estabilidad de Agregados	Slaketest o El ensayo de desleimiento mide la estabilidad del suelo cuando es expuesto a una humectación rápida; este ensayo es cualitativo y debe ser medido en fragmentos o agregados secados al aire.	USDA, 1999a.

Se procesaron 20 muestras provenientes del perfil, control, fondo y bordo en Altzomoni, 19 muestras en El paraje y 19 muestras en Zoquiapan.

Las muestras de suelo fueron secadas a temperatura ambiente, tamizadas con una malla de 2 mm de abertura y colocadas en charolas de aluminio.

Para todas las muestras colectadas, se realizaron en laboratorio los análisis de densidad aparente (DA), densidad real (DR), y volumen total de poros (VTP).

Para las muestras de los horizontes de perfil de suelo y de los bordos (Bordo A y B), se agregaron los análisis en laboratorio de porcentaje de humedad a capacidad de campo y porcentaje de Carbono Orgánico.

Y solo para las muestras de horizonte de Perfil se determinaron los análisis en laboratorio de pH, CE y textura. Los controles de calidad utilizados para estos 3 métodos fueron repeticiones por duplicado en cada una de las muestra, una muestra control (blanco) y la calibración de los equipos de pH y CE.

### **Análisis de resultados**

Para la evaluación de resultados se hizo una descripción estadística de los datos, y una comparación gráfica entre los 3 sitios de estudio, con análisis de varianza (Anexo 3).

Con los datos de la descripción del perfil (campo y laboratorio) se realizó una evaluación edafocológica según Siebe et al 2006, en cada uno de los sitios de estudio.

Se calculó la cantidad de suelo removida (ton/ha) y la cantidad de Corg que puede quedar expuesto a la intemperie (ton) por la excavación de las zanjas según la cantidad que se hacen en una hectárea. Para ello se utilizó el dato de D.A. y el contenido de Corg obtenidos del perfil de suelo utilizando la siguiente fórmula (Cotler *et al.*, 2015):

1. Volumen del horizonte ( $\text{cm}^3$ )= [ancho de zanja: 40 cm] \* [espesor del horizonte (cm)] \* [largo de zanja: 200 cm].

2. Peso de suelo removido (kg)= [Volumen del horizonte (1)] \* [DA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) /1000]. La densidad aparente corresponde al horizonte y no a la media del perfil.

Se calculó el promedio del Peso de suelo removido por zanja (ton) y el promedio del Peso de suelo removido por sitio (ton).

4. Corg expuesto (kg)= [Peso de suelo removido (2)] \* [Corg (%)/100]. El % de Corg corresponde al horizonte y no a la media del perfil.

Se calculó el promedio del Corg expuesto por zanja (%) y el promedio del Corg expuesto por sitio (%).

5. Peso del total del suelo removido por hectárea (ton/ha)= [número de zanjas por hectárea en cada uno de los sitios] \* [Promedio de peso de suelo removido por sitio (ton)].
6. Corg expuesto por hectárea (%) = [número de zanjas por hectárea en cada uno de los sitios] \* [Promedio del Corg expuesto por sitio (%)].

## 3.2. Resultados

### 3.2.1. Zanjas de Infiltración en el PNIP

La Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP) reconoce que el PNIP tienen un valor estratégico al ser un prestador de un sin número de servicios ecosistémicos, particularmente por la capacidad como regulador del ciclo hidrológico, mismo que abastece a millones de personas e importantes valles agrícolas. Es por ello que el proyecto emblema del PNIP “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha (o fabrica) de Agua”, en el cual participaron diversos grupos corporativos en distintas zonas del PNIP (Cuadro 18, Figura 35), tienen como objetivo incrementar la recarga de agua proveniente del PNIP.

El proyecto consistió en implementar dos actividades importantes para incrementar la recarga de acuíferos: en primer lugar la reforestación, y en segundo lugar la construcción de zanjas de infiltración en las laderas de las montañas. Estos dos actividades en su conjunto constituyen uno de los programas más ambiciosos a nivel nacional para capturar y recargar los mantos acuíferos con participación de la iniciativa privada, el gobierno y la sociedad civil organizada, (Cota *et al.*, 2011).

Posterior a su implementación Eduardo Cota junto con sus colaboradores en su artículo “Recarga de acuíferos mediante la construcción de tinajas ciegas” aseguraban un aumento en la humedad del suelo y el resurgimiento de algunas escorrentías de agua y manantiales que ya se encontraban secos. Así mismo mencionaron que mediante estudios geofísicos se calculó la cantidad de agua de lluvia infiltrada hacia los mantos acuíferos, mismos que demostraron que no hay capas impermeables en los sitios en que se construyeron las tinajas ciegas y que por lo tanto, el agua que se está captando por estas llega eventualmente a los acuíferos. Sin embargo no se hace referencia a los artículos que muestran tales resultados, no se menciona cual fue la metodología utilizada, ni se menciona quienes realizaron dichas evaluaciones.

A nivel mundial existen estudios que indican que las zanjas de infiltración propician almacenamiento de agua de lluvia en zonas áridas y semi-áridas (Critchley y Siegert, 1991), que son capaces de captar el agua que escurre y a su vez disminuir los procesos erosivos (Pizarro et al., 2004; Anaya et al., 1991), que sirven para la reducir de la longitud del recorrido de agua (Taboada, 2011); para mejorar la eficiencia del uso de agua de la precipitación (Bulcock y Jewitt, 2013); para la conserva de agua, producción de biomasa y aforestación en ambientes degradados (Singh et al., 2013) y para regular el agua de escorrentía en zonas urbanas (EPA, 1999; Bhagu et al., 2012).

En el Programa de Manejo del PNIP (2013), la CONANP describe que el objetivo de las zanjas es mantener la calidad de los servicios ambientales que prestan los ecosistemas del PNIP, haciendo referencia que a través de las zanjas se puede por un lado conservar la humedad del suelo y así favorecer el crecimiento de los árboles o mejorar la supervivencia de los arboles reforestados; y por otro lado retrasar y reducir el flujo de escurrimiento superficial del agua pluvial y de deshielo permitiendo así su infiltración y percolación hasta alcanzar el manto freático.

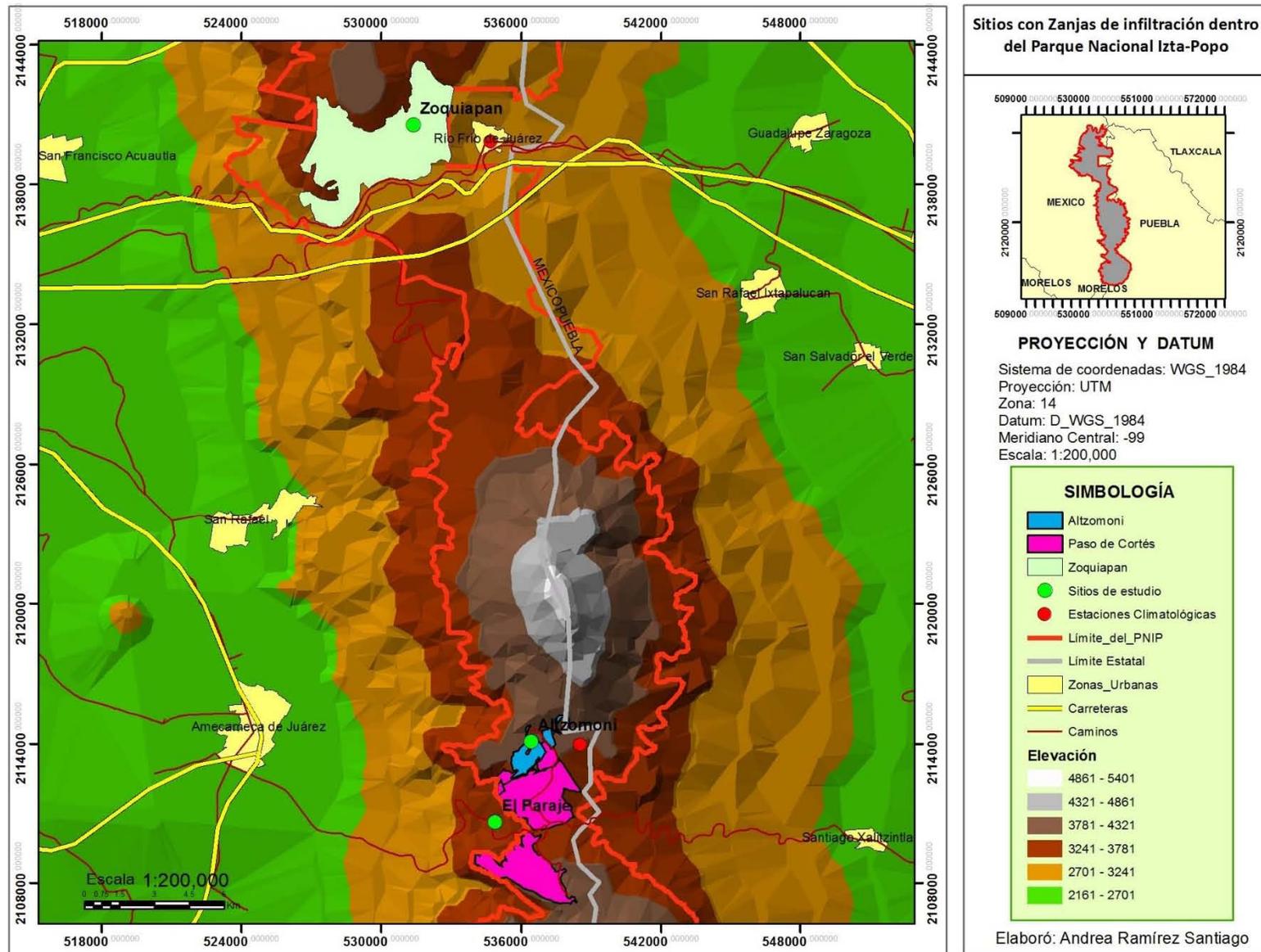
En México tanto CONAFOR, PRONATURA, CONANP y grupo COCA-COLA en sus artículos relacionados a la implementación de zanjas de infiltración como un obra de cosecha de agua, mencionan que la construcción de las zanjas ayudara a la captura del agua de lluvia, misma que llegara a los mantos acuíferos, y a su vez evita la erosión del suelo al retener el suelo que se desprende .laderas arriba. Sin embargo no existe ningún tipo de artículo o investigación científica que demuestre que % de agua de lluvia es captada por las zanjas de infiltración, que % de esta agua va directo a los mantos acuíferos, ni qué % de suelo es capturado por la zanja para evitar la erosión.

Tampoco se han realizado dentro del PNIP periodos de evaluación a las zanjas que permitan hacernos saber si están cumpliendo sus objetivos.

Dentro del Parque nacional Izta-Popo se han implementado las zanjas de infiltración en 3 grandes áreas principalmente: Alzomoni, *Paso de Cortés*, y Zoquiapan (Figura 35) construidas en distintos años, con diferente duración en sus periodos de construcción, y a cargo de diversos grupos corporativos, (Subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014), (Cuadro 18).

**Cuadro 18.** Resumen de la implementación de las zanjas de infiltración dentro del PNIP.

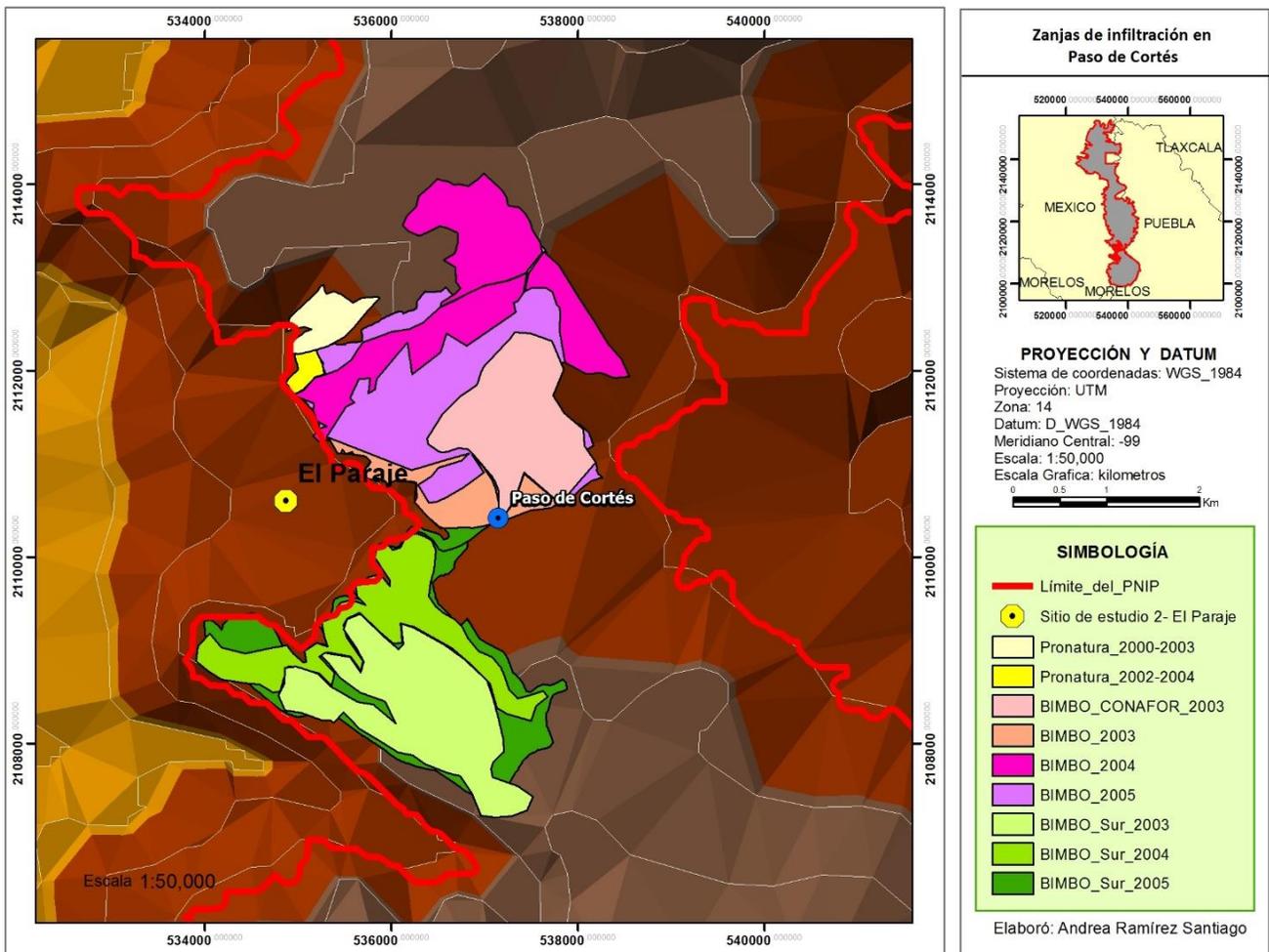
Localización	Corporativo Promotor	Periodo de implementación	Total de Zanjas	Superficie	Altitud MDE	Pendiente	Tipo de Vegetación
Paso de Cortés	Pronatura	2000-2004	Sin Dato	2,225.77 has	3241-3781 msnm	De 20 a 25%	Pastizal alpino y presencia de especies forestales.
	BIMBO-CONAFOR	2003					
	BIMBO	2003-2005					
Zoquiapan	Pronatura-Coca-Cola	2005-2008	Sin Dato	1,370.40 has	3241-3781 msnm	De 25 % a 30%	Especies Forestales
Altzomoni	CONAFOR	2002-2003	Sin Dato	191.60 has	3781-4321 msnm	De 25 % a 30%	Pastizal alpino y presencia de aforestación.
	Televisa	2005					
	VW	2008-2013					
	VW-Televisa	2013					
Bienes Comunales Amecameca	Pronatura-Coca-Cola-CNANP-CONAFOR	2009	162,500	250 has	3241-3781 msnm	De 20 a 25%	Zacatonal con presencia de especies herbáceas.



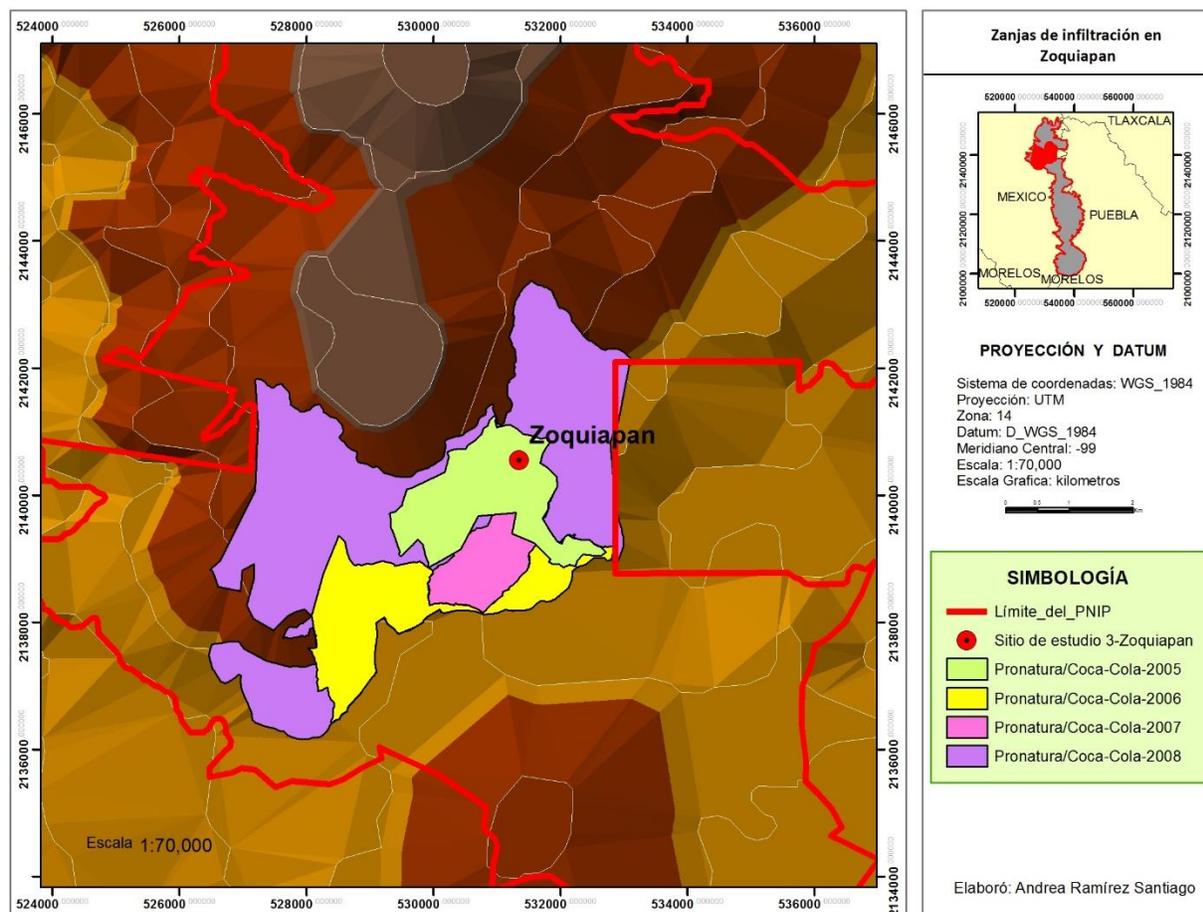
**Figura 35.** Mapa de localización de las tres áreas dentro del PNIP en donde diversos corporativos realizaron zanjas de infiltración entre el periodo 2000 al 2014. El mapa base corresponde a un Modelo Digital de Elevación, la información se obtuvo de la subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014.

La primera zona en donde se implementaron zanjas de infiltración dentro del PNIP fue en Paso de Cortés en el año 2000, a través del financiamiento de Pronatura. La etapa de construcción duró 3 años, del año 2000 al año 2003, posteriormente se llevó a cabo una segunda etapa de construcción de zanjas de infiltración dentro de la misma zona, también a cargo de Pronatura, esta etapa inició en el año 2002 y concluyó en el año 2004, en total se construyeron 24 000 zanjas de infiltración en una superficie de 38 hectáreas (Figura 36), (Subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014).

En el año 2003 comenzó una tercera etapa de construcción de zanjas de infiltración en Paso de Cortés, esta vez a cargo de CONAFOR. Y del año 2003 al año 2005, grupo BIMBO se encargó de la última etapa de construcción de zanjas de infiltración en Paso de Cortés (Figura 36), (Subdirección del PNIP, 2014).



**Figura 36.** Mapa de localización de zanjas de infiltración realizadas en Paso de Cortés entre el año 2000 y 2005 por Pronatura, grupo Bimbo y CONAFOR en un área total de 2,225.77 has. *El punto amarillo es el sitio de estudio número 2 “El Paraje” fuera del límite del Parque,* (Subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014).

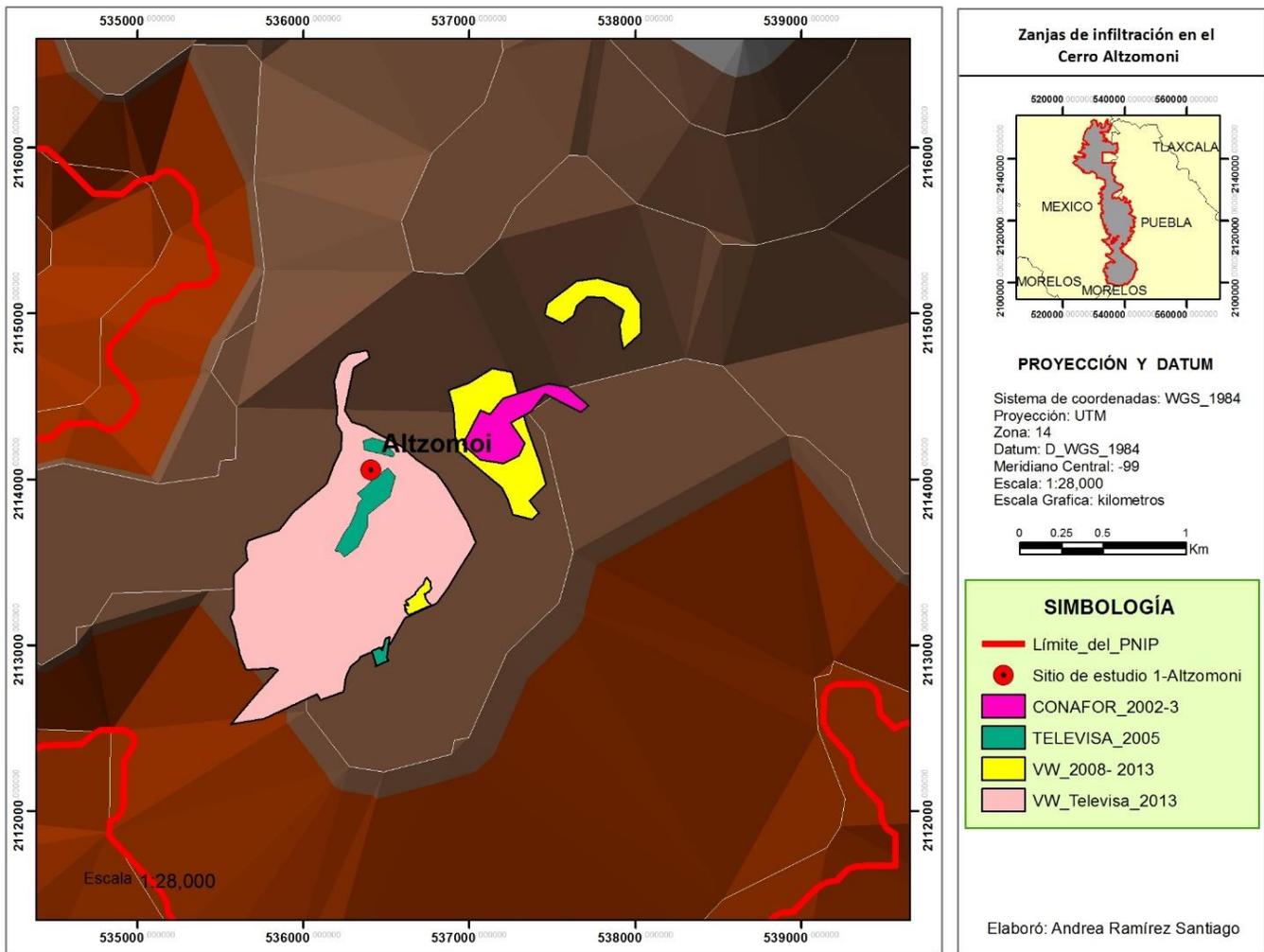


**Figura 37.** Mapa de localización de zanjas de infiltración realizadas en Zoquiapan entre los años 2005 y 2008, por Pronatura y grupo Coca-Cola, en un área total de 1,370.40 has. *El punto rojo es el sitio de estudio número 3 “Zoquiapan”, (Subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014).*

En el año 2004 bajo el financiamiento de Pronatura y Coca-Cola comenzaron a implementar las zanjas de infiltración en la zona de Zoquiapan, como parte del programa “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua”. La primer etapa se terminó de construir en el año 2007, mientras que la segunda etapa (área más extensa con zanjas de infiltración dentro de todo el Parque), terminó su construcción en el año 2008 (Figura 37), (Subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014).

Posteriormente en el año 2005, Televisa fue la impulsora de la construcción de zanjas de infiltración en el cerro Altzomoni, esta iniciativa se originó como parte de las estrategias de mitigación de impacto ambiental por las aguas residuales generadas en las antenas de transmisión de Televisa localizadas en la cumbre del cerro, por lo que esta área se localiza unos metros debajo de las antenas de transmisión. Aunque la iniciativa fue de Televisa, fue VW quien concluyó el proyecto de construcción de zanjas de infiltración en el cerro de

Altzomoni, este fue el último proyecto de zanjas de infiltración dentro del PNIP) aunque en 2014 se realizaron trabajos de mantenimiento, (Subdirección del PNIP, 2014), (Figura 38).



**Figura 38.** Mapa de localización de zanjas de infiltración realizadas en Altzomoni entre los años 2002 y 2013 por CONAFOR, TELEVISA y VW, en un área total de 191.60 has. *El punto rojo es el sitio de estudio número 1 “Altzomoni”, (Subdirección del Parque Nacional Izta-Popo, 2014).*

### 3.2.2. Zanjas de Infiltración en el Municipio de Amecameca (Terrenos de Bienes Comunales fuera del Parque Nacional Izta-Popo).

En el año 2009 Pronatura México, A.C., con el apoyo de Coca-Cola de México y la participación de las Comisiones Nacionales Forestal y de Áreas Naturales Protegidas (CONAFOR y CONANP respectivamente) ejecutaron el mismo programa del PNIP en 17 estados de la República Mexicana con

características similares: ambientes boscosos pertenecientes en su mayoría a Áreas Naturales Protegidas o a sus zonas de influencia, (Pro-natura, 2009).

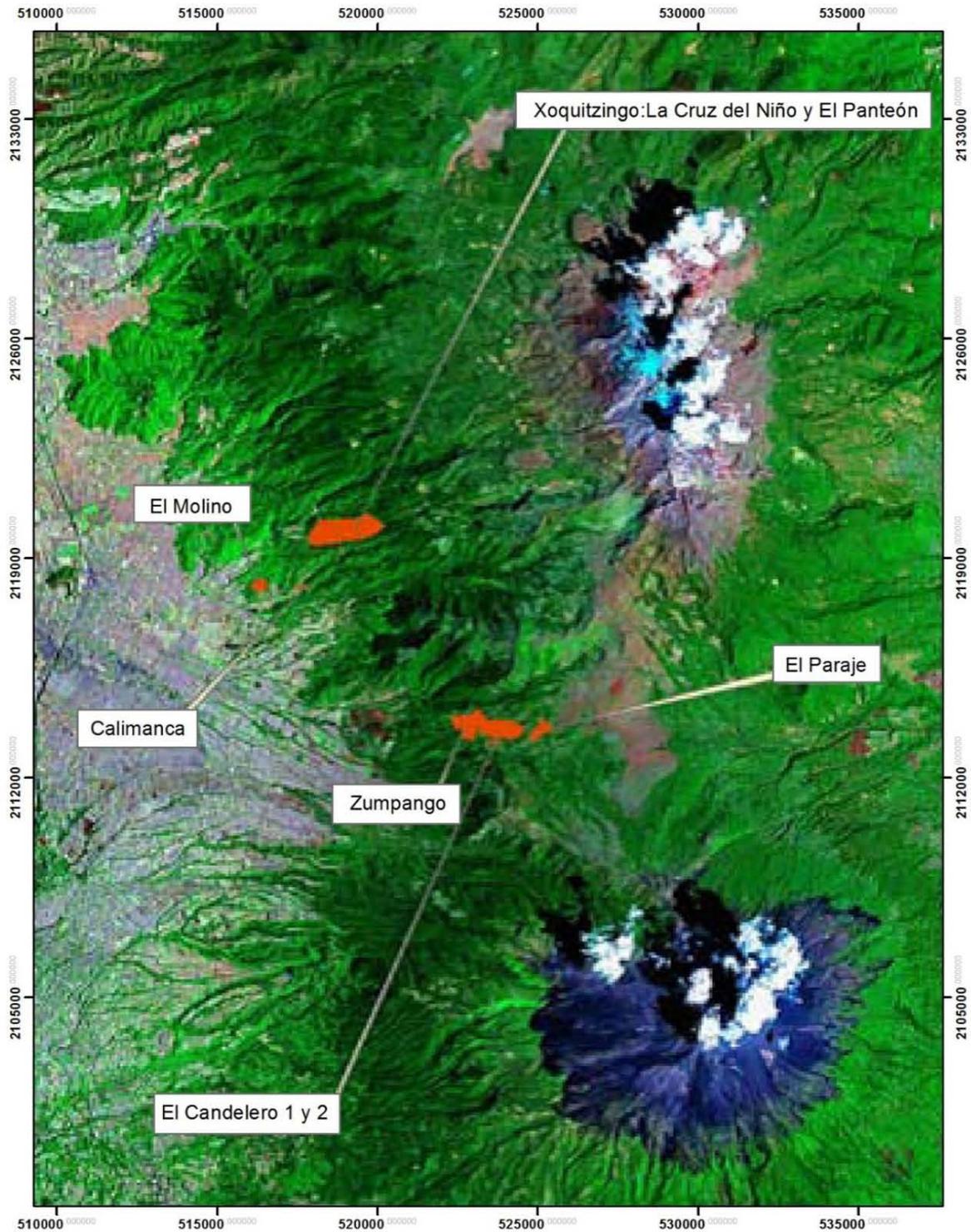


**Figura 39.** Zanjas de infiltración “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua” en el Parque Nacional Izta Popo, correspondientes a la zona de Altzomoni. (Foto de: Ramírez, Diciembre, 2014).

El objetivo de llevar a más estados del país el “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua”, era incrementar la recarga de acuíferos mediante la realización de zanjas de infiltración en ambientes forestales e implementar la reforestación en los bordos de las zanjas construidas, como parte de la restauración de bosques. A demás de las zanjas de infiltración construidas, se implementaron también otras obras como presas de geocostales, zanjas trincheras, subsoleo, terrazas individuales, presas de piedra acomodada, cabeceras de cárcava y material muerto acomodado, (Pro-natura, 2009).

En terrenos de Bienes Comunales del municipio de Amecameca, se realizaron las zanjas de infiltración como parte del proyecto Cosecha de Agua se incluyó en el Programa la realización de obras para la captación de agua de lluvia, específicamente zanjas de infiltración y se estableció como meta realizar en su totalidad la construcción de 162,500 zanjas de infiltración en una superficie de 250 hectáreas, (Pro-natura, 2009).

En terrenos de Bienes Comunales del municipio de Amecameca del Estado de México, Pronatura financió la realización las zanjas de infiltración como parte del “Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua”, por considéralos dentro de la zona de influencia del PNIP. La meta de Pronatura para esta zona era realizar un total de 162, 500 zanjas en una superficie de 250 ha.



**Figura 40.** Mapa de localización de las zonas (marcadas en rojo) en las que se realizaron zanjas de infiltración en diversos predios de Bienes Comunales de Amecameca. Los nombres señalados corresponden al nombre de la localidad en la que se construyeron las zanjas de infiltración. (Mapa tomado del informe anual del Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua, Pro-natura, 2009).

Los resultados obtenidos para el año 2009 fueron 162,500 zanjas de infiltración en una superficie de 250 hectáreas en las faldas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl (Zona de Influencia del Parque Nacional Izta-Popo), en terrenos de Bienes Comunales del municipio de Amecameca (Figura 40) a altitudes que van de los 3,000 a los 3,500 msnm, (Cota *et al.*, 2011).

En el artículo “Recarga de acuíferos mediante la construcción de tinas ciegas” (Cota *et al.*, 2011), se menciona el análisis de las precipitaciones de la región, como una de las características que se consideraron previo a escoger los sitios para realizar zanjas de infiltración (tinas ciegas) en los Bienes Comunales del municipio de Amecameca. Este análisis se basó en los registros durante varios años de las precipitaciones en la región colindante, en donde se calcularon 800 mm anuales; dicha información se utilizó para realizar cálculos de captación de lluvia directa y de escurrimientos, lo cuales les permitieron estimar la aportación de esta obra en 1,250,000 m<sup>3</sup> al año; y al considerar que la vida media de las tinas ciegas en la región es de 10 años, se calculó que la aportación potencial de las zanjas (tinas ciegas) construidas sería de 12,500,000 m<sup>3</sup>. Sin embargo no existen fuentes de los datos utilizados para dicho análisis, ni una descripción exacta de cómo se realizaron los cálculos mencionados.

En el informe 2010 que la empresa Coca-Cola publicó en su página web como parte de las acciones de contribución al cuidado del medio ambiente que realiza anualmente, menciona que las zanjas de infiltración realizadas en el PNIP cuentan con la “validéz científica” del Instituto de Geofísica de la UNAM, quien diseñó una evaluación para medir los resultados de reabastecimiento, con lo que se contabiliza la recarga de agua de las zanjas de infiltración realizadas en los Bienes Comunales del municipio de Amecameca, y se determinaba que el agua de lluvia que se está captando se está infiltrando y llegando a los acuíferos. En los resultados del Instituto de Geofísica se asegura que no existen capas impermeables en el subsuelo de los sitios en que se construyeron las zanjas de infiltración.

El informe 2010 de Coca Cola también menciona que en el evento anual de sustentabilidad (2011) denominado “Unidos por el agua, contigo somos más”, el Dr. Luis Marín, Investigador del Instituto de Geofísica de la UNAM mencionó “De acuerdo a estudios geofísicos realizados por nosotros podemos validar la cantidad de agua que se está reabasteciendo a los acuíferos... el proyecto de tinas ciegas (zanjas de infiltración) recarga más de 1,250,000 de metros cúbicos al año, equivalente a este mismo número de tinacos”. Sin embargo, no se encontró ninguna publicación del Instituto de geofísica de la UNAM, ni ninguna otra publicación de otro Instituto o Universidad que pueda sustentar que efectivamente el agua que se está captando e infiltrando llega eventual y directamente a los acuíferos.

Actualmente dentro del parque Nacional Izta-Popo se han construido zanjas de infiltración en un área total de 3,786.77 has, pertenecientes a Zoquiapan, Altzomoni y Paso de Cortés, mismas que han sido financiadas por 7 diversos grupos entre los que se encuentran corporativos privados e instituciones gubernamentales (Pronatura, BIMBO, Coca-Cola, CONAFOR, CONANP, VW y Televisa). La cifra oficial y total de zanjas de infiltración dentro del PNIP se desconoce, ya que no se encontró registro en ninguno documento emitido por el PNIP o por la CONANP. Fuera del PNIP (Bienes comunales de Amecameca) la cantidad de zanjas que se tiene registrada dentro del informe de Pronatura 2009 es de 162, 500 zanjas en un área total de 250 has.

Tanto dentro como fuera del PNIP el objetivo de las zanjas es la captura de agua de lluvia para que ésta se infiltre “directamente” a los mantos freáticos, dejando de lado la conservación del suelo. La falta de información con respecto a los daños ocasionados al ambiente al implementar zanjas de infiltración ha llevado a la creación desmedida de éstas; en ningún informe de los grupos que forman parte del financiamiento de estas obras se hace mención de evaluaciones previas a la implementación de las zanjas, o de cómo es que escogen los sitios en donde se localizaran, tampoco se sabe si estas obras han recibido algún tipo de mantenimiento a lo largo de los 15 años que lleva el proyecto desde las primeras zanjas construidas. Lo único que se puede inferir en cuanto a las características que comparten los sitios es que son sitios a alturas mayores a los 3200 msnm y pendientes mayores al 20%, (Cuadro 19).

### **3.2.3. Evaluación de las zanjas de infiltración en tres sitios**

#### **Sitio de estudio 1: Altzomoni**

Altzomoni forma parte de la Subzona de Recuperación del Parque Nacional Izta-Popo, se localiza en la parte alta de la ladera del cerro Altzomoni, al norte de Paso de Cortés, en el municipio de Amecameca, Estado de México. La descripción del perfil de suelo se realizó en la parte alta de la ladera, en las coordenadas: X 0475525; Y 2139224 a 3774 msnm, (Figura 42).

**Cuadro 19.** Resumen de las características ambientales de los tres sitios de estudio.

Sitio de Estudio	Localización	Latitud UTM	Longitud UTM	Altitud	Material Parental	Ladera	Relieve	Pendiente	Tipo de Vegetación	Tipo de Clima	Precipitación anual
<b>Altzomoni</b>	Parte alta del cerro Altzomoni.	0475525	2139224	3774 msnm	Ceniza volcánica	Ladera Alta	Cerro	28%	Pastizal alpino, arbustiva, herbáceas con presencia de aforestación.	Cb'(w2)	950.9 mm
<b>El Paraje</b>	Bienes comunales del municipio de Amecameca.	0534865	2110606	3500 msnm	Ceniza volcánica y depósito de Pómez	Ladera Media	Lomerío	25%	Zacatonal con presencia de especies arbustivas y herbáceas.	Cb'(w2)	950.9 mm
<b>Zoquiapan</b>	Paraje Llano Grande, Ixtapaluca.	0531350	2140557	3445 msnm	Ceniza volcánica	Ladera Media	Cerro	27%	<i>Pinus montezumae</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. ayacahuite</i>	Cb'(w2)	972.2 mm



**Figura 41.** Diferencias en vegetación de los tres sitios de estudio.



**Figura 42.** Vista aérea del sitio de estudio 1: Altzomoni (Google Earth, 2015).

Según el mapa de Miehlich (1991) a escala 1:100,000 este suelo corresponde a un Andosol Víttrico desarrollado a partir de cenizas volcánicas de no más de 500 años, por lo que se considera joven.

La posición del perfil en la ladera es alta, cóncava , con una forma del terreno circundante de cerros y con una pendiente de 28%, lo que da la formación de un relieve escarpado, sin embargo la vegetación arbustiva existente protege al suelo de la erosión (Figura 43 y 44).



**Figura 43.** Foto panorámica del área con zanjas de infiltración en la ladera alta del cerro Altzomoni (2015).



**Figura 44.** Foto de la ladera alta del sitio de estudio 1: Altzomoni (2015).

La ladera del cerro Altzomoni en donde se ubican las zanjas de infiltración tiene una exposición hacia el sureste (ladera solana), por lo que los ciclos de humedad y secado son cortos ya que la cantidad de calor generada por el sol y recibida por el suelo es alta, provocando una mayor evaporación. La vegetación dominante es el pastizal alpino, aunque también se encuentran especies arbustivas y herbáceas y presencia de aforestación, (Figura 45 y 46).



**Figura 45.** Panorama de la vegetación dominante y de la aforestación en el sitio 1 “Altzomoni” (2015).



**Figura 46.** Vegetación en la ladera alta del sitio de estudio 1: Altzomoni (2015).

Respecto a la información obtenida de SMN (CONAGUA), 2015, el sitio presenta un clima Cb'(w2) es decir semifrío, subhúmedo con verano fresco largo; temperatura media anual de 14°C; temperatura mínima anual de 6.5°C; y temperatura máxima anual de 21.5 °C (respecto a la estación de Atlautla).

### **Sitio de estudio 2: El Paraje**

El sitio de estudio “El Paraje” se encuentra fuera del PNIP en su Zona de Influencia, se localiza al sur de Paso de Cortés, en los Bienes Comunales del municipio de Amecameca (km 19), Estado de México. La descripción del perfil de suelo se realizó en la parte media de la ladera, en las coordenadas: X 0534865; Y 2110606 a 3500 msnm (Figura 47).

Según el mapa de Miehlich (1991) a escala 1:100,00 este suelo corresponde a un Andosol Vitríco desarrollado a partir de depósitos de pómez de no más de 500 años, por lo que se considera joven.



**Figura 47.** Vista aérea del sitio de estudio 2: El Paraje, terrenos de bienes comunales del municipio de Amecameca, Estado de México, (Google Earth, 2015).

La posición del perfil en la ladera es media, extendida (rectilínea), con una forma del terreno circundante de lomeríos, con una pendiente de 25%, lo que da la formación de un relieve escapado moderado.

El sitio presenta por perturbación poca cobertura de pastos y arbustos, lo que ocasiona que el suelo se encuentre desnudo y muy susceptible a ser erosionado (Figura 48), sin embargo existe en algunas áreas de pinos con algo de oyamel.

La ladera de El Paraje en donde se ubican las zanjas de infiltración tiene una exposición hacia el suroeste (ladera solana), por lo que los ciclos de humedad y secado son cortos, lo que provoca una mayor evaporación. Este sitio originalmente estaba cubierto de bosque el cual ha sufrido un cambio de uso de suelo ya que actualmente la vegetación dominante es zacatonal, aunque también se encuentran especies arbustivas y herbáceas, y solo en algunas zonas presencia de especies forestales, (Figura 49).



**Figura 48.** Fotos de la ladera media del sitio de estudio 2: El paraje (2015).

Respecto a la información obtenida de SMN (CONAGUA), 2015, el sitio presenta un clima Cb'(w2) es decir semifrío, subhúmedo con verano fresco largo; temperatura media anual de 14°C; temperatura mínima anual de 6.5°C; y temperatura máxima anual de 21.5 °C, (respecto a la estación de Atlautla).

Tiene una precipitación media anual de 950.9 mm, la precipitación en el mes más seco es menor a 7.1 mm; las lluvias de verano e invernales representan entre el 5 y el 10 % del total anual.

No existe posibilidad de que ocurra un periodo de humedad excesiva ya que la duración de las lluvias es extremadamente corta (<4 horas) y no existe una duración anual acumulativa de humedad.



**Figura 49.** Vegetación en la ladera media del sitio de estudio 2: El paraje (2015).

### Sitio de estudio 3: Zoquiapan

Zoquiapan forma parte de la Subzona de Recuperación del Parque Nacional Izta-Popo, se localiza a la altura del paraje conocido como Llano Grande, en el municipio de Ixtapaluca, Estado de México. La descripción del perfil de suelo se realizó en la parte alta de la ladera, en las coordenadas: X 0531350; Y 2140557 a 3445 msnm.

Según el mapa de Miehlich (1991) a escala 1:100,000 este suelo corresponde a un Andosol Víttrico desarrollado a partir de cenizas volcánicas de más de 100 000 años.

La posición del perfil en la ladera es media, semiextendida (semi-rectilínea), con una forma del terreno circundante de cerros, con una pendiente de 27%, lo que da la formación de un relieve escapado. El sitio tiene una cobertura de vegetación del 90%, la cual protege al suelo de la erosión mediante sus pastos y hojarasca; en este sitio, la vegetación dominante es *Pinus montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. ayacahuite*, (Figura 50, 51 y 52).

La ladera de Zoquiapan en donde se ubican las zanjas de infiltración tiene una exposición hacia el sureste (ladera solana), sin embargo su cobertura de vegetación del 90% ocasiona que exista un abaja evaporación.



**Figura 50.** Foto de la ladera media del sitio de estudio 3: Zoquiapan, (2015).



**Figura 51.** Fotos de la vegetación que cubre el suelo en el sitio de estudio 3: Zoquiapan, (2015).

Respecto a la información obtenida de SMN (CONAGUA), 2015, el sitio presenta un clima Cb'(w2) es decir semifrío, subhúmedo con verano fresco largo; temperatura media anual de 9.8 °C; temperatura mínima anual de 1.3°C; y temperatura máxima anual de 18.3 °C.

Tiene una precipitación media anual de 972.2, precipitación en el mes más seco menor de 11.3 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

No existe posibilidad de que ocurra un periodo de humedad excesiva ya que la duración de las lluvias es extremadamente corta (<4 horas) y la pendiente de 27% no permite que se acumule agua.



**Figura 52.** Vegetación en la ladera media del sitio de estudio 3: Zoquiapan, (2015).

### 3.2.4. Características de los suelos en los sitios de estudio

#### Perfil de suelo en el sitio de estudio 1: Altzomoni.



**Figura 53.** Perfil del suelo en el sitio de estudio 1 Altzomoni, (2015).

Respecto a los resultados obtenidos en campo (Anexo 1 y 2), el perfil del suelo tuvo una profundidad de 100 cm, dividido en 5 horizontes, cada uno de ellos con un espesor de 20 cm. Los dos primeros horizontes (de 0-40 cm) se definieron como los horizontes Ah (horizontes minerales, que muestran acumulación de materia orgánica humificada, sin presencia de arado o pastoreo).

El suelo presentó una densidad de raíces muy alta en los 2 horizontes superiores (primeros 40 cm) y de mediana a muy baja en los siguientes horizontes.

La abundancia de los poros fue alta en los dos primeros horizontes, comunes en los horizontes de 40 a 80 cm y pocos en el último horizonte. La forma fue vesicular en todo el perfil y el tamaño fue fino en los primeros horizontes a medianos en los horizontes de 40 a 100 cm.

La abundancia de pedregosidad en los primeros 20 cm fue de 20%, de los 20 a los 60 cm fue de 10% y en los últimos horizontes fue de 20 a 46%, en todos los horizontes el tipo de pedregosidad fue graba de fina a gruesa.

La estructura fue de grano simple en la superficie, granular a profundidades de 40 a 60 cm y subangular en bloques en los últimos horizontes (60 a 100 cm), con tamaños de fino a muy finos y con un grado de estructura de débil a moderado.

La estabilidad de agregados (Cuadro 23), fue alta en el horizonte superficial (de 0 a 20 cm) y muy alta en el resto de los horizontes (de 20 a 100 cm).

El color del suelo varió de negro en los dos primeros horizontes a negro pardo a profundidades de 40 a 100 cm, este fue uniforme en apariencia especialmente en su estado húmedo.

Respecto a los resultados obtenidos en laboratorio (Anexo 3), la densidad aparente (DA) fue baja ( $0.90\text{g/cm}^3$ ), el volumen total de poros (VTP) fue alto con un 67.7% y la humedad del suelo fue de 32.8%.

El pH en todo el perfil fue ligeramente ácido (6.5) y la conductividad eléctrica (CE) fue de  $20.3\ \mu\text{S}$ .

La textura fue Arenosa (A) en el horizonte superficial (0 a 20 cm) y Arenosa Franca (AC) en los demás horizontes (de 20 a 100 cm), con un promedio de 80% de arenas, 12% de limos y 6% de arcillas.

Los análisis de laboratorio indican que el Carbono Orgánico (Corg) es de 1.3% en los primeros horizontes, y 2% en el horizontes más profundo (de 80 a 100 cm); en promedio el Corg en el perfil fue de 1.5%.

Los resultados de la evaluación edafo-ecológica (Anexo 4) indicaron una penetrabilidad de raíces de buena a muy buena en los 4 primeros horizontes (0 a 80 cm) y media en el último horizonte.

La función del poro indico que todos los horizontes tienen agua disponible para las plantas, sin embargo a partir del tercer horizonte (de 40 a 100 cm) el drenaje se vuelve lento.

El volumen total de poros (VTP) fue alto en la superficie (de 0 a 20 cm) y muy alto en el resto de los horizontes, ocasionando así una capacidad de aireación (CA) de alta a muy alta y una capacidad de agua disponible (dCC) y capacidad de campo (CC) muy baja.

La conductividad hidráulica (capacidad de transmitir agua) fue alta en el primer horizonte y muy alta a profundidades de 20 a 100 cm. Esta alta conductividad hidráulica y el tipo de textura hacen que los suelos en Altzomoni tengan un drenaje excesivo ( $17.45\text{mm/min}$  en la prueba de infiltración en el sitio de estudio 1 “Altzomoni”, Anexo 6).

La evaluación también nos indicó el porcentaje de materia orgánica (MO), el cual fue de 3% (media) en los primeros 20 cm y de 4 a 5% (media alta) a profundidades de 20 a 100 cm; y con presencia de tipo de mantillo mull (horizonte orgánico ausente, por descomposición biológica eficiente; al no haber horizonte orgánico el horizonte Ah es mayor a los 8cm).

El porcentaje de MO, el tipo de textura, la estabilidad de agregados y la conductividad hidráulica, indican que el suelo presenta una erosionabilidad muy baja.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de regular a mediana, con un espacio radicular efectivo de 5 dm a 7 dm, dando lugar a que las bases intercambiables sean medianamente altas.

La capacidad de filtración y la capacidad amortiguadora de las partículas suspendidas del suelo varió de alta a extremadamente alta.

**Cuadro 20.** Resumen de resultados de laboratorio del perfil de suelo en el sitio de estudio 1: Altzomoni.

Profundidad	DA	DR	VTP	Hum	pH	CE	Arcillas	Limos	Arenas	Clase Textural	Clave	Corg
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%		(μS/cm)	%	%	%			%
0-20	1.00	3.18	68.5	27.3	6.3	24.0	5.1	9.6	85.3	Arena	A	1.3
20-40	0.98	2.57	61.7	40.6	6.7	18.5	7.4	14.6	77.9	Arenosos Franco	AC	1.3
40-60	0.82	2.77	70.4	25.4	6.4	21.0	6.1	13.0	80.9	Arenosos Franco	AC	1.7
60-80	0.97	2.77	65.1	41.8	6.6	20.0	7.7	14.6	77.6	Arenosos Franco	AC	1.3
80-100	0.71	2.63	73.1	29.0	6.6	18.0	6.4	13.0	80.6	Arenosos Franco	AC	2.0
$\bar{X}$	0.90	2.78	67.7	32.8	6.5	20.3	6.6	13.0	80.5			1.5

$\bar{X}$ = Media      Hum=Humedad

### Perfil del suelo en el sitio de estudio 2: El Paraje.



**Figura 54.** Perfil de suelo en el sitio de estudio 2 El Paraje, (2015).

Respecto a los resultados obtenidos en campo (Anexo 1 y 2), el perfil del suelo tuvo una profundidad de 95 cm, dividido en 4 horizontes, con espesores de 15 a 35 cm. Los dos primeros horizontes (de 0-40 cm) se definieron como los horizontes Ah (horizontes minerales, que muestran acumulación de materia orgánica humificada, sin presencia de arado o pastoreo).

El suelo presentó una densidad de raíces muy alta en los 3 primeros horizontes (de 0 a 60 cm) y baja en el último horizonte (de 60 a 95 cm).

La abundancia de los poros fue alta en el primer horizonte, común en el segundo horizonte (de 25 a 40 cm) y pocos en los dos últimos horizontes (de 40 a 95 cm). La forma fue intersticial y el tamaño fue muy fino en todos los horizontes.

La abundancia de pedregosidad fue de 1 a 6% a lo largo de todo el perfil, en todos los horizontes el tipo de pedregosidad fue cantos de finos a medianos.

La estructura fue subangular en bloques en todo el perfil, los bloques presentaron tamaños de gruesos en los primeros 40 cm a medianos en los horizontes de 40 a 95 cm de profundidad, con un grado de estructura débil.

La estabilidad de agregados (Cuadro 23), fue mediana en los dos primeros horizontes (de 0 a 40 cm) y alta en el resto de los horizontes (de 40 a 95 cm).

El color del suelo fue negro en todo el perfil, este fue uniforme en apariencia especialmente en su estado húmedo.

Respecto a los resultados obtenidos en laboratorio (Anexo 3), la densidad aparente (DA) fue baja ( $0.92\text{g/cm}^3$ ), el volumen total de poros (VTP) fue alto con un 64.7% y la humedad del suelo fue de 49%.

El pH en todo el perfil fue ligeramente ácido (6.7) y la conductividad eléctrica (CE) fue de  $21.63\ \mu\text{S}$ .

La textura fue Arenosa Franca (AC) en todo el perfil, con un promedio de 71% de arenas, 20% de limos y 8% de arcillas.

El Carbono Orgánico (Corg) fue de 2% en el primer horizonte (de 0 a 25 cm), y varió de 1.3 a 1.7% en los demás horizontes (de 25 a 95 cm); en promedio el Corg en el perfil fue de 1.7%.

Los resultados de la evaluación edafo-ecológica (Anexo 4) indicaron una penetrabilidad de raíces de buena en el primer horizonte a muy buena en los demás horizontes (de 25 a 95 cm). La función del poro indicó que todos los horizontes tienen agua muerta para las plantas.

El volumen total de poros (VTP) fue alto muy alto en todo el perfil, ocasionando así una capacidad de aireación (CA) muy alta y una capacidad de agua disponible (dCC) y capacidad de campo (CC) muy baja.

La conductividad hidráulica (capacidad de transmitir agua) fue alta en el primer horizonte y muy alta a profundidades de 25 a 95 cm. Esta alta conductividad hidráulica y el tipo de textura hacen que los suelos en El Paraje tengan un drenaje excesivo ( $11.47\text{mm/min}$  en la prueba de infiltración en El Paraje, Anexo 6).

La evaluación también nos indicó el porcentaje de materia orgánica (MO), 4 a 5% (media alta) a lo largo de todo el perfil (de 0 a 95 cm).

El porcentaje de MO, el tipo de textura, la estabilidad de agregados y la conductividad hidráulica, indican que el suelo presenta una erosionabilidad baja.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue mediana, con un espacio radicular efectivo de 7 dm, dando lugar a que las bases intercambiables sean de medianamente altas a altas.

La capacidad de filtración y la capacidad amortiguadora de las partículas suspendidas del suelo fueron extremadamente altas.

**Cuadro 21.** Resumen de resultados de laboratorio del perfil de suelo en el sitio de estudio 2: El Paraje.

Profundidad	DA	DR	VTP	Hum	pH	CE	Arcillas	Limos	Arenas	Clase Textural	Corg	N
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%		(μS/cm)	%	%	%		%	%
0-25	1.01	2.57	60.7	47.4	6.6	21.0	7.1	20.6	72.3	Arenosos Franco	2.2	0.2
25-40	0.87	2.72	67.8	43.3	6.7	20.0	7.8	21.6	70.6	Arenosos Franco	1.5	0.1
40-60	0.95	2.63	64.0	48.8	6.7	19.0	7.7	21.6	70.6	Arenosos Franco	1.3	0.1
60-95	0.87	2.57	66.4	56.6	6.9	26.5	10.1	18.6	71.3	Arenosos Franco	1.7	0.1
$\bar{X}$	0.92	2.62	64.7	49.0	6.7	21.6	8.2	20.6	71.2	Arenosos Franco	1.7	0.1

$\bar{X}$ = Media Hum=Humedad

### Perfil del suelo en el sitio de estudio 3: Zoquiapan.



**Figura 55.** Perfil de suelo en el sitio de estudio 3 Zoquiapan, (2015).

Respecto a los resultados obtenidos en campo (Anexo 1 y 2), el perfil del suelo tuvo una profundidad de 100 cm, dividido en 4 horizontes, con un espesor de 15 a 56 cm. Los dos primeros horizontes (de 0-28 cm) se definieron como los horizontes Ah (horizontes minerales, que muestran acumulación de materia orgánica humificada, sin presencia de arado o pastoreo).

El suelo presentó una densidad de raíces muy alta en los 2 horizontes superiores (primeros 28 cm) y alta a mediana en los siguientes horizontes.

La abundancia de los poros fue común en los dos primeros horizontes (de 0 a 28 cm) y alta en últimos horizontes (de 20 a 100 cm) horizonte. La forma fue vesicular en todo el perfil y el tamaño fue fino en los dos primeros horizontes a muy fino a profundidades de 28 a 100 cm.

La abundancia de pedregosidad fue de 1% en todo el perfil del tipo de grabas finas.

La estructura fue subangular en bloques, los tamaños de los bloques fueron de medianos a gruesos, con un grado de estructura débil a moderado en todo el perfil. La estabilidad de agregados (Cuadro 23), fue muy alta en todo el perfil.

El color varió de negro pardo en los dos primeros horizontes (de 0 a 28 cm) a marrón en los últimos horizontes (de 28 a 100 cm), uniformes en apariencia especialmente en su estado húmedo.

Respecto a los resultados obtenidos en laboratorio (Anexo 3), la densidad aparente (DA) fue baja ( $0.83\text{g/cm}^3$ ), el volumen total de poros (VTP) fue alto con un 61.5 % y la humedad del suelo fue de 89.44%.

El pH en todo el perfil fue ligeramente ácido (6.7) y la conductividad eléctrica (CE) fue de  $30.13\ \mu\text{S}$ .

La textura fue Franco Arenosa (CA) en todo el perfil, con un promedio de 53% de arenas, 31% de limos y 14 % de arcillas.

El Carbono Orgánico (Corg) fue de 7.7 % en el primer horizonte, y de 3.2 a 1.3% en el resto de los horizontes (de 15 a 100 cm); en promedio el Corg en el perfil fue de 3.6%, lo que hace a Zoquiapan, el sitio con mayor porcentaje de Corg de los 3 sitios de estudio.

Los resultados de la evaluación edafo-ecológica (Anexo 4) indicaron una penetrabilidad de raíces alta en todo el perfil del suelo.

La función del poro indicó que todos los horizontes tienen agua disponible para las plantas a profundidades de 0 a 28 cm, sin embargo a partir del tercer horizonte (de 28 a 100 cm) el agua es muerta para las plantas.

El volumen total de poros (VTP) fue muy alto en todo el perfil, ocasionando así una capacidad de aireación (CA) de alta a muy alta y una capacidad de agua disponible (dCC) y capacidad de campo (CC) muy baja.

La conductividad hidráulica (capacidad de transmitir agua) fue alta en todo el perfil. Esta alta conductividad hidráulica y el tipo de textura hacen que los suelos en Zoquiapan tengan un drenaje excesivo ( $19.4\ \text{mm/min}$  en la prueba de infiltración en Zoquiapan, Anexo 6).

La evaluación también nos indicó el porcentaje de materia orgánica (MO), el cual fue 7% (media alta) en el primer horizonte (de 0 a 15 cm), 3% (media) en el horizonte de 15 a 28 cm, y de 1% (baja) en los últimos horizontes (de 28 a 100 cm).

El porcentaje de MO, el tipo de textura, la estabilidad de agregados y la conductividad hidráulica, indican que el suelo presenta una erosionabilidad baja.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de alta a mediana, con un espacio radicular efectivo de 8 dm, dando lugar a que las bases intercambiables sean de medianamente altas a altas.

La capacidad de filtración fue muy alta y la capacidad amortiguadora fue extremadamente alta en todo el perfil.

**Cuadro 22.** Resumen de resultados de laboratorio del perfil de suelo en el sitio de estudio 3. Zoquiapan.

Profundidad	DA	DR	VP	Hum	pH	CE	Arcillas	Limos	Arenas	Clase Textural	Corg	N
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	%	%		(μS/cm)	%	%	%		%	%
0-15	0.69	1.88	63.3	91.9	6.5	39.5	20.4	29.4	50.3	Franco Arenoso	7.7	0.5
15-28	0.77	2.12	63.6	94.9	6.7	40.0	14.4	34.0	51.6	Franco Arenoso	3.2	0.3
28-44	0.90	2.30	60.9	86.2	6.7	22.5	11.4	34.0	54.6	Franco Arenoso	2.4	0.2
44-100	0.97	2.33	58.3	84.8	6.9	18.5	11.4	29.4	59.2	Franco Arenoso	1.3	0.1
$\bar{X}$	0.83	2.16	61.53	89.44	6.7	30.1	14.4	31.7	53.9	Franco Arenoso	3.6	0.3

X= Media Hum=Humedad

**Cuadro 23.** Resultados de Slaketest de los perfiles de suelo (Sitio 1: Altzomoni, 2: El Paraje y 3: Zoquiapan).

Sitio	Horizontes	Estabilidad de Agregados			
		Ciclo1	Clase	Ciclo2	Clase
Altzomoni	0-20	2	Alta	5	Alta
	20-40	3	Muy Alta	6	Muy Alta
	40-60	3	Muy Alta	5	Alta
	60-80	3	Muy Alta	6	Muy Alta
	80-110	3	Muy Alta	6	Muy Alta
El Paraje	0-25	1	Mediana	4	Mediana
	25-40	2	Alta	4	Mediana
	40-60	1	Mediana	5	Alta
	60-95	2	Alta	5	Alta
Zoquiapan	0-15	3	Muy Alta	6	Muy Alta
	15-28	3	Muy Alta	6	Muy Alta
	28-44	3	Muy Alta	6	Muy Alta
	44-100	3	Muy Alta	6	Muy Alta

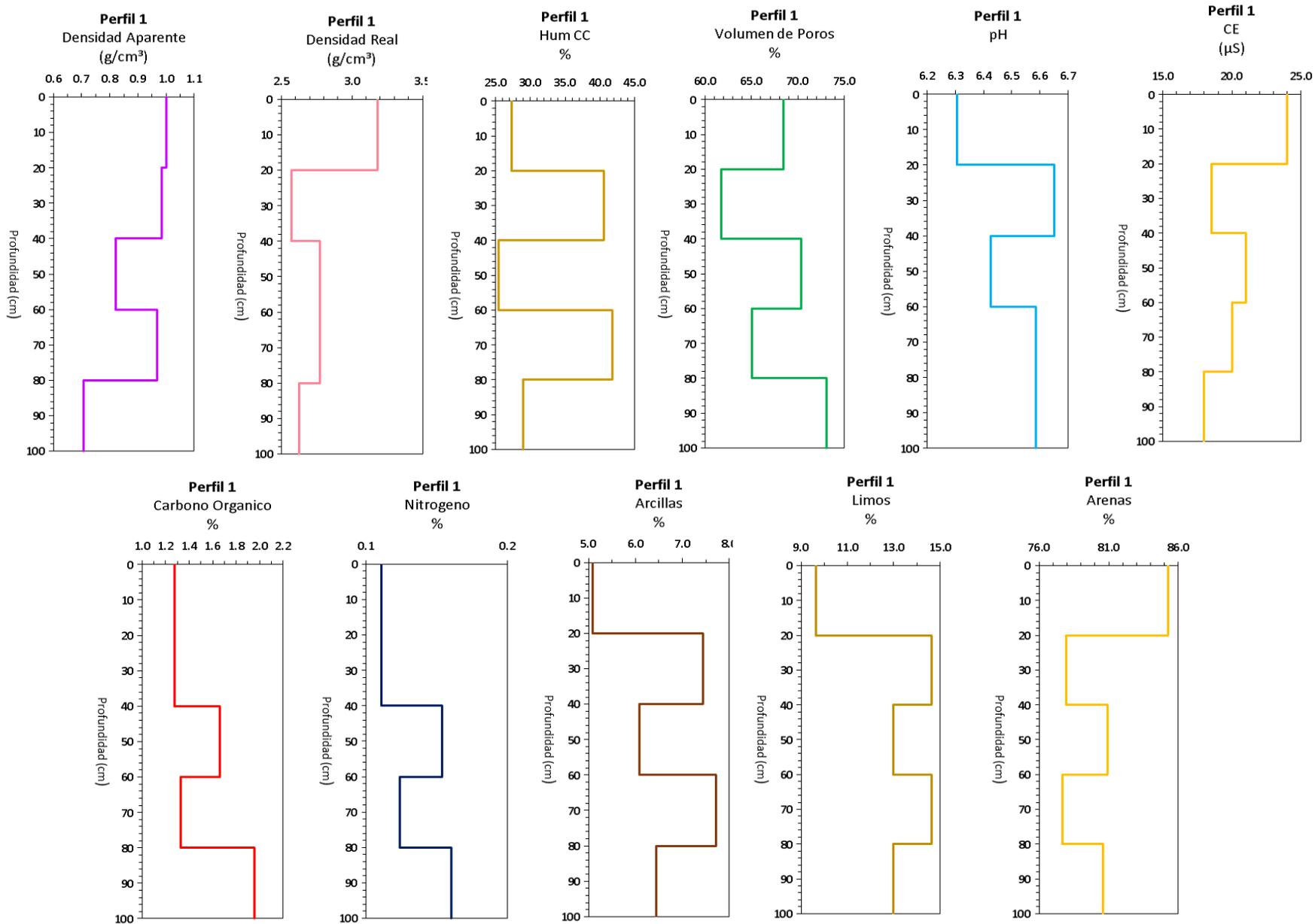


Figura 56. Graficas de resultados obtenidos en el laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio1: Altzomoni.

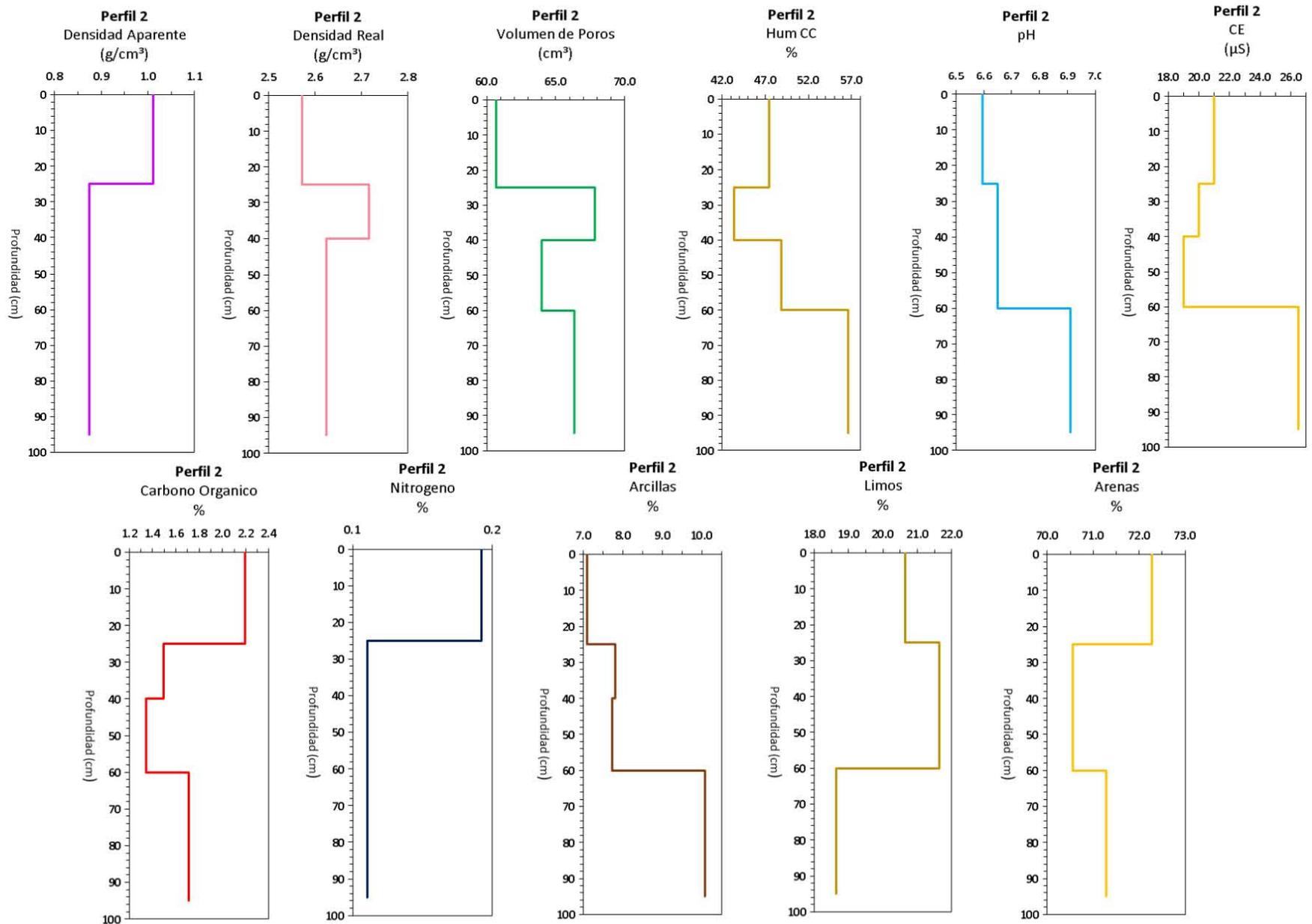


Figura 57. Graficas de resultados obtenidos en el laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio 2: El Paraje.

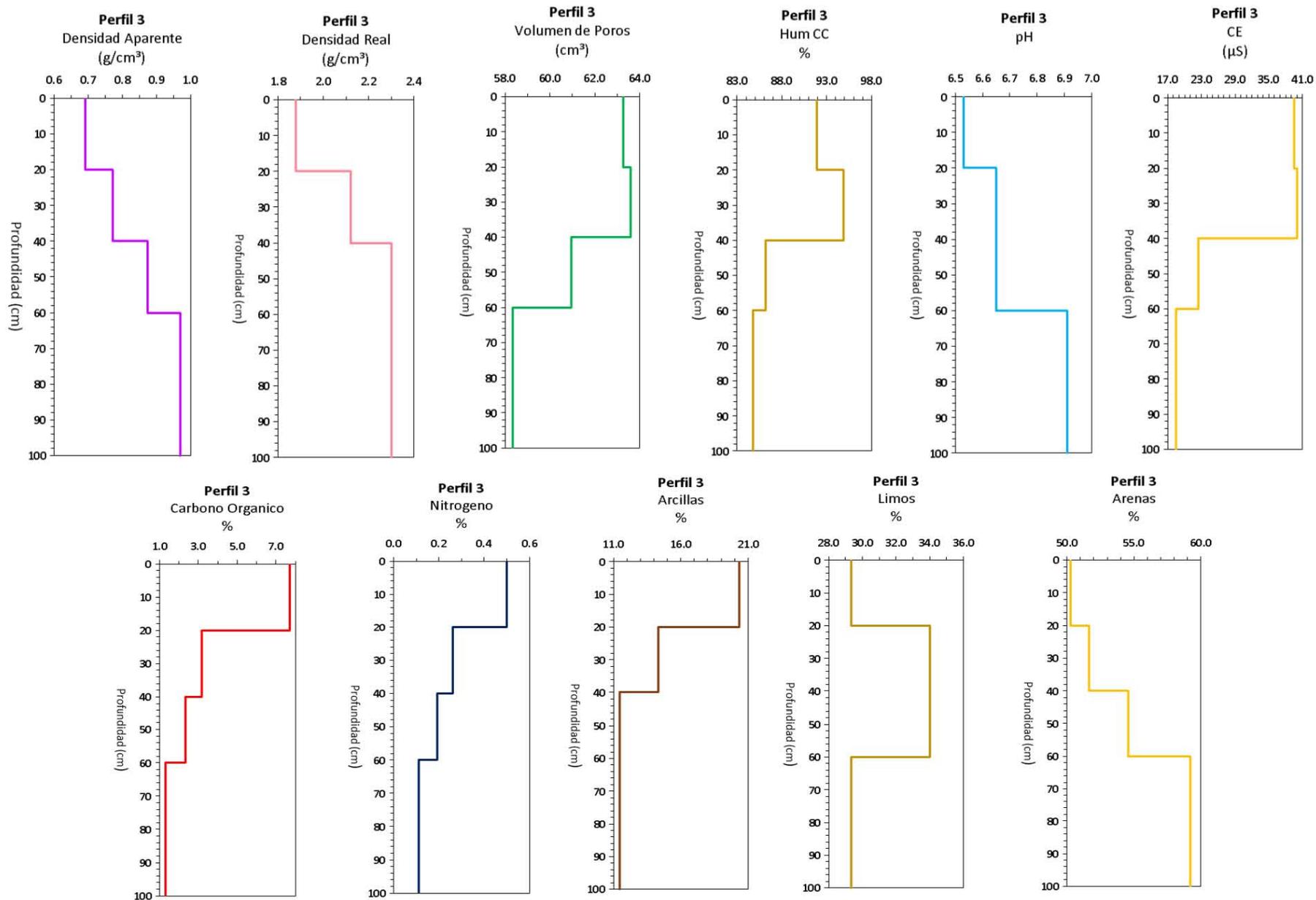


Figura 58. Graficas de resultados obtenidos en el laboratorio, del perfil de suelo en el sitio de estudio 3: Zoquiapan.

### 3.2.5. Características de las Zanjas de Infiltración y sus Bordos

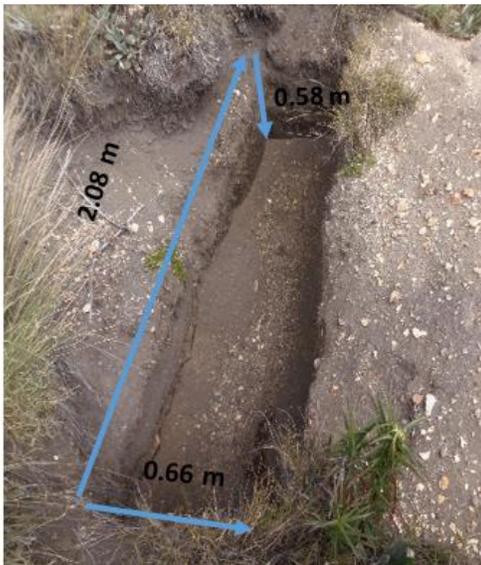
#### Zanjas de Infiltración

Las dimensiones de las zanjas de infiltración medidas en los tres sitios de estudio (Anexo 5), se presentan en el Cuadro 23 y se comparan con las medidas que establecen CONAFOR (2007) y SAGARPA (2009) para la construcción de zanjas de infiltración (0.40-0.50 m de ancho, 2 m de largo y 0.50 m de profundidad). En Altzomoni, las dimensiones fueron mayores; en El Paraje las zanjas tuvieron dimensiones menores; y en Zoquiapan las dimensiones fueron de 0.51 m de ancho, 1.90 m de largo y 0.50 m de profundidad en promedio, siendo este el sitio que más se acercó a lo establecido por CONAFOR y SAGARPA. En el Cuadro 24 también se incluye la superficie en m<sup>2</sup> que ocupa cada zanja de infiltración según su ancho y largo.

**Cuadro 24.** Dimensiones de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio.

Sitio	Ancho (m)		Largo (m)		Profundo (m)		Superficie (m <sup>2</sup> )	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
Altzomoni	0.66	±0.12	2.08	±0.37	0.58	±0.13	1.39	±0.41
El Paraje	0.43	±0.02	1.87	±0.24	0.48	±0.06	0.81	±0.13
Zoquiapan	0.51	±0.07	1.90	±0.34	0.50	±0.06	0.96	±0.16

$\bar{X}$ = Media



a) Altzomoni



b) El Paraje



c) Zoquiapan

**Figura 59.** Dimensiones de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio (2015).

Respecto al azolvamiento debido al desprendimiento de material de los taludes de la zanja (talud frontal y talud de bordo), se observó que del volumen total de la zanja se encontraba azolvado el 17% en Altzomoni, 40% en El Paraje y 41% en Zoquiapan , Figura 60 a), b) y c).



a) Altzomoni



b) El Paraje



c) Zoquiapan



**Figura 60.** Azolve de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio (2015).

En los tres sitios las tinas ciegas se encuentran distribuidas a tres bolillos tal como lo establece el manual de CONAFOR (2007) y SAGARPA (2009). Los tres sitios tuvieron distancias laterales semejantes (Altzomoni=1.90 m; El Paraje: 2.22 m; Zoquiapan=2.37 m), sin embargo Altzomoni y El Paraje tuvieron distancias frontales menores a lo establecido (4.10 m y 4.22 m respectivamente), y Zoquiapan dimensiones frontales mayores (10.27 m) siendo este el sitio que más se acercó a las distancias establecidas entre zanjas.

**Cuadro 25.** Comparación de las medidas de la zanja (ancho y largo) , la distancia entre zanjas (lateral y frontal) y el número de zanjas por hectárea, entre los tres sitios de estudio y lo establecido por CONAFOR (2007).

Sitio	$\bar{X}$ Dimensiones de las Zanjas		$\bar{X}$ Distancia entre Zanjas		No. de Zanjas/ ha		No. de Zanjas/ ha
	Ancho (m)	Largo (m)	Lateral (m)	Frontal (m)	Por Filas	Por Columnas	
Altzomoni	2.08	0.66	1.90	4.10	25.10	21.01	527.26
El Paraje	1.87	0.43	2.22	4.22	24.43	21.50	525.28
Zoquiapan	1.90	0.51	2.37	10.27	23.45	9.28	217.64
CONAFOR	2.00	0.40	2.00	9.60	25.00	10.00	250.00

$\bar{X}$ =Promedio

La cantidad de zanjas de infiltración por fila en una hectárea fue de 25 en Altzomoni, 24 en El paraje y de 23 en Zoquiapan, similar a la cantidad que establece CONAFOR; la cantidad de zanjas por columna en una hectárea fue de 21 en Altzomoni y El Paraje, más del doble de lo establecido por CONAFOR (10 zanjas), siendo Zoquiapan el sitio que más se acercó a lo establecido con 9 zanjas por columna.

La cantidad de zanjas por hectárea en Altzomoni fue de 527 y en El paraje de 525, esto es mayor a las que establece CONAFOR (250 zanjas/ha) debido a que la distancia frontal entre zanjas es mucho menor. En Zoquiapan la cantidad de zanjas por hectárea fue de 217, esto debido a que su distancia frontal y lateral es mayor que en los otros sitios.

De acuerdo con las dimensiones mencionadas, se calculó la cantidad de suelo removido por la construcción de las zanjas de infiltración, los resultados se muestran en el Cuadro 26.

**Cuadro 26.** Remoción de suelo por hectárea en los tres sitios de estudio.

Sitio	Número de zanjas (ha)	Remoción de suelo por zanja	Remoción de suelo
		$\bar{X}$ (ton)	(ton/ha)
Altzomoni	527	0.80	421.8
El Paraje	525	0.38	197.2
Zoquiapan	217	0.39	85.6

$\bar{X}$  = Media

$\sigma$  = Desviación Estándar

Con la cantidad de material extraído de las zanjas se expone a la intemperie el Corg. que se acumula en los diferentes horizontes del suelo. Así se exponen 5.8 ton/ha de Corg. en Altzomoni, 3.7 ton/ha de Corg. en El Paraje y 3.3 ton/ha de Corg. en Zoquiapan (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Cantidad de Carbono Orgánico (Corg) expuesto por hectárea en los tres sitios de estudio.

Sitio	Número de zanjas (ha)	Corg Expuesto		Pérdida de Corg	
		$\bar{X}$ (Kg)	$\bar{X}$ (ton)	(Kg/ha)	(ton/ha)
Altzomoni	527.26	10.9	0.011	5747.1	5.8
El Paraje	525.28	6.9	0.007	3624.4	3.7
Zoquiapan	217.64	14.7	0.015	3199.3	3.3

$\bar{X}$  = Media

$\sigma$  = Desviación Estándar

Corg= Carbono Orgánico

### Bordos de las Zanjas de Infiltración

En el Cuadro 28, se muestra el promedio de las dimensiones de los bordos tanto frontal como longitudinal en los sitios de estudio:

**Cuadro 28.** Dimensiones de los bordos de las zanjas de infiltración en los tres sitios de estudio.

Sitio	Frente (m)		Ancho (m)		Superficie (m <sup>2</sup> )	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
Altzomoni	2.3	0.5	2.4	0.6	5.3	1.41
El Paraje	1.3	0.2	2.0	0.4	2.7	0.67
Zoquiapan	2.2	0.3	1.2	0.3	2.8	1.04

$\bar{X}$  = Media

$\sigma$  = Desviación Estándar

- En Altzomoni, los bordos tuvieron una dimensión frontal de 2.3 m y una dimensión longitudinal de 2.4 m, más de lo establecido por CONAFOR (2007), la superficie de suelo cubierta por el material fue de 5.3 m<sup>2</sup> por zanja, 2,815.6 m<sup>2</sup>/ha.
- En El Paraje, los bordos tuvieron una dimensión frontal de 1.3 m y una dimensión longitudinal de 2.0 m, la superficie de suelo cubierta por el material fue de 2.7 m<sup>2</sup> por zanja, 1,436 m<sup>2</sup>/ha. En este sitio se observó que los bordos ya estaban deshechos y el material ya había sido arrastrado rellenando las zanjas cuesta abajo, por lo mismo estas presentaron mayor azolvamiento.

**Figura 61.** La mayoría de los bordos en Altzomoni tenían un árbol en el centro, 2015.



- En Zoquiapan, los bordos tuvieron una dimensión frontal de 2.3 m y una dimensión longitudinal de 1.2 m, la superficie de suelo cubierta por el material fue de 2.8 m<sup>2</sup> por zanja, 598.6 m<sup>2</sup>/ha. En este sitio no se distinguieron claramente los bordos, ya que el material había sido arrastrado relleno las zanjas cuesta abajo, por lo mismo estas zanjas presentaron un azolvamiento de 80% del volumen total de la zanja.

**Figura 62.** La mayoría de los bordos en El paraje se encontraron dispersos, por lo que no fueron fáciles de distinguir, 2015.



**Figura 63.** Los bordos del sitio Zoquiapan no se distinguieron a simple vista, por el azolve, 2015.



**Cuadro 29.** Superficie cubierta por el material excavado de la zanja en los tres sitios de estudio.

Sitio	Zanjas /ha	% Azolve		SSC por MEZ (m <sup>2</sup> )		SSCxMEZ (m <sup>2</sup> ) / ha	% SSCxMEZ / ha
		$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$		
Altzomoni	527.2	17.2	±6.7	5.3	±1.4	2815.6	28.2
El Paraje	525.2	40.6	±18.4	2.7	±0.7	1436.0	14.4
Zoquiapan	217.6	41.7	±26.6	2.7	±1.0	598.6	6.0

$\bar{X}$  = Media

$\sigma$  = Desviación Estándar

SSC por MEZ = Superficie de suelo cubierta por el material excavado de la zanja

Con base al promedio de la superficie que ocupa la zanja y a la superficie que cubre el material del bordo, se calculó la superficie de terreno que sufre una modificación por la construcción de las zanjas. En Altzomoni la superficie de suelo afectado fue de 3,548 m<sup>2</sup>/ha; en El Paraje la superficie de suelo afectado fue de 1,863.7 m<sup>2</sup>/ha; y en Zoquiapan fue de 806.8 m<sup>2</sup>/ha (Cuadro 30).

**Cuadro 30.** Superficie de suelo cubierta por el material excavado de la zanja en los tres sitios de estudio.

Sitio	Zanjas /ha	SSCxMEZ /ha (m <sup>2</sup> )	% SSCxMEZ / ha	SSxZ (m <sup>2</sup> )	SSxZ /ha (m <sup>2</sup> )	% SSxZ/ha	SS Afectado/ha (m <sup>2</sup> )	% SS Afectado/ha
Altzomoni	527.26	2815.6	28.2	1.39	732.5	7.3	3548.0	35.5
El Paraje	525.28	1436.0	14.4	0.81	427.7	4.3	1863.7	18.6
Zoquiapan	217.64	598.6	6.0	0.96	208.2	2.1	806.8	8.1

SSCxMEZ/ha = Superficie de suelo cubierta por el material excavado de la zanja por hectárea.

SSxZ = Superficie de la zanja ( $\bar{X}$  Área de zanja).

SS Afectado = Superficie de Suelo Afectado.

También se compararon algunas características del suelo que pueden modificarse por la remoción y amontonamiento en el bordo. En el Cuadro 31 se presentan los datos de densidad aparente DA, volumen total de poros (VPT), humedad (Hum), estabilidad de agregados y Carbono orgánico (Corg), medidas en el bordo (Bordo A y B), en el fondo de la zanja y en muestras tomadas en suelo sin disturbar (suelo control).

**Cuadro 31.** Comparación de la densidad aparente (DA), volumen total de poros (VTP) de los suelos con zanjas de infiltración (bordo A, bordo B y fondo) y los suelo sin zanjas (control), en los tres sitios de estudio.

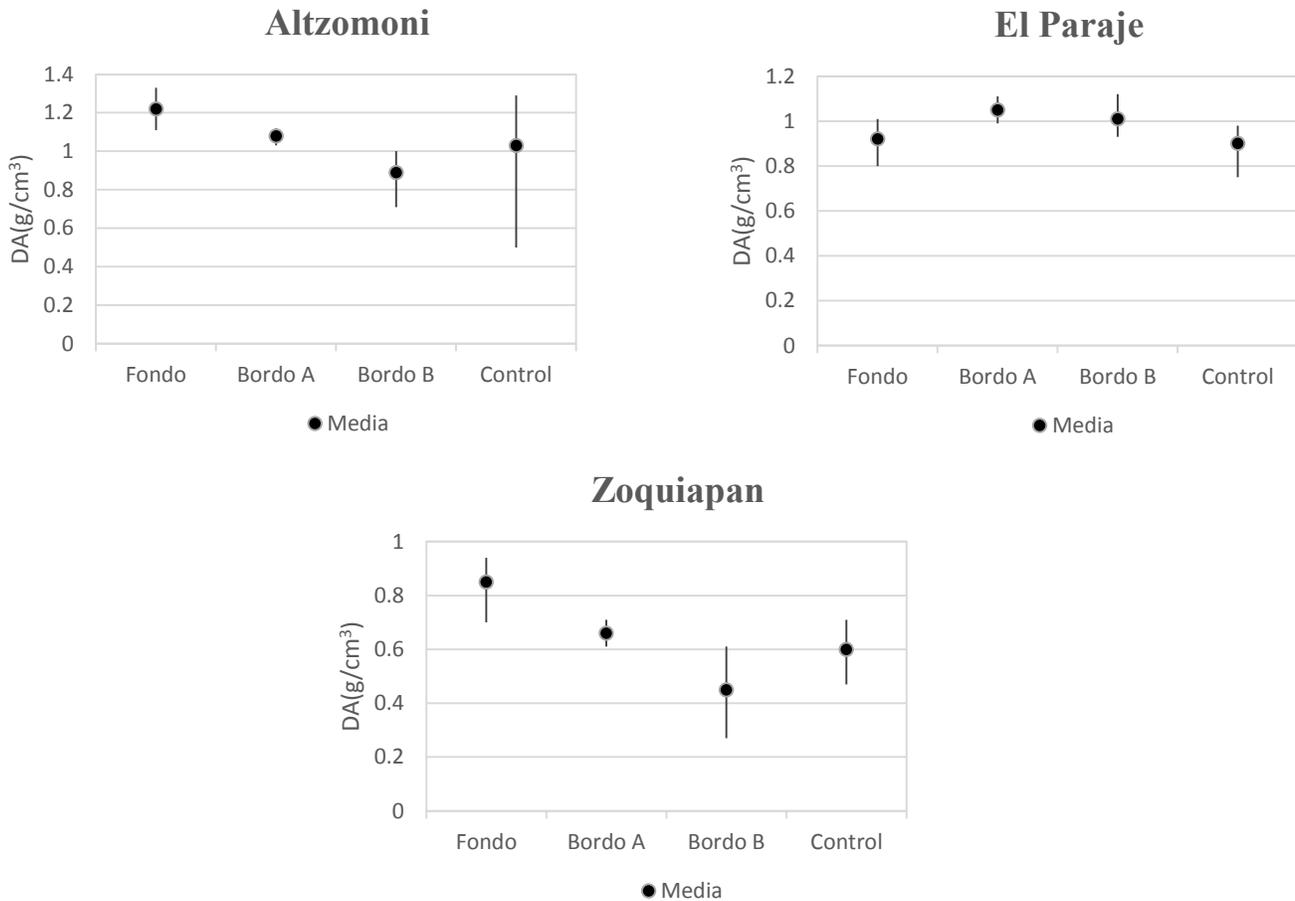
Sitio	$\bar{X}$ DA (g/cm <sup>3</sup> )				% VTP			
	Bordo A	Bordo B	Fondo	Control	Bordo A	Bordo B	Fondo	Control
Altzomoni	1.8±0.04	0.89±0.16	1.22±0.07	1.03±0.28	47.98±20.85	71.27±10.77	52.33±10.40	46.33±18.60
El Paraje	1.05±0.06	1.01±0.10	0.92±0.07	0.90±0.08	50.85±10.79	56.71±2.63	57.52±6.89	52.29±5.73
Zoquiapan	0.66±0.05	0.45±0.17	0.85±0.90	0.60±0.10	68.21±2.44	60.98±8.69	62.77±3.25	50.78±17.29

$\bar{X}$  DA = Media de densidad aparente

El Bordo A (superficial) estar formado por el suelo de los horizontes más profundos de la zanja, este bordo tiende a ser más compactado al estar más expuesto que el bordo B (subsuperficial), formado por el suelo superficial de la zanja. Debido a esto la DA fue mayor en el Bordo A (0.66 a 1.8 g/cm<sup>3</sup>) que en el Bordo B (0.45 a 1.01 g/cm<sup>3</sup>).

Tanto el bordo A como el fondo de la zanja de infiltración ( $0.85-1.22 \text{ g/cm}^3$ ) tuvieron los valores de DA más altos, lo que nos indica que el fondo de la zanja se compacta y el material de la superficial del bordo al perder estructura disminuye en porosidad.

La DA en el suelo control (muestras de suelo sin zanjas de infiltración) fue menor que el Bordo A y en el Fondo de la zanja de infiltración, con valores de  $0.60$  a  $1.03 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .



**Figura 64.** Comparación de densidad aparente (Da) medida en los bordos, en el fondo de la zanja de infiltración y en el perfil del suelo en los tres sitios de estudio.

El mayor porcentaje de humedad se obtuvo tanto en el suelo del Perfil ( $32.83-89.44\%$ ) como en el suelo del Bordo B ( $45.94-95.82\%$ ), en tanto que en el bordo A se obtuvieron valores los más bajos de humedad ( $41.99-82.74\%$ ). La estabilidad de los agregados fue mayor en el Perfil del suelo (de media a muy alta) que en el suelo de los bordos (de baja a media).

**Cuadro 32.** Comparación de la humedad actual (Hum), estabilidad de agregados y contenido de carbono orgánico (Corg) medidas en los bordos de las zanjas de infiltración y en el perfil de suelo (horizonte superficial).

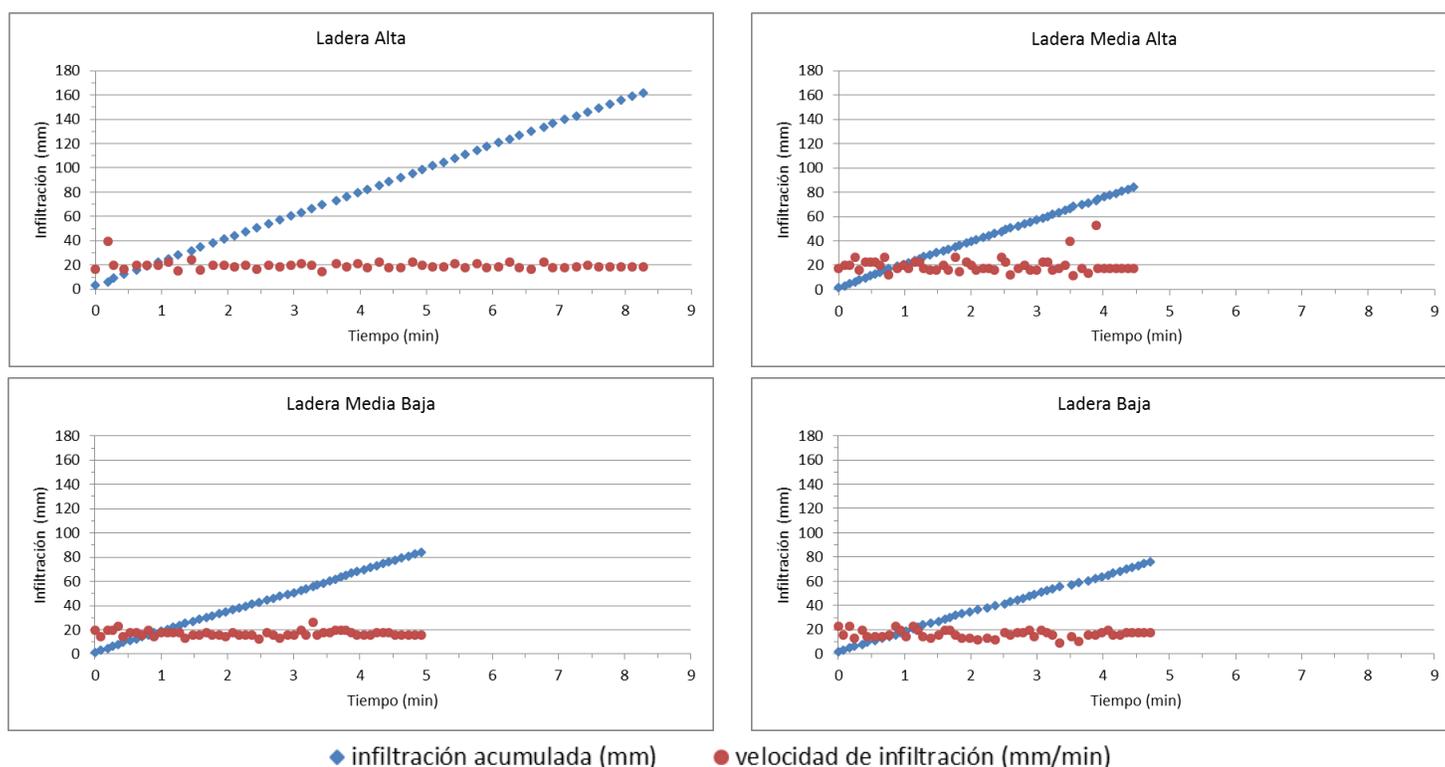
Sitio	$\bar{X}$ % Hum			Estabilidad de Agregados		Corg	
	Bordo A	Bordo B	Perfil	Bordo	Perfil	Bordo	Perfil
Altzomoni	46.87±10.81	55.23±21.11	32.83±7.76	Mediana	Alta-Muy Alta	1.4	1.3
El Paraje	41.99±3.11	45.94±5.35	49.05±5.54	Baja	Media-Alta	2.3	2.2
Zoquiapan	82.74±4.45	95.82±16.15	89.44±4.77	Mediana	Muy Alta	3.4	7.7

$\bar{X}$  % Hum = Media del porcentaje de humedad

### 3.2.6. Velocidad de Infiltración

#### Altzomoni

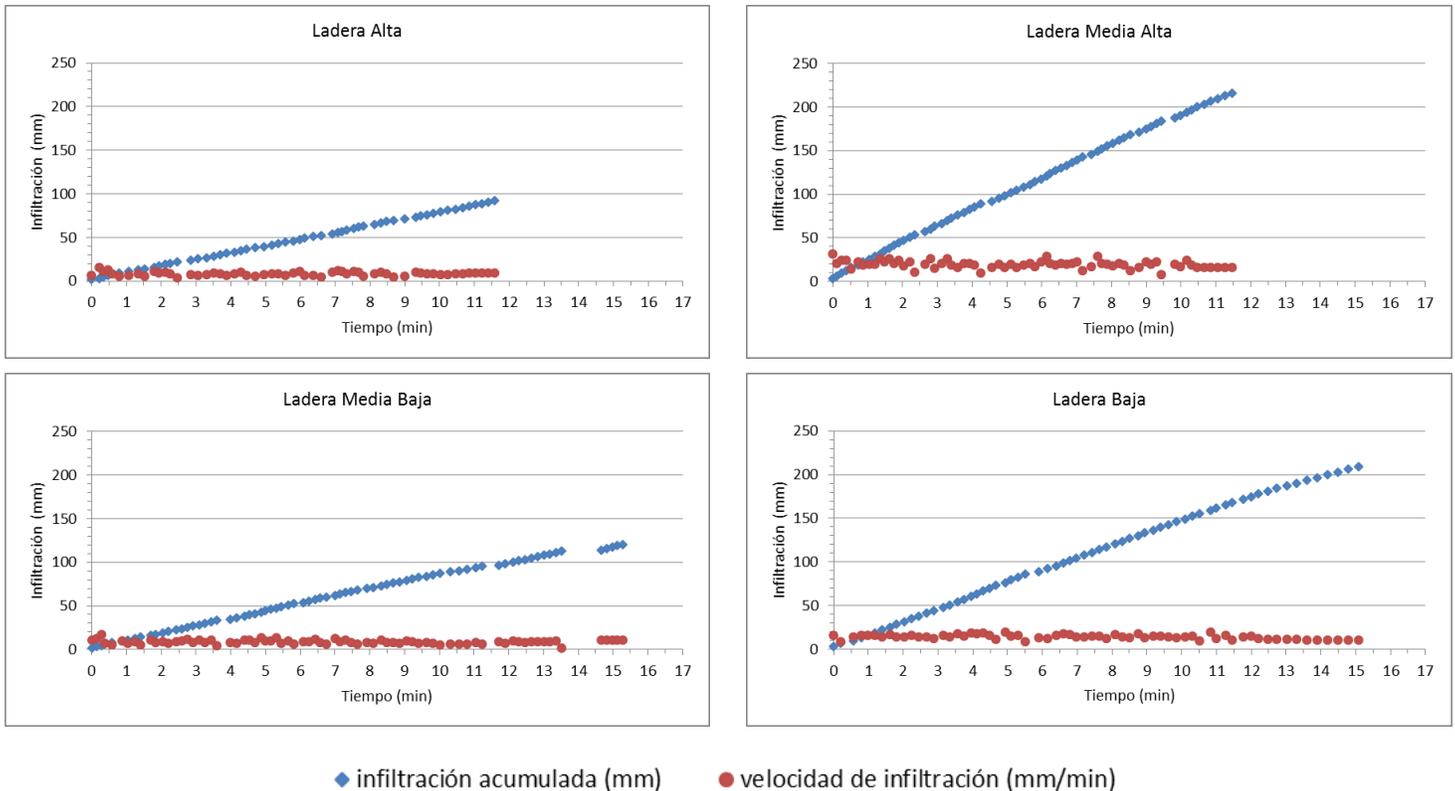
La prueba de infiltración se realizó en 4 diferentes posiciones de la ladera (Anexo 6), en general la velocidad de infiltración fue rápida (17.45mm/min en promedio), la velocidad en la ladera alta fue de 18.7 mm/min, en la media alta de 17.6 mm/min, en la media baja de 15.9 mm/min y en la ladera baja de 17.6mm/min por lo que la infiltración fue más rápida en la parte alta de la ladera, en donde se encuentran las zanjas de infiltración (Figura 65).



**Figura 65.** Curvas de velocidad de infiltración medidas con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf\_Tec) en diferentes puntos de suelo control de la ladera en Altzomoni.

## El Paraje

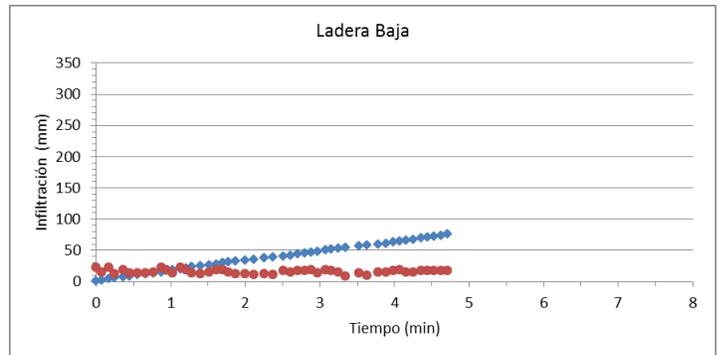
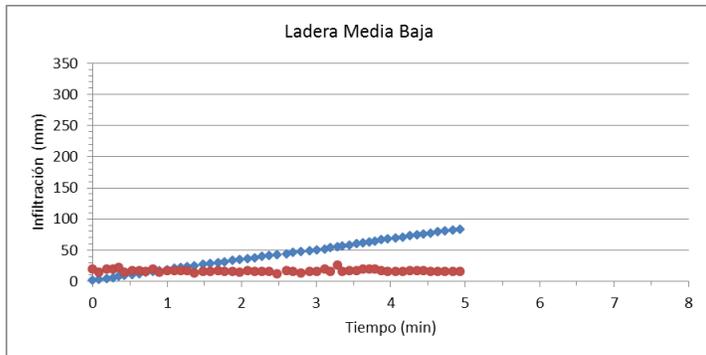
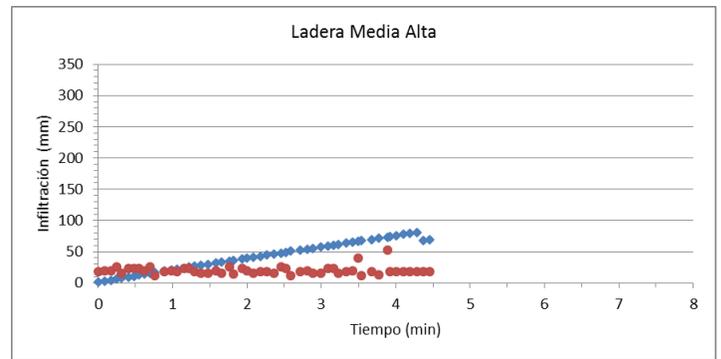
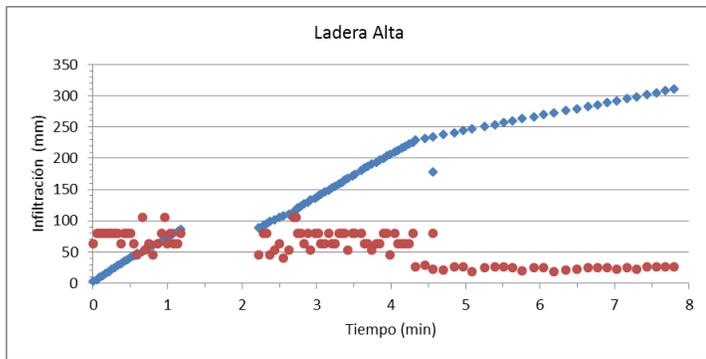
La prueba de infiltración se realizó en 4 diferentes posiciones de la ladera (Anexo 6), en general la velocidad de infiltración fue media (11.47 mm/min en promedio), la velocidad en la ladera alta fue de 8.8 mm/min, en la media alta de 15.9 mm/min, en la media baja de 10.6 mm/min y en la ladera baja de 10.6 mm/min por lo que la infiltración fue más rápida en la parte media de la ladera, en donde se encuentran las zanjas de infiltración (Figura 66).



**Figura 66.** Curvas de velocidad de infiltración medidas con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf\_Tec) en diferentes puntos de suelo control de la ladera en El Paraje.

## Zoquiapan

La prueba de infiltración se realizó en 4 diferentes posiciones de la ladera (Anexo 6), en general la velocidad de infiltración fue alta (19.4 mm/min en promedio), la más alta de los 3 sitios, debido a que fue el suelo con el mayor contenido de MO. La velocidad en la ladera alta fue de 26.5 mm/min, en la media alta de 17.6 mm/min, en la media baja de 15.9 mm/min y en la ladera baja de 17.6 mm/min por lo que la infiltración fue más rápida en la parte alta de la ladera, en donde se encuentran las zanjas de infiltración (Figura 67).



◆ infiltración acumulada (mm)    ● velocidad de infiltración (mm/min)

**Figura 67.** Curvas de velocidad de infiltración medidas con un infiltrómetro de doble anillo (marca Turf\_Tec) en diferentes puntos de suelo control de la ladera en Zoquiapan.

### 3.3. Discusión

El objetivo de la construcción de las zanjas de infiltración es incrementar la infiltración que tiene el suelo en su estado natural, así como contribuir a la reforestación mediante la plantación de un árbol en su bordo con la finalidad de desarrollar un sistema de raíces que favorezcan la porosidad del suelo y la filtración de los escurrimientos, (SAGARPA, 2009).

Para ello se debe de cumplir con ciertas normas establecidas por CONAFOR y SAGARPA, entre las que destacan las medidas de dichas zanjas que son de 0.5m de ancho \*2m de largo \*0.5m de profundidad, sin rebasar la cantidad de 250 zanjas por hectárea. Sin embargo en el sitio 1 "Altzomoni" y en el sitio 3 "Zoquiapan" las dimensiones de las zanjas fueron mayores, de 0.6m\* 2.8m\* 0.58m y 0.51m\*1.90m\*0.5m, con superficies de 1.39 m<sup>2</sup> y 0.96 m<sup>2</sup> respectivamente, lo cual indica que esta práctica dentro del Parque Nacional Izta-Popo no se realizó siguiendo los parámetros básicos.

La construcción de las zanjas de infiltración tiene como principio la extracción de cierta cantidad de suelo por zanja, esta cantidad de suelo al ser extraída y expuesta a la intemperie causa una alteración inmediata de sus propiedades físicas, químicas y biológicas naturales ocasionando a la vez una afectación de sus funciones. En los sitios estudiados, la cantidad de suelo extraído por zanja oscila entre los 0.38 a 0.80 ton, y la cantidad de zanjas construidas por hectárea fue de aproximadamente 217 a 527 (mayor a lo recomendado por CONAFOR), por lo tanto, se llega a remover de 85 a 421 ton de suelo por ha; es decir por hectárea más de 80 toneladas de suelo pierde sus propiedades naturales originales.

A esta cantidad de suelo removida se le suma la superficie de suelo descubierto por la zanja que va de los 208 a los 732 m<sup>2</sup> por ha., y la superficie de suelo cubierto por el material extraído (bordo de la zanja) que va de los 598 a los 2, 815 m<sup>2</sup> por ha. , generando así un área afectada de 806 a 3,548 m<sup>2</sup> por ha., es decir la construcción de zanjas de infiltración, afecta las funciones de más del 30% del suelo en una hectárea, ocasionando que ese 30% de suelo deje de ser un soporte de la flora y fauna; perturbe su generación de biomasa y diversidad de especies; rompa con la capacidad de captar, filtrar, amortiguar y transformar el agua y el aire; desequilibre los ciclos del C, N, P y S, y quede expuesto a la erosión hídrica y eólica.

El talud de las zanjas en sitios de estudio con horizontes Arenosos (Altzomoni) y Arenosos Franco (El Paraje) con el paso del tiempo se va socavando tanto en la parte superficial como en la parte subsuperficial, lo cual ha retrocedido más de 20 cm, incrementando así la cantidad de suelo removido. Así mismo la cantidad de suelo removido por la extracción del suelo puede verse también en el porcentaje de

azolvamiento, que es de 17% en Altzomoni, 40% en El Paraje y 41% en Zoquiapan, esto debido al desprendimiento de los taludes de la zanja tanto del talud del bordo como del talud frontal.

Otra de las funciones del suelo que es alterada con su extracción, tiene que ver con la relación de éste con la atmosfera ya que los suelos tienen un importante papel en la concentración de gases emitidos a la atmosfera, al constituir el mayor almacenamiento terrestre de Carbono (Lal et al., 1995). En relación a esto, la extracción del suelo por la construcción de zanjas de infiltración ocasiona la exposición de Carbono Orgánico (Corg) que en condiciones naturales es almacenado por el suelo. En los sitios de estudio se obtuvo que el Corg. expuesto por zanja es de 6.9 a 14.7 kg, por lo que la construcción de una hectárea de zanjas de infiltración, ocasiona la pérdida potencial de 3.3 a 5.8 toneladas de Corg.

La pérdida de Corg lleva a la pérdida de materia orgánica, con lo que disminuye la capacidad de retener agua, la aireación del suelo, la agregación de partículas del suelo, el almacén y proporción de nutrientes a las plantas, la presencia biológica en el suelo; y al aumento de la DA. Lo anterior es contrario con los propósitos ya que toda práctica de conservación de suelos debe buscar recuperar, mantener y/o incrementar el contenido de materia orgánica del suelo y en consecuencia, mejora la estabilidad de los agregados, acción que no realizan las zanjas de infiltración (Doran y Parkin, 1994).

Otra de las irregularidades en la construcción de las zanjas de infiltración, se ve en la selección de los sitios de construcción, los cuales no tienen una homogeneidad entre sí, ya que en la descripción de los sitios de estudio, se obtuvo que las condiciones ambientales en las cuales se construyeron las zanjas de infiltración dentro del Parque son distintas en clima, en pendiente (25-28%); en altitud (de 3200 a 3800 msnm) y posición en la ladera (sitio 1 “Altzomoni” alta, en el sitio 2 y 3 “El Paraje” y “Zoquiapan” media).

Estas diferencias ambientales, se ven reflejadas en la diferencia de tipo y abundancia de vegetación, como es el caso de Zoquiapan en donde la cobertura de vegetación es del 90% la cual tiende a generar una mayor protección al suelo de la erosión, a diferencia de El Paraje en donde la escasa vegetación (40%) ocasiona que exista una mayor erosión de suelo. Esto basándonos en Shaxson, (2001), quien explica que si las gotas de lluvia caen directamente sobre la superficie del suelo sin ser antes interceptadas por la vegetación, llevan energía que puede desintegrar los agregados del suelo en pequeñas partículas, por lo que mientras mayor sea la exposición de los suelos a las gotas de lluvia, o lo que es lo mismo, cuanto menos cubierto está el suelo por vegetación, mayor será la erosión.

En cuanto al clima, los tres sitios presentan un clima Cb'(w2) es decir semifrío, subhúmedo con verano fresco largo; temperatura media anual menor a los 15°C; temperatura mínima anual de menor a los 7°C; y

temperatura máxima anual de menor a los 22 °C, con precipitaciones mayores a 950 mm, lo cual está fuera de lo recomendado por CONAFOR, quien recomienda construir las zanjas de infiltración en zonas semiáridas en donde la precipitación no sea muy alta, es decir en regiones donde es necesario favorecer la infiltración del agua en el suelo y la recarga de acuíferos; o en zonas templadas con pendientes menores a 40%, ya que el movimiento de tierra que se hace en la zanja aguas arriba propicia que se deposite en la zanja de aguas abajo por el escurrimiento superficial.

CONAFOR señala que en los suelos con algún horizonte arcilloso en el perfil; con profundidad mayor a 15 cm; y con horizontes superficiales oscuros no se deben realizar zanjas de infiltración. Sin embargo dentro del Parque Nacional Izta Popo como en su zona de influencia, se han construido zanjas en sitios con suelos de textura Franca arenosa (Zoquiapan), con colores del suelo oscuros, y con profundidades que llegan hasta los 95 y 100 cm (en los tres sitios de estudio) lo cual nuevamente rompe con los parámetros establecidos.

Los sitios de Altzomoni y El Paraje, presentaron suelos Arenosos y Arenoso franco, estos tipos de suelo tienen un volumen total relativamente grande de poros entre las partículas minerales grandes, pero la mayoría de los poros son tan grandes que el agua de lluvia drena a través de ellos y relativamente poca es retenida dentro del perfil. En suelos con presencia de arcilla como en el caso de Zoquiapan (10-20%), puede existir mayor porosidad, dando lugar a una mayor percolación, permitiendo que el agua drene y puede ser movida por las raíces de las plantas. Sin embargo, si los suelos se someten a compactación, tanto la entrada como la salida del agua pueden ser muy lentas (USER manual, 1992).

Los suelos con vegetación natural abundante como el sitio de Zoquiapan, generalmente tienen gran porosidad debido a la alta actividad biológica, por lo que construir zanjas de infiltración que compacten el suelo, genera una reducción en la infiltración natural, reacción opuesta a la que se espera con su implementación.

Uno de los parámetros más importantes a considerar para la construcción de las zanjas de infiltración es la infiltración natural de los suelos. En los tres sitios de estudio, al comparar la velocidad de infiltración en 4 diferentes posiciones de la ladera, se observó que en donde están construidas las zanjas, la velocidad fue mayor que en las demás posiciones de la ladera. Según los parámetros de la USDA (1999), la infiltración medida en los 3 sitios presenta velocidades muy rápidas, de 15.9 a 18.7 mm/min, representando condiciones naturales adecuadas de infiltración. En el caso de Zoquiapan, la densa cobertura de vegetación con estratos arbustivos y herbáceos da origen a un mantillo de 2.5 a 30 cm de grosor, que favorece una mayor infiltración.

Sin embargo al construir las zanjas de infiltración, se está compactando el suelo del fondo de la zanja y el suelo del bordo (en donde se deposita el suelo extraído), con base en ello, la FAO, (2000a) describe que la compactación del suelo puede destruir o reducir enormemente las dimensiones de los poros del suelo y, por ende, reducir la tasa de infiltración del agua de las lluvias; por lo que no solo se están construyendo zanjas de infiltración en suelos con tasas de infiltración óptimas en su estado natural, sino que se está disminuyendo la infiltración al compactar indirectamente el suelo y se está favoreciendo la erosión del suelo expuesto en el bordo.

El material extraído que forma el bordo (A y B) de la zanja de infiltración tiene una D.A. mayor en el bordo A (0.66 a 1.8 g/cm<sup>3</sup>) que en el Bordo B (0.45 a 1.01 g/cm<sup>3</sup>), ya que el Bordo A tiende a ser más compactado que el bordo B, por la exposición del suelo; y también por estar formado por el suelo de los horizontes más profundos de la zanja, este material expuesto es susceptible de erosionarse ladera abajo.

Los procesos que se ven afectados en relación con la DA, según Seybold *et al.*, (1997), son la penetración de raíces, el espacio poroso y la actividad biológica. La DA del fondo de zanja de infiltración (0.85-1.22 g/cm<sup>3</sup>) fue mayor a la DA del suelo control (0.60 a 1.03 g/cm<sup>3</sup>), lo cual indica que existe un ambiente pobre para el crecimiento de raíces; una menor cantidad de espacio poroso; una aireación reducida; y por ende una mayor compactación, que ocasionan una reducción de la infiltración del agua. De este modo, un suelo en su estado natural tienen una DA menor y una mayor infiltración del agua.

Según Karlen *et al.*, (1997), a mayor estabilidad de agregados habrá una mayor retención y transporte de agua y nutrientes, una menor erosionabilidad del suelo, y una mayor infiltración; si la estabilidad de agregados es baja puede resultar en un aumento de la escorrentía, la erosión del agua, y la reducción del agua disponible en el suelo para el crecimiento vegetal, en este sentido, los bordos de las zanjas que se componen de material extraído y expuesto, reflejan una baja y media estabilidad de agregados, en comparación a la alta y muy alta estabilidad presentada en los perfiles de suelo; en especial en Zoquiapan en donde el mayor porcentaje de arcillas da una mayor estabilidad de agregados.

En El Paraje como en Zoquiapan, los bordos presentan una menor retención de humedad en comparación con los sitios control. Esta propiedad repercute en la cantidad de agua disponible, creando condiciones desfavorables para la supervivencia de la reforestación implantada en el suelo del bordo.

El pH obtenido en todos los horizontes de suelo varía de (6.5 a 6.7) lo cual indica una buena disponibilidad de nutrientes en condiciones naturales de suelo.

Los resultados de calidad de suelo obtenidos mediante la evaluación edafo-ecológica de los perfiles, mostraron que el suelo en su estado natural presenta una profundidad fisiológica alta en los tres sitios de estudio, lo cual indica que en los tres sitios se tiene una buena penetrabilidad de raíces; un alto volumen total de poros, una alta y muy alta capacidad de aireación, una alta a muy alta conductividad hidráulica, una baja a media erosionabilidad, una regular a alta capacidad de intercambio catiónico, una mediana alta a alta cantidad de bases intercambiables, una alta a extremadamente alta capacidad filtrante y una muy alta a extremadamente alta capacidad amortiguadora.

En suma, las zanjas son innecesarias y muy probablemente contraproducentes para el fin de recargar acuíferos, y claramente negativas para muchas otras funciones del suelo.

## **CONCLUSIONES**

Según los informes del PNIP y los manuales de CONAFOR y SAGARPA, los objetivos que se persiguen con la implementación de las zanjas de infiltración son la captación y recolección del agua, para una mejora de infiltración. Sin embargo los resultados obtenidos en este estudio indican lo contrario, ya que al construir las zanjas se compacta el suelo del fondo de la zanja, se obstruye el suelo del área cubierta por el material extraído, y se destruyen las funciones naturales del material extraído de la zanja, por lo que la infiltración natural de los sitios estudiados en el PNIP (catalogados según los parámetros de la USDA como de buena y rápida infiltración) es reducida.

Los resultados también indican que no existe una evaluación homogénea de los sitios en donde se construyen las zanjas de infiltración, ya que los resultados de la localización y características ambientales de los sitios con zanjas de infiltración implementadas en el PNIP no son iguales en los tres sitios, ni presentan alguna condición en particular para su elección. Así mismo ninguna de las condiciones ambientales de los 3 sitios entra dentro de los parámetros recomendados por CONAFOR, quien recomienda las zanjas en suelos de clima árido, de baja precipitación, y en suelos con profundidad menor a 15 cm; lo cual es completamente opuesto a las condiciones ambientales del Parque.

La implementación generalizada de una práctica de conservación, en condiciones ecológicas variables, sugiere que no se tienen claras las condiciones en las cuales esta práctica puede proporcionar algún beneficio, y evidencia la debilidad de los programas ambientales oficiales en relación con las condiciones del territorio. Implementar las zanjas de infiltración sin consideración de todas las características

ambientales de un lugar, ocasionan lo opuesto a la conservación del suelo, es decir una degradación de la calidad de los suelos, que es justamente lo que se quiere evitar.

En el caso del PNIP se están realizando zanjas de infiltración en suelos con buena calidad (en densidad aparente, porosidad total, retención de humedad, infiltración, permeabilidad, aireación etc.), ya que según lo obtenido en la evaluación edafo-ecológica, los tres sitios presentan una profundidad de suelos que alcanza los 90 y 100 cm; buena penetrabilidad de raíces; un muy alto volumen total de poros; una alta capacidad de aireación; una alta conductividad hidráulica; una baja erosionabilidad; una alta capacidad de intercambio catiónico; una alta cantidad de bases intercambiables; una alta capacidad filtrante y una muy alta capacidad amortiguadora.

En los resultados obtenidos en la evaluación de los suelos con zanjas de infiltración, y en los suelos del bordo se obtuvo una notable disminución en la calidad de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que ocasiona una alteración negativa en sus funciones naturales originales.

La variación de las dimensiones de las zanjas de infiltración en el Parque al igual que la cantidad de zanjas por hectárea en los sitios, y su notable diferencia a los parámetros establecidos por CONAFOR, nos dejan ver que no existe una correcta realización de las zanjas, o que no se está vigilando de manera adecuada la forma en cómo se construyen, dando como resultado, sitios con más del doble de zanjas por hectárea de las permitidas por CONAFOR.

Es de suma importancia saber que tanto la cantidad de suelo extraído y expuesto, como la cantidad de suelo cubierto por el material extraído, pierde y altera sus propiedades naturales originales.

La excavación de los primeros 40 cm de suelo ocasiona el desequilibrio de las funciones naturales del suelo, que están relacionadas con la pérdida de carbono orgánico en rangos elevados, ya que es en estos centímetros de suelo en donde se encuentra aproximadamente el 50% del carbono orgánico, el cual es expuesto y colocado sobre la superficie. Esta pérdida es aún más desfavorable dado que el carbono orgánico constituye el detonador principal para el mantenimiento de las funciones básicas de los suelos, por lo que en ambientes donde el suelo es impactado negativamente, la fuente de carbono orgánico es muy limitada.

En este sentido, la pérdida de varias toneladas de carbono orgánico puede ser determinante para la recuperación de las funciones de estos suelos. Por ello, cualquier práctica de conservación de suelos debe buscar incrementar el contenido de carbono orgánico del suelo y no lo opuesto, (Chabbi y Rumpel, 2009).

Por último en los tres sitios de estudio, la infiltración presenta velocidades altas en su estado natural, lo cual indica que en condiciones naturales los suelos del PNIP tienen una buena infiltración, logrando así una correcta función filtro, amortiguadora y transformadora de aire y agua en el suelo. Así mismo se concluye que la implementación de las zanjas disminuye esta infiltración, debido a la compactación que se genera en su proceso de construcción.

Todas estas irregularidades en su construcción, hace necesario poner principal interés en su evaluación, que demuestre qué tanto la obra está funcionando y qué tanto se están generando impactos negativos en el ambiente. Los resultados presentados nos hacen concluir que las zanjas de infiltración no mejoran las propiedades indispensables para el funcionamiento hídrico de los suelos, ni su calidad.

A escala local, la destrucción de los horizontes del suelo nos lleva a una pérdida de la función del suelo como documento histórico del paisaje; la reducción de la calidad del suelo nos lleva a una pérdida del soporte de vegetación y de los organismos vivos; la modificación de la infiltración hace que se pierda la función de regulador del ciclo hidrológico. Así si el suelo pierde la capacidad de filtrar, amortiguar y transformar se estará disminuyendo el secuestro de carbono y se estará aumentando la contaminación del agua; y la pérdida de la función del suelo como un almacén y un reciclador de nutrientes, nos llevará a una pérdida de su fertilidad. Además es muy posible que se esté promoviendo la erosión al poner en superficie suelo removido y sin cobertura vegetal.

Por lo que es importante no seguir realizando zanjas de infiltración que no solo afectan las funciones del suelo sino del medio ambiente en general; así mismo no hay ninguna razón suficientemente fuerte que puede justificar la destrucción del suelo, ya que su regeneración y formación es observable a escalas de tiempo geológico, ya que para formar algunos milímetros de suelo se necesitan lapsos de tiempo que fluctúan de los cientos a miles de años. Este largo periodo debería ser razón suficiente para evitar la extracción del suelo y minimizar su disturbio, con el fin de conservar sus funciones.

Como conclusión general, la conservación ambiental en el país carece de información completa de las condiciones ambientales en las cuales es óptimo realizar cada una de sus obras, por lo que debería de ponerse un especial interés en la evaluación previa de los sitios en donde se pretende implementar cualquier tipo de obra. Para posteriormente realizar evaluaciones periódicas del impacto tanto negativo como positivo que tienen las obras, y así tener bases sólidas para poder modificar los parámetros establecidos por instituciones oficiales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman K, Schöning A, Wegner M, Wetzler A. (2012), *Good practices on soil and water conservation*, Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, GIZ, Alemania, 60 p.
- Aguilar, C. T. (1994), *Impacto ambiental, turismo y ecología de bahías de Huatulco Oaxaca*, Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM, Pp.1-115.
- Anaya, M., M. Martínez, A. Trueba, B. Figueroa y O. Fernández (1991), *Manual de conservación del suelo y del agua*, 3ª. ed., Colegio de Posgraduados, México.
- Arnold, R.W. (1990), "Global soil change: report of an International Institute for Applied System Analysis, International Society of Soil Science", 110 p. In: United Nations, *Environmental Programme: task force on the role of soil in global change. International Society of Soil Science*, UNEP, Laxenburg, Austria.
- Arriaga, L.; J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (2000), *Regiones terrestres prioritarias de México*. CONABIO, México.
- Arshad, M.A. y Coen, G.M. (1992), *Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria*, American J. of Alternative Agriculture 7: 25-31.
- Arshad, M.A y Martín, S. (2002), *Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems*, Agriculture Ecosystems and Environment 88: 153-160.
- Astier-Calderón M., Maass-Moreno M. y Etchevers-Barra J. (2002), *Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable*, Agrociencia. 36(5): 605-620.
- Balbontín, C., C. C. Omar, F. Paz and J. Etchevers (2009), "Soil carbon sequestration in different ecoregions in Mexico", Pp. 71-96. In: Lal, R. and R. Follett, *Soil carbon sequestration and the greenhouse effects*, SSSA Special Publication, no 57.
- Barrow, C. J. (1991) *Land degradation: development and breakdown of terrestrial environments*, Cambridge University, ISBN: 0521353335.
- Bedard-Haughn, A., F. Jongbloed, J. Akkerman, A. Uijl, E. De Jong, T. Yates and D. Pennock (2006), *The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes*, Geoderma, no. 135, Pp. 296-306.
- Betancourt, Y. P. y Pulido, P. (2006), "Actitud de los agricultores hacia el manejo y conservación del suelo y agua en dos comunidades rurales del estado Lara", 298 p. En: *Protección, restauración y conservación de suelos forestales*, SEMARNAT, 3ª edición, México.
- Bhagu, R. C., D. Graillot and S. Gaur (2012), *Stormwater management through infiltration trenches*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 138, no. 3, Pp. 274-281.
- Black, C.A. (1965), *Methods of soil analysis, I. Physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling*, American Society of Agronomy.
- Blum, H. E. W., P. B. Warkentin and E. Frossard (2006), *Soil, human society and the environment*, Geological Society, Special publication, no. 266, Pp. 1-8.
- Bouyoucos, G.J. (1963), *Directions for making mechanical analyses of soil by hydrometer method*, Soil Science.
- Brady, N.C. (1990), *The nature and properties of soils*. McMillan Publishing Company, New York, USA. 621 p.
- Bulcock, M. L. and G. P. W. Jewitt (2013), *Key physical characteristics used to assess water harvesting suitability: Physics and Chemistry of the Earth*, no. 55, Pp. 89-100.
- Buol, S.W., Sanchez, P.A., Cate, R.B. and Granger, M.A. (1975), "Soil fertility capability classification: a technical soil classification system for fertility management", Pp. 126-145. In: Bornemisza, E. and Alvarado A., *Soil Management in Tropical America*, N.C. State Univ., Raleigh.
- Carlson, P. (1990), *Establecimiento y manejo de prácticas agroforestales en la sierra ecuatoriana*, Editorial Cormen, Quito – Ecuador, Pp. 24-111.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H. y Pierce, F.J. (1997), "Concepts of soil quality and their significance", In: Gregorich, E.G. y Carter, M., *Soil quality for crop production and ecosystem health*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Carrillo, M. M. (2009), *Evaluación de impacto ambiental de la vialidad del sur de la ciudad de Pachuca, Hidalgo*, Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.
- CCMSS (2008), *Estudio de las condiciones territoriales y su percepción del Parque Nacional Iztaccihuatl- Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas*, Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, CONANP, México.
- Chabbi, A. and C. Rumpel (2009), *Organic matter dynamics in agro-ecosystems, the knowledge gap*, European Journal of Soil Science, no. 60, Pp. 153-157.
- Chu-Chi, T., Zueg-Sang, C., & Chang- Fu, H. (2004), *Relationships between soil properties and slope position*, Geoderma, 123: 131-142.
- Coca-Cola (2010), *Marcando una diferencia positiva, Informe de sustentabilidad 2010*, Industria Mexicana de Coca-Cola, México.
- Conacher, A. (2002), *A role for geomorphology in integrated*, Australian Geographical Studies, 40: 179-195.

- CONAFOR (2007), *Manual de obras y prácticas de Protección, restauración y conservación de suelos forestales*, 3er edición, ISBN 968-6021-19-1, CONAFOR, México.
- CONAFOR (2009), *Restauración de ecosistemas forestales, guía básica para comunicadores*, Gobierno federal, SEMARNAT, CONAFOR, 1ª edición, México.
- CONAGUA, SMN, Normales climatológicas por estación. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx>
- CONANP, Parque Nacional Izta-Popo. Disponible en <http://iztapopo.conanp.gob.mx>
- CONANP (2008), *Estudio de las condiciones territoriales y su percepción del Parque Nacional Iztaccihuatl. Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas*, CCMSS, México.
- CONANP (2013), *Programa de manejo del Parque Nacional Iztaccihuatl –Popocatepetl*, CONANP, SEMARNAT, México.
- Conesa, V. (1997), *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, Ediciones Mundi-Prensa, 3ª edición, España.
- Cota, E., L.E. Martín y M. Balcázar (2011), *Recarga de acuíferos mediante la construcción de tinajas ciegas*, Pro-Natura, núm. 17, Grupo modelo, México, Pp. 12-14.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez Trinidad and E. Quintamar (2013a), *Forest soil conservation in central Mexico: an interdisciplinary assessment*, Catena, no. 104, Pp. 280-287.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez Trinidad y V. Bunge (2013b), *Evaluación de prácticas de conservación de suelos en Pátzcuaro y Sierra Gorda*, INECC/ Instituto de Geografía, UNAM/Fundación Gonzalo Rio Arronte, A. C., México.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez Trinidad y V. Bunge (2015), *Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trincheras*, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, ISSN 0188-4611, México.
- Critchley, W. and K. Siegert (1991), *A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production*, FAO, Roma, AGL/MISC/17/91.
- Doran J.W. y Parkin T. B. (1994), “Defining and assessing soil quality”, In: Doran J. W., Coleman D. C., Bezdicek D. C. y Stewart B. A. (Eds) (1994), *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Special Publication 35*, Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M. y Liebig, M.A. (1996), *Soil Health and Sustainability*, Advances in Agronomy, Vol. 56. Academic Press, Inc. San Diego, California.
- Dorant, J. W., A. Jones, M. Arshad and J. Gilley (2000), “Determinants of soil quality and health”, Pp. 17-38. In: *Soil Quality and Soil Erosion*, Lal R., CRC Press: Boca Raton, FL.
- Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. (1998), *Indicators of land quality and sustainable land management*, The World Bank, Washington DC, USA.
- EPA (1999), *Storm water technology fact sheet. Infiltration trench*, Environmental Protection Agency, USEPA, 832-F-99-019.
- Ervin CA, Ervin DE (1982), *Factors affecting the use of soil conservation practices: hypotheses, evidences and policy implications*, Land Economics 58 (3): 277-292.
- Escamilla, W. M. (2007), *La vegetación de alta montaña del volcán Iztaccihuatl, México: un enfoque fitosociológico*, Tesis de Maestría, Instituto de Biología UNAM.
- Etchevers J., Hidalgo C., Vergara M., Bautista M. y Padilla J. (2009), “Calidad de suelo: conceptos, indicadores y aplicación en agricultura”, 196 p. En: López- Blanco J. y Rodríguez -Gamiño M. de L. (2009), *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*, ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Colección Geografía para el siglo XXI, Serie Libros de Investigación No. 3.
- FAO (1995), “Sustainable dryland cropping in relation to soil productivity”, In: *FAO Soils Bulletin*, No 72. FAO, Roma. ISBN 92-5- 103792-2.
- FAO (2000), *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*, Boletín de tierras y aguas de la FAO, núm. 8, FAO, Italia.
- FAO (2000a), “Soil conservation and management for small farms experiences from the State of Santa Catarina, Brazil”, 66 p. In: *FAO Soils Bulletin*, No. 77, FAO, Roma.
- FAO (2000b), “Manual on integrated soil management and conservation practices”, 214 p. In: *FAO Land and Water Bulletin*, No. 8. FAO, Roma. ISBN 92-5-104417-1.
- FAO (2002), *Soil moisture and food security in tropical and subtropical agriculture*, FAO, Roma.
- FAO (2005), “Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, el significado de la porosidad del suelo”, In: *FAO Soils Bulletin*, No 79, Roma. ISSN 1020-0657.
- Franco, R. O. (2005), *Geomorfología del volcán Popocatepetl*, Tesis de Maestría, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gao, J. (2010), *Comparative study of SEA experiences between EU and China: the use of indicators, proceedings of EASY-ECO conference on Sustainable Development Evaluation in Europe*, Brussels, Belgium.
- García-Tovar, G.P., Martínez-Serrano, R.G. (2011), *Geología y Geoquímica de las lavas pleistocénicas del estratovolcán Telapón, Sierra Nevada*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 28 (2), 301-322, México.
- Geoportel del Sistema Nacional de Información sobre biodiversidad, CONABIO, Portal de geoinformacion, México. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, consultado en 2015.
- Gil-Stores F., Trasar-Cepeda C., Leiros M. C. y Seoane S. (2005), *Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties*. Soil Biology and Biochemistry 37: 877-887.
- Glendenning, C. J., F. F. van Ogtropb, A. K. Mishrac and R. W. Vervoort (2012), *Balancing watershed and local scale impacts of rain water harvesting in India - A review*, Agricultural Water Management, no. 107, Pp. 1-13.

- Gómez, O. D. (2003), *Evaluación de impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión ambiental*, Ediciones Mundi-Prensa, 2ª Edición, Madrid.
- Hamblin, A.P. (1985), *The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake*, *Advances in agronomy*, 38:95–158.
- Hartfield, J. L., T. J. Sauer and J. H. Prueger (2001), *Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review*, *Journal of Agronomy*, no. 93, Pp. 271-280.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S. (1997), *Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales*, IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- ISRIC (1992), *Procedures for soil analysis*, 3er edición, International Soil Reference and Information Center, Wageningen.
- Janzen, H. H. (2006), *The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it*, *Soil Biology & Biochemistry*, no. 38, Pp. 419-424.
- Jenny, H. (1980), *The Soil Resource: Origin and Behavior. Ecological Studies*, vol. 37. Springer-Verlag, New York.
- Julio, M.P., Delgado, G.H., Huggel, C. y Kaab, A. (2007), *Actividad eruptiva y cambios glaciares en el volcán Popocatepetl, México*, revista boletín de geología, Pp. 153-163. Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/viewFile/462/782>, consultado en 2015.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. y Schuman, G.E. (1997), *Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation*, *Soil Science Society of America J.* 61: 4-10.
- Lal, R. (1994), "Sustainable land use systems and soil resilience", 54 p. In: *Soil resilience and sustainable land use*, CAB International, Wallingford, Reino Unido. ISBN 0-85198-871-7.
- Lal, R. (1995), *Tillage systems in the tropics: Management options and sustainability implications*, *Soils Bulletin* 71. FAO, Rome, Italy.
- Lal R. (1997), *Methods for assessment of soil degradation*, Lewis Publishers, New York.
- Lal, R. (1998), *Methods for Assessment of soil Degradation. Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Larson, W.E. y Pierce, F.J. (1991), "Conservation and Enhancement of Soil Quality In Evaluation for sustainable land management in the developing world", Pp. 175-203. In: (1991), *Proc. of the Int. Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, Board of Soil Res. and Manage., Bangkok, Thailand.
- LGEEPA (1996), *Artículo 3 (Capítulo IV)*, Diario Oficial de la Federación, México.
- Llorens, P., & Domingo, F. (2007), *Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions a review studies in Europe*. *Journal of hydrology*, 335:37-54.
- López, A. (2014). *Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo en una catena en laderas de montaña del Parque Nacional Ixta-Popo*, Tesis de Maestría, UNAM, México, DF.
- López, B. (2008), *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*, Instituto de Geografía, México.
- Lopez, F. R. (2002), *Degradación del suelo, causas y procesos, evaluación e investigación. Centro interamericano de desarrollo e investigación ambiental y territorial*, Universidad de los Andes, Venezuela.
- Loredo, C., S. Beltrán, J. L. Sarreón y C. M. Domínguez (2005), "Prácticas mecánicas para el control de la erosión hídrica". En: Loredo, C., *Prácticas para la conservación de suelo y agua en zonas áridas y semiáridas*, INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis, Libro técnico núm. 1, México.
- Madan, K. M., V. M. Chowdary, Y. Kulkarni and B. C. Mal (2014), *Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis*, *Resources conservation and recycling*, no. 83, Pp. 96-111.
- Magaña, O. (2007), *Evaluación externa de los apoyos de reforestación, obras y prácticas de conservación de suelos y sanidad forestal. Ejercicio Fiscal 2006*, Universidad Autónoma de Chapingo y Grupo GSP, Estado de México.
- Masera, O. (1999), *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS GIRA*, Mundi-Prensa e Instituto de Ecología-UNAM. México. 109 p.
- Miehlich, G. (1991), "Consequences of volcanic ash soils", Pp. 15:217. En: *Comunicaciones*, N0. 15, Fundación Alemana para la investigación científica.
- Muckel, G. B., and M. J. Mausbach (1996), "Soil quality information sheets", Pp. 393–400. In: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart, *Defining soil quality for a sustainable environment*, SSSA Special Publication No. 35. Soil Science Society of America, Inc., and American society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin.
- Muller-Shamann, K.M. y J. M. Restrepo (1999), "Conservación de suelos y agua en la zona andina. Hacia el desarrollo de un concepto integral", 230 p. In: *Memorias de Taller Internacional Regional*, CIAT, Cali, Colombia.
- National Research Council (NRC), (1993), *Soil and Water Quality: An Agenda for Agriculture*, National Academy Press, Washington, DC.
- Nortcliff S. (2002), *Standardisation of soil quality attributes. Agriculture, Ecosystems and Environment*. 88: 161-168
- Oldeman, L.R. (1994), *The global extend of soil degradation. In: Soil Resilience and Sustainable Land Use*, Greenland, D.J. and S. Zabolos, CAB International, Wallingford. Short Run Press Ltd., U.K., Pp.99-118.
- Ortiz, B. y Ortiz, A. (1980), *Edafología*, 3ª edición, Ed. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, México.
- Oweis, T., A. Oberle and D. Prinz (1998), "Determination of potential sites and methods for water harvesting in central Syria", Pp. 83-88. In: Blume, H., H. Eger, E. Fleischhauer, A. Hebel, C. Reij and G. K. Steiner, *Towards sustainability land use*, *Advances in Geoecology*, vol. I, no. 31.
- Pérez C. (2000), *Proposiciones tecnológicas para un desarrollo sustentable del Secano*, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile, Boletín INIA N°42, 250p.

- Pizarro, T. R., V. J. P. Flores, P. C. Sangüesa y A. E. Martínez (2004), *Monografías de zanjas de infiltración*, Universidad de Talca, Bosques de Chile, Terranova, Chile.
- Pizarro, T. R., V. J. P. Flores, P. C. Sangüesa, A. E. Martínez y L. León (2008), *Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile*, Bosque, vol. 29, núm. 2, Pp. 136-145.
- Porta, C. J., Lopez- Acevedo. R. M. (2005), *Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*, Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 541p.
- Pro-natura (2009), *Programa Nacional de Reforestación y cosecha de agua Informe anual*, Coca-Cola México, PRONATURA, CONAFOR y CONANP, México.
- Pro-natura (2011), *Restauración, protección y conservación de los recursos naturales del parque nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl*, Grupo Modelo, México.
- Robert, M. (2001), *Soil carbon sequestration for improved land management*, World Soil Resources Reports 96, FAO, Roma.
- Rodríguez D., H. A. (2008), *Estudios de Impacto ambiental. Guía metodológica*, 2ª edición, Colección Notas, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F. y McSweeney, K. (1995), *How farmers assess soil health and quality*, J. Soil Water Conservation 50: 229-236.
- SAGARPA (2009), *Tinas Ciegas*, Subsecretaría de desarrollo rural, Dirección general de apoyos para el desarrollo rural, Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México.
- Shaxson T.F., Hudson, N.W., Sanders, D.W., Roose, E. y Moldenhauer, W.C. (1989), *Land husbandry: a framework for soil and water conservation*, Soil and Water Conservation Society and the World Association of Soil and Water Conservation, Ankeny, Iowa, USA.
- Schlichting, E., H.-P. Blume y K. Stahr (1995), *Bodenkundliches Praktikum*, Pareys Studentexte 81, 2ª. Edición, Pp. 96-97.
- Schoeneberg, P., & Wysocki, D. (2005), *Hydrology of soils and Deep regolith: A nexus between soil*. Geoderma, 126:117-128.
- Shaxson, T.F. (2001), "Soil moisture conservation", In: L. García-Torres, J. Benites, A. Martínez-Vilela, *Conservation Agriculture, a worldwide challenge*, Vol. 1, Córdoba, España, ISBN 84-932237-1-9 (vol. 1), 84-932237-2-7 (vol.2).
- SEMARNAT (2002), *Norma Oficial Mexicana Nom-059-ECOL-2010*, Diario Oficial de la Federación, México.
- SEMARNAT (2005), *Modelo de Ordenamiento Ecológico y por Riesgo Eruptivo del Territorio del Volcán Popocatepetl y su Zona de Influencia: Memoria técnica*, Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos, Cupreder-BUAP, México, Pp. 338.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L. y Rogers, H.H. (1997), "Quantification of Soil Quality", Pp. 387-403. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F. y Stewart, B.A., *Soil Process and the Carbon Cycle*, Press Inc., USA.
- Sheeder JR, Lynne DG (2011), *Empathy-conditioned conservation: walking in the shoes of others" as a conservation farmer*, Land Economics 87 (3): 433-452.
- Siebe, Ch., J. Reinhold y S. Karl (2006), *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, 2ª edición, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C., México.
- Sikora LJ and D.E. Stott (1996), "Soil Organic Carbon and Nitrogen", Pp. 157-167. In: Doran J. W, Jones A. J., *Methods for assessing soil quality*, Madison, WI Stewart, B.A. (1985), "Water conservation technology in rainfed and dryland agriculture". In: *Proceedings of Conference Water and Water Policy in World Food Supplies*. Texas College Station, EE.UU.A. Texas A&M University.
- Singh, G., D. Mishra, K. Singh and 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, no. 310, Pp. 612-622.
- Soca, N. (2004). *Articulación Entre Proyectos De Ingeniería Evaluación De Impacto Ambiental En El Contexto Técnico De La Normativa Actual: El Caso De Las Declaraciones De Impacto Ambiental Emitidas En España Para Proyectos Tipo De Gran Impacto*, Tesis Doctoral, Departamento De Ingeniería Química Industrial Y Del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales De Madrid, España.
- SQI-Soil Quality Institute (1996), *Indicators for Soil Quality Evaluation*, NRCS, USDA, National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
- SSSA Book (1996), *Methods of Soil Analysis: Part 3- Chemical Methods*, Chapter 14, Pp. 417-434.
- Stocking, M. y Murnaghan N. (2003), *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*, Editorial Mundi prensa. Madrid, España. 166p.
- Stewart, B.A. (1985), "Water conservation technology in rainfed and dryland agriculture", Pp. 335-359. In: *Proceedings of Conference Water and Water Policy in World Food Supplies*, Texas, College Station, EE.UU.A. Texas A&M University.
- Taboada, L. (2011), *Evaluación de la erosión hídrica en áreas con zanjas de infiltración*, Ministerio de Agricultura-Agro Rural, Perú.
- Ticehurst, J., Cresswell, H., Mckenzie, N., & Glover, M. (2007), *Interpreting soil and topographic properties to*, Geoderma, 137: 279-292.
- Trueba, A., S. Trueba y M. Anaya (1981), *Evaluación de la eficiencia de cuatro prácticas mecánicas para reducir las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión hídrica en terrenos agrícolas de temporal*, DGSA-SARH, Pp. 89-100.
- USDA-NRSC-SQI. (2001), *Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning*, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute.

- USDA (1999), *Soil quality test kit guide*. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service and Natural Resources Conservation, Service, Soil Quality Institute. Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/kit2.html> , consultado en 2015.
- USDA (1999a), *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. See Section II, Chapter 8, 72 p.
- USER manual. (1992), *Understanding soil ecosystem relationships*, Dept. of Primary Industries, Queensland, Australia, ISSN 0727-6273.
- Vargas, E., M. Vanegas, E. Ojeda, J. Sepúlveda y M. P. Lozano (2010), *Informe de evaluación externa de los apoyos de restauración de suelos forestales, ejercicio fiscal 2009*, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.
- Vargas E. y M. Vanegas (2012), *Evaluación complementaria del PROCOREF. Ejercicio Fiscal 2011*, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México.
- Yimer, F., Ledin, S., & Abdelkadir, A. (2006), *Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation*, Forest Ecology and Managenent, 232:90-99.
- Zúñiga, H. (2004), *Apuntes de clase de Evaluación Ambiental, programa de ingeniería forestal*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- Zúñiga, H. (2009), *Elaboremos un estudio de impacto ambiental*, Documento Técnico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Hojas de descripción de los perfiles de suelo en los 3 sitios de estudio

Hoja de descripción del perfil del Sitio de estudio 1: Altzomoni																					
Perfil No. 1																					
Localidad: Altzomoni; Izta-Popo, al pie de las antenas de transmisión																					
Fecha: 01-03-15		UTM (x): 536409		Mapa: CONABIO wgs84		Clima: Cb(w2)			Uso del suelo/vegetación: Pastos con aforestación				Posición en el relieve: Ladera Alta			Paisaje: Montana					
Autor: Todos		UTM (y): 2114059		m.s.n. m 3774	Época seca	°C: 11		delta °C						Inclinación: 28%							
Estado del tiempo: ET1 (sin precipitación en los últimos 30 días), T (temperatura ambiente baja <12), Soleado al momento.		Precipitación (mm): 950.9 media anual, en marzo: 9.9		Frecuencia y duración de periodos húmedos						Uso del suelo/vegetación: Pastos con aforestación				Posición en el relieve: Ladera Alta			Paisaje: Montana				
				F: 0 -ninguna (n) no hay posibilidad de que ocurra		D: 1 Extremadamente corta (<4 horas)		DAC: 0 -ausente - no observada													Exposición: (SE exposición) (NW ladera) Forma de la ladera: Cóncava
Evidencia de erosión: No																					
Profundidad (cm)	Textura:	Pedregosidad (Vol. %)	Color (húmedo)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Sales C.E. (mS/cm)	M.O (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Humedad		Estructura			Estabilidad	Poros			DA g/cm <sup>3</sup>	Evaluación de DA	Densidad Raíces	Límite	Horizonte
									pF	Tipo	Tamaño	Grado	Agregados	Abundancia	Forma	Tamaño					
0-20	CLg	20 Gm	5YR 1.7/1	6.5			sin	muy seca	5	subangular en bloques /grano simple	muy fino	débil	moderada	muchos	vesiculares	fino	1.2	mediana	ext. alta	abrupto y uniforme	Ah
20-40	AC	6 Gf	7.5YR 1.7/1	6.6			sin	seco	4	subangular en bloques /grano simple	muy fino	débil	media	muchos	vesiculares	fino	1.2	mediana	muy alta	claro y ondulado	Ah
40-60	AC	1 Gf	5YR 2/1	6.6			sin	fresca	3	subangular en bloques /granular	fino	débil/moderado	alta	comunes / muchos	vesiculares	fino / medianos	1.2	mediana	mediana	abrupto y uniforme	
60-80	CRA	20 Gm	7.5YR 2/1	6.7			sin	fresca	3	subangular en bloques	fino / muy fino	débil/moderado	alta	comunes / muchos	vesiculares	fino / medianos	1.4	mediana	baja	claro y ondulado	
80-100	CRA	43 Gg	10YR 2/2	6.6			sin	fresca	3	subangular en bloques	fino / muy fino	débil/moderado	baja	muchos/ pocos	vesiculares	fino / medianos	1.4	mediana	muy baja	claro y ondulado	
Prof. de desarrollo:				Princ. Espacio radicular de:				a		cm		Clasificación del suelo:						Fase:			
Prof. máx. de raíces:				Nivel piezométrico actual						Nivel piezométrico medio:						Tipo de humus:					

Hoja de descripción del perfil del Sitio de estudio 2: El Paraje																							
Perfil No. 2																							
Localidad: Bienes comunales de Ameca (km 19) El paraje																							
Fecha: 02-03-15		UTM (x): 534865 W098°40'06.4"		Mapa: CONABIO wgs84		Clima: Cb(w2)		Uso del suelo/vegetación: Pastos con presencia de especies forestales					Posición en el relieve: Ladera media				Paisaje: Lomerío						
Autor: Todos		UTM (y): 2110606 N19°05'17.3"		m.s.n. m 3500	Época seca	°C: 11							delta °C		Inclinación: 25%								
Estado del tiempo: ET1 (sin precipitación en los últimos 30 días), T (temperatura ambiente baja <12), Soleado al momento.		Precipitación (mm):950.9 media anual , en marzo:9.9		Frecuencia y duración de periodos húmedos					Material Parental: Ceniza Volcánica														
				F:0 -ninguna (n) no hay posibilidad de que ocurra		D:1 Extremadamen te corta (<4 horas)		DAC:0- ausente - no observada						Exposición:(SO exposición) (NE ladera) Forma de la ladera: Rectilínea				Evidencia de erosión: No					
Profundidad (cm)	Textura	Pedregosidad (Vol. %)	Color (húmedo)	pH (CaCl2)	Sales C.E. (mS/cm)	M.O (%)	CaCO3 (%)	Humedad		Estructura			Estabilidad	Poros			d.a. g/cm3	Evaluación de DA	DA	Densidad Raíces	Límite	Horizonte	
									P F	Tipo	Tamaño	Grado		Agregados	Abundancia	Forma							Tamaño
0-25	CLf	6 Cm	7.5YR 2/1	6.6			sin	muy seca	5	subangular en bloques	gruesa	débil	moderada	muchos	interes ticiales	muy finos	1.2	mediana		ext. alta	claro y uniforme	Ah	
25-40	CLf	1Cf	7.5YR 2/1	6.6			sin	muy seca	5	subangular en bloques	gruesa	débil	baja	comunes	interes ticiales	muy finos	1.4	mediana		muy alta	abrupto y uniforme	Ah	
40-60	CRL	6 Cm	7.5YR 2/1	6.7			sin	fresca	3	subangular en bloques	mediana	débil	baja	pocos	interes ticiales	muy finos	1.4	mediana		alta	claro y uniforme		
60-95	CRA	6 Cm	7.5YR 2/1	7.0			sin	fresca	3	subangular en bloques	mediana	débil	baja	pocos	interes ticiales	muy finos	1.4	mediana		baja	abrupto y uniforme		
Prof. de desarrollo:				Princ. Espacio radicular de:				a		cm		Clasificación del suelo:						Fase:					
Prof. máx. de raíces:				Nivel piezométrico actual				Nivel piezométrico medio:						Tipo de humus:									

Hoja de descripción del perfil del Sitio de estudio 3: Zoquiapan

Perfil No. 3

Localidad: Zoquiapan (donde se cayó el avión)

Fecha: 03-03-15		UTM (x): 531350		Mapa: CONABIO wgs84		Clima: Cb(w2)			Uso del suelo/vegetación: Vegetación secundaria (atributiva con presencia de especies forestales)				Posición en el relieve: Ladera media			Paisaje: Montaña						
Autor: Todos		UTM (y): 2140557		m.s.n.m 3445	Época seca	°C:10		delta °C					Inclinación: 27%									
Estado del tiempo: ET1 (sin precipitación en los últimos 30 días), T (temperatura ambiente baja <12), Soleado al momento.		Precipitación (mm): 972.2 media anual, marzo:18.6		Frecuencia y duración de periodos húmedos					Exposición:(SO exposición) (NW ladera) Forma de la ladera: semi-rectilínea				Material Parental: Ceniza Volcánica									
				F:0 -ninguna (n) no hay posibilidad de que ocurra		D:1 Extremadamente corta (<4 horas)		DAC:0- ausente - no observada									Evidencia de erosión: No					
Profundidad (cm)	Textura:	Pedregosidad (Vol. %)	Color (húmedo)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Sales C.E. (mS/cm)	M.O. (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Humedad		Estructura			Estabilidad	Poros			DA g/cm <sup>3</sup>	Evaluación de DA	DA	Densidad Raíces	Límite	Horizonte
									pF	Tipo	Tamaño	Grado	Agregados	Abundancia	Forma	Tamaño						
0-15	CR	1 Gf	7.5YR 2/2	6.5			sin	fresca	3	subangular en bloques	media	débil	alta	comunes	vesiculares	finos	1.0	baja		muy alta	claro y ondulado	Ah
15-28	CR	1 Gf	7.5YR 3/1	6.5			sin	fresca	3	subangular en bloques	gruesa	débil/moderada	alta	comunes	vesiculares	finos	1.2	mediana		muy alta	claro y ondulado	Ah
28-44	R	1 Gf	7.5YR 4/4	6.7			sin	fresca	3	subangular en bloques	mediana	débil	alta	muchos	vesiculares	muy finos	1.4	mediana		alta	claro y uniforme	A
44-100	R	1 Gf	7.5YR 4/4	6.8			sin	fresca	3	subangular en bloques	gruesa	débil/moderada	alta	muchos	vesiculares	muy finos	1.4	mediana		mediana	claro y uniforme	
Prof. de desarrollo:				Princ. Espacio radicular de:				a		cm		Clasificación del suelo:						Fase:				
Prof. máx. de raíces:				Nivel piezométrico actual				Nivel piezométrico medio:						Tipo de humus:								

Levantamiento en campo:

## Anexo 2. Resultados de la descripción de los perfiles de suelo en los 3 sitios de estudio

SITIO	Profundidad (cm)	Esesor	Horizonte	Densidad Raíces	Límite	Textura:		Pedregosidad		Color (húmedo)		pH (CaCl <sub>2</sub> )		MO	
		dm				Clave	Tipo	%	Tipo	Clave	Tipo		Evaluación	%	Evaluación
Altzomoni	0-20	2	Ah	extremadamente alta	abrupto y uniforme	CLg	Franco limosa gruesa	20	Grabas medianas	5YR 1.7/1	negro	6.5	muy ligeramente ácido	3%	Media
	20-40	2	Ah	muy alta	claro y ondulado	AC	Arenosa franca	6	Grabas finas	7.5YR 1.7/1	negro	6.6	muy ligeramente ácido	5%	Media alta
	40-60	2		mediana	abrupto y uniforme	AC	Arenosa franca	1	Grabas finas	5YR 2/1	negro pardo	6.6	muy ligeramente ácido	4%	Media alta
	60-80	2		baja	claro y ondulado	CRA	Franco arcillo arenosa	20	Grabas medianas	7.5YR 2/1	negro	6.7	muy ligeramente ácido	4%	Media alta
	80-100	2		muy baja	claro y ondulado	CRA	Franco arcillo arenosa	46	Grabas gruesas	10YR 2/2	negro pardo	6.6	muy ligeramente ácido	4%	Media alta
El Paraje	0-25	2.5	Ah	extremadamente alta	claro y uniforme	CLf	Franco limosa fina	6	Cantos medianos	7.5YR 2/1	negro	6.6	muy ligeramente ácido	4%	Media alta
	25-40	1.5	Ah	muy alta	abrupto y uniforme	CLf	Franco limosa fina	1	Cantos finos	7.5YR 2/1	negro	6.6	muy ligeramente ácido	4%	Media alta
	40-60	2		alta	claro y uniforme	CRL	Franco-arcillo- limosa	6	Cantos medianos	7.5YR 2/1	negro	6.7	muy ligeramente ácido	5%	Media alta
	60-95	3.5		baja	abrupto y uniforme	CRA	Franco arcillo arenosa	6	Cantos medianos	7.5YR 2/1	negro	7.0	muy ligeramente alcalino	5%	Media alta
Zoquiapan	0-15	1.5	Ah	muy alta	claro y ondulado	CR	Franco arcillosa	1	Grabas finas	7.5YR 2/2	negro pardo	6.5	muy ligeramente ácido	7%	Media alta
	15-28	1.3	Ah	muy alta	claro y ondulado	CR	Franco arcillosa	1	Grabas finas	7.5YR 3/1	negro pardo	6.5	muy ligeramente ácido	3%	Media
	28-44	1.6	A	alta	claro y uniforme	R	Arcillosa	1	Grabas finas	7.5YR 4/4	marrón	6.7	muy ligeramente ácido	1%	Baja
	44-100	5.6		mediana	claro y uniforme	R	Arcillosa	1	Grabas finas	7.5YR 4/4	marrón	6.8	muy ligeramente ácido	1%	Baja

**Continuación del Anexo 2.**

Perfil	Humedad		DA		Estructura			Poros			CaCO3	Al activo
	pF	Designación	g/cm3	Evaluación	Tipo	Tamaño	Grado	Abundancia	Forma	Tamaño		
Alzomoni	5	muy seca	1.2	mediana	subangular en bloques /grano simple	muy fino	débil	muchos	vesiculares	fino	sin	si
	4	seco	1.2	mediana	subangular en bloques /grano simple	muy fino	débil	muchos	vesiculares	fino	sin	si
	3	fresca	1.2	mediana	subangular en bloques/ granular	fino	débil/ moderado	comunes / muchos	vesiculares	fino / medianos	sin	si
	3	fresca	1.4	mediana	subangular en bloques	fino / muy fino	débil/ moderado	comunes / muchos	vesiculares	fino / medianos	sin	si
	3	fresca	1.4	mediana	subangular en bloques	fino / muy fino	débil/ moderado	muchos/ pocos	vesiculares	fino / medianos	sin	si
El Paraje	5	muy seca	1.2	mediana	subangular en bloques	gruesa	débil	muchos	interesticiales	muy finos	sin	si
	5	muy seca	1.4	mediana	subangular en bloques	gruesa	débil	comunes	interesticiales	muy finos	sin	si
	3	fresca	1.4	mediana	subangular en bloques	mediana	débil	pocos	interesticiales	muy finos	sin	si
	3	fresca	1.4	mediana	subangular en bloques	mediana	débil	pocos	interesticiales	muy finos	sin	si
Zoquiapan	3	fresca	1.0	baja	subangular en bloques	media	débil	comunes	vesiculares	finos	sin	si
	3	fresca	1.2	mediana	subangular en bloques	gruesa	débil/ moderada	comunes	vesiculares	finos	sin	si
	3	fresca	1.4	mediana	subangular en bloques	mediana	débil	muchos	vesiculares	muy finos	sin	si
	3	fresca	1.4	mediana	subangular en bloques	gruesa	débil/ moderada	muchos	vesiculares	muy finos	sin	si

**MO**= Materia Orgánica  
**DA**=Densidad aparente  
**CaCO3** = Contenido de carbonatos  
**Al activo**= Aluminio acti

### Anexo 3. Resultados de laboratorio: Muestras del Perfil

Sitio	DA	$\sigma$	DR	$\sigma$	VTP	$\sigma$	HUM	$\sigma$	pH	DPR	CE ( $\mu$ S)	DPR	Corg	DPR	N	DPR	$\bar{X}$ Arcillas	DPR	$\bar{X}$ Limos	DPR	$\bar{X}$ Arenas	DPR	Clave	Clase Textural
	(g/cm <sup>3</sup> )		(g/cm <sup>3</sup> )		%		%			%		%		%		%	%	%	%	%	%	%		
<b>1 Altzomoni</b>																								
0-20	1.00		3.18		68.48		27.27		6.31	1.74	24.00	8.33	1.27	16.64	0.11	11.76	5.08	50.39	9.64	14.94	85.28	4.69	A	Arenosa
20-40	0.98		2.57		61.75		40.58		6.65	3.01	18.50	5.41	1.28	5.17	0.11	3.60	7.44	9.68	14.64	13.66	77.92	1.64	AC	Arenosa Franca
40-60	0.82		2.77		70.37		25.45		6.43	7.00	21.00	0.00	1.66	5.23	0.15	0.65	6.08	32.89	13.00	20.92	80.92	5.83	A	Arenosa
60-80	0.97		2.77		65.06		41.82		6.59	1.06	20.00	0.00	1.33	0.30	0.12	0.00	7.72	16.58	14.64	13.66	77.64	4.22	AC	Arenosa Franca
80-110	0.71		2.63		73.07		29.02		6.61	0.15	18.00	11.11	1.95	4.55	0.16	32.50	6.44	2.48	13.00	9.85	80.56	1.39	AC	Arenosa Franca
$\bar{X}$	0.90	0.13	2.78	0.24	67.75	4.44	32.83	7.76	6.51	2.59	20.30	4.97	1.50		0.13		6.55		12.98		80.46			
<b>2 El Paraje</b>																								
0-25	1.01		2.57		60.66		47.41		6.60	2.88	21.00	19.05	2.19	0.78	0.19	1.04	7.08	20.34	20.64	9.69	72.28	0.77	AC	Arenosa Franca
25-40	0.87		2.72		67.81		43.34		6.67	2.25	20.00	0.00	1.50	3.87	0.13	1.53	7.80	51.28	21.64	18.48	70.56	0.00	AC	Arenosa Franca
40-60	0.95		2.63		64.00		48.84		6.74	2.82	19.00	10.53	1.35	2.30	0.13	3.15	7.72	16.58	21.64	0.00	70.64	1.81	AC	Arenosa Franca
60-95	0.87		2.57		66.38		56.59		6.91	2.03	26.50	33.96	1.71	4.08	0.12	5.17	10.08	45.24	18.64	32.19	71.28	2.02	AC	Arenosa Franca
$\bar{X}$	0.92	0.07	2.62	0.07	64.71	3.13	49.05	5.54	6.73	2.49	21.63	15.88	1.69		0.14		8.17		20.64		71.19			
<b>3 Zoquiapan</b>																								
0-15	0.69		1.88		63.25		91.94		6.53	0.61	39.50	2.53	7.70	3.88	0.50	6.18	20.36	0.00	29.36	6.81	50.28	3.98	CA	Franco Arenosa
15-28	0.77		2.12		63.59		94.88		6.66	0.30	40.00	0.00	3.18	3.02	0.26	4.60	14.36	27.86	34.00	9.65	51.64	1.39	CA	Franco Arenosa
28-44	0.90		2.30		60.94		86.18		6.70	1.49	22.50	4.44	2.36	5.27	0.19	1.04	11.44	18.88	34.00	2.12	54.56	2.64	CA	Franco Arenosa
44-100	0.97		2.33		58.34		84.76		6.92	0.87	18.50	5.41	1.29	0.93	0.12	1.69	11.44	16.08	29.36	20.44	59.20	7.03	CA	Franco Arenosa
$\bar{X}$	0.83	0.13	2.16	0.21	61.53	2.43	89.44	4.77	6.70	0.82	30.13	3.10	3.63		0.27		14.40		31.68		53.92			

### Anexo 3. Resultados de laboratorio: Muestras del Bordo

Sitio	DA	$\sigma$	DR	$\sigma$	(DA/DR)	VTP	VTP	$\sigma$	HUM	$\sigma$
	(g/cm <sup>3</sup> )		(g/cm <sup>3</sup> )		(g/cm <sup>3</sup> )		%		%	
<b>1 Altzomoni</b>										
BordoA	1.10		2.77		0.40	0.60	60.41		41.86	
BordoA	1.12		2.77		0.40	0.60	59.61		39.49	
BordoA	1.03		1.36		0.76	0.24	23.91		59.28	
$\bar{X}$	1.08	0.04	2.30	0.82		0.48	47.98	20.85	46.88	10.81
BordoB	0.96		2.72		0.35	0.65	64.72		35.55	
BordoB	1.00		6.11		0.16	0.84	83.70		52.62	
BordoB	0.71		2.04		0.35	0.65	65.38		77.52	
$\bar{X}$	0.89	0.16	3.62	2.18		0.71	71.27	10.77	55.23	21.11
<b>2 El Paraje</b>										
BordoA	0.99		2.38		0.42	0.58	58.40		43.19	
BordoA	1.06		1.72		0.62	0.38	38.48		44.32	
BordoA	1.11		2.49		0.44	0.56	55.65		38.46	
$\bar{X}$	1.05	0.06	2.20	0.42		0.51	50.85	10.79	41.99	3.11
BordoB	1.12		2.49		0.45	0.55	55.05		39.79	
BordoB	0.93		2.31		0.40	0.60	59.74		48.59	
BordoB	0.99		2.22		0.45	0.55	55.35		49.46	
$\bar{X}$	1.01	0.10	2.34	0.14		0.57	56.71	2.63	45.95	5.35
<b>3 Zoquiapan</b>										
BordoA	0.61		2.08		0.29	0.71	70.70		86.81	
BordoA	0.66		2.08		0.32	0.68	68.10		83.42	
BordoA	0.71		2.07		0.34	0.66	65.84		77.99	
$\bar{X}$	0.66	0.05	2.08	0.01		0.68	68.21	2.44	82.74	4.45
BordoB	0.48		1.19		0.40	0.60	60.17		113.37	
BordoB	0.27		0.56		0.47	0.53	52.72		92.50	
BordoB	0.61		2.04		0.30	0.70	70.06		81.58	
$\bar{X}$	0.45	0.17	1.26	0.74		0.61	60.98	8.69	95.82	16.15

### Anexo 3. Resultados de laboratorio: Muestras del Fondo de las zanjas de infiltración

Sitio	DA	$\sigma$	DR	$\sigma$	VTP	$\sigma$
	(g/cm <sup>3</sup> )		(g/cm <sup>3</sup> )		%	
<b>1 Altzomoni</b>						
Fondo	1.11		2.54		56.44	
Fondo	1.21		2.72		55.51	
Fondo	1.27		2.82		54.98	
Fondo	1.33		3.33		60.15	
Fondo	1.21		2.72		55.44	
Fondo	1.22		1.78		31.45	
$\bar{X}$	1.22	0.07	2.65	0.50	52.33	10.40
<b>2 El Paraje</b>						
Fondo	0.93		2.22		58.10	
Fondo	1.01		2.38		57.56	
Fondo	0.92		2.31		60.04	
Fondo	0.94		1.73		45.58	
Fondo	0.93		2.17		56.98	
Fondo	0.80		2.42		66.89	
$\bar{X}$	0.92	0.07	2.20	0.25	57.52	6.89
<b>3 Zoquiapan</b>						
Fondo	0.92		2.27		59.43	
Fondo	0.94		2.33		59.62	
Fondo	0.70		2.17		67.73	
Fondo	0.81		2.31		64.89	
Fondo	0.88		2.27		61.33	
Fondo	0.82		2.26		63.61	
$\bar{X}$	0.85	0.09	2.27	0.06	62.77	3.25

### Anexo 3. Resultados de laboratorio: Muestras del Suelo Control

Sitio	DA	$\sigma$	DR	$\sigma$	VTP	$\sigma$
	(g/cm <sup>3</sup> )		(g/cm <sup>3</sup> )		%	
<b>1 Altzomoni</b>						
Control 1	1.29		5.43		76.23	
Control 2	1.07		1.56		31.21	
Control 3	1.08		1.75		38.07	
Control 4	0.50		0.67		25.47	
Control 5	1.20		2.62		54.32	
Control 6	1.01		2.13		52.66	
$\bar{X}$	1.03	0.28	2.36	1.64	46.33	18.60
<b>2 El Paraje</b>						
Control 1	0.89		1.59		43.77	
Control 2	0.93		2.36		60.39	
Control 3	0.75		1.51		50.51	
Control 4	0.98		2.27		56.77	
Control 5	0.87		1.78		51.10	
Control 6	0.96		1.96		51.19	
$\bar{X}$	0.90	0.08	1.91	0.35	52.29	5.73
<b>3 Zoquiapan</b>						
Control 1	0.67		1.78		62.51	
Control 2	0.71		1.39		48.62	
Control 3	0.67		1.43		53.07	
Control 4	0.58		1.58		63.29	
Control 5	0.47		0.57		17.45	
Control 6	0.52		1.30		59.76	
$\bar{X}$	0.60	0.10	1.34	0.41	50.78	17.29

## Anexo 4. Resultados de la evaluación edafocológica en los 3 sitios de estudio

SITIO	Profundidad	Espesor (dm)	Profundidad fisiológica	Penetrabilidad de raíces	Función del poro	VTP	CA	dCC	CC	Conductividad Hidráulica	Erosionabilidad	CIC	Bases Intercambiables	Reserva de Nitrógeno	Capacidad filtro	Capacidad amortiguadora	
Altzomoni	20	2	Muy Somero	Buena	Agua disponible para plantas	Alto	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	Muy bajo	Regular		Baja	Alta	Muy alta	
	40	2	Somero	Muy buena	Agua disponible para plantas	Muy alto	Muy alta	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Muy bajo	Mediana		Mediana	Extremadamente alta	Extremadamente alta	
	60	2	Mediano	Muy buena	Agua disponible para plantas y Drenaje Lento	Muy alto	Muy alta	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Muy bajo	Regular		Mediana	Extremadamente alta	Muy alta	
	80	2	Mediano	Muy buena	Agua disponible para plantas y Drenaje Lento	Muy alto	Muy alta	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Muy bajo	Mediana		Medianamente alta	Mediana	Extremadamente alta	Extremadamente alta
	100	2	Profundo	Mediana	Agua disponible para plantas y Drenaje Lento	Muy alto	Muy alta	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Baja	Mediana		Medianamente alta	Baja	Muy alta	Muy alta
El Paraje	25	2.5	Somero	Buena	Agua Muerta	Muy alto	Muy Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	Baja	Mediana		Mediana	Extremadamente alta	Extremadamente alta	
	40	1.5	Somero	Muy buena	Agua Muerta	Muy alto	Muy Alta	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Baja	Mediana		Mediana	Muy alta	Extremadamente alta	
	60	2	Mediano	Muy buena	Agua Muerta	Muy alto	Muy Alta	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Baja	Mediana		Medianamente alta	Mediana	Extremadamente alta	Extremadamente alta
	95	3.5	Profundo	Muy buena	Agua Muerta	Muy alto	Muy Alta	Baja	Muy baja	Muy alta	Baja	Mediana		Alta	Alta	Extremadamente alta	Extremadamente alta
Zoquiapan	15	1.5	Muy somero	Muy buena	Agua disponible para plantas	Muy alto	Muy Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	Baja	Alta		Mediana	Extremadamente alta	Extremadamente alta	
	28	1.3	Somero	Muy Buena	Agua disponible para plantas	Muy alto	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	Media	Mediana		Baja	Muy alta	Muy alta	
	44	1.6	Mediano	Muy Buena	Agua Muerta	Muy alto	Alta	Muy baja	Muy baja	Alta	Media	Mediana		Medianamente alta	Baja	Extremadamente alta	Extremadamente alta
	100	5.6	Profundo	Muy Buena	Agua Muerta	Muy alto	Muy Alta	Mediana	Baja	Alta	Media	Mediana		Alta	Mediana	Extremadamente alta	Extremadamente alta

**VPT**=Total de espacio poroso;  
**CA**=Capacidad de aireación  
**dCC**=Capacidad de agua disponible  
**CC**=Capacidad de campo  
**CCI**=Capacidad de intercambio catiónico

## Anexo 5. Dimensiones de las Zanjas de Infiltración

Sitio	No. Zanja	Ancho	$\sigma$	Largo	$\sigma$	Profundidad	$\sigma$	Volumen	$\sigma$	Superficie	$\sigma$	% de Azolve
		(m)		(m)		(m)		(m <sup>3</sup> )		(m <sup>2</sup> )		
1 Altzomoni	1	0.60		1.20		0.40		0.3		0.72		15
	2	0.80		2.50		0.80		1.6		2		15
	3	0.84		2.30		0.73		1.4		1.932		15
	4	0.70		2.00		0.70		1.0		1.4		10
	5	0.55		2.00		0.55		0.6		1.1		20
	6	0.60		2.16		0.50		0.6		1.296		25
	7	0.50		2.20		0.50		0.6		1.1		15
	8	0.60		2.30		0.52		0.7		1.38		10
	9	0.75		2.10		0.50		0.8		1.575		30
	$\bar{X}$	0.66	0.12	2.08	0.37	0.58	0.13	0.8	0.42	1.39	0.41	17.2
2 El Paraje	1	0.47		2.21		0.47		0.5		1.0387		15
	2	0.43		1.90		0.60		0.5		0.817		30
	3	0.43		1.97		0.48		0.4		0.8471		40
	4	0.47		1.93		0.54		0.5		0.9071		25
	5	0.40		2.10		0.42		0.4		0.84		45
	6	0.42		1.55		0.46		0.3		0.651		50
	7	0.43		1.55		0.45		0.3		0.6665		45
	8	0.43		1.62		0.47		0.3		0.6966		35
	9	0.43		2.01		0.42		0.4		0.8643		80
	$\bar{X}$	0.4	0.02	1.87	0.24	0.48	0.06	0.4	0.08	0.81	0.13	40.6
3 Zoquiapan	1	0.37		2.50		0.45		0.4		0.925		25
	2	0.48		1.91		0.46		0.4		0.9168		10
	3	0.50		1.81		0.47		0.4		0.905		25
	4	0.49		1.77		0.51		0.4		0.8673		10
	5	0.55		2.11		0.64		0.7		1.1605		45
	6	0.57		2.25		0.50		0.6		1.2825		70
	7	0.56		1.73		0.50		0.5		0.9688		80
	8	0.49		1.61		0.50		0.4		0.7889		70
	9	0.58		1.37		0.50		0.4		0.7946		40
	$\bar{X}$	0.5	0.07	1.90	0.34	0.50	0.06	0.5	0.12	0.96	0.16	41.7

### Anexo 5. Dimensiones de los Bordos

Sitio	No. Bordo	Bordo								
		Largo (m)	$\sigma^2$	$\sigma$	Ancho (m)	$\sigma^2$	$\sigma$	Superficie	$\sigma^2$	$\sigma$
1 Altzomoni	1	2.0	0.1		2.0	0.2		4.0	1.80	
	2	2.6	0.1		2.0	0.2		5.2	0.02	
	3	2.7	0.2		1.7	0.5		4.6	0.56	
	4	2.5	0.0		2.5	0.0		6.3	0.83	
	5	2.2	0.0		1.7	0.5		3.7	2.56	
	6	3.2	0.8		2.6	0.0		8.3	8.88	
	7	1.6	0.5		3.6	1.4		5.8	0.18	
	8	1.8	0.3		3.2	0.6		5.8	0.18	
	9	1.9	0.2		2.4	0.0		4.4	0.81	
	$\bar{X}$	2.3	0.2	0.5	2.4	0.4	0.6	5.3	1.98	1.41
2 El Paraje	1	1.4	0.0		2.5	0.2		3.4	0.41	
	2	1.6	0.1		2.2	0.0		3.6	0.79	
	3	1.1	0.0		2.0	0.0		2.2	0.28	
	4	1.7	0.1		2.0	0.0		3.3	0.36	
	5	1.2	0.0		2.6	0.4		3.2	0.22	
	6	1.3	0.0		1.6	0.2		2.1	0.45	
	7	1.6	0.1		1.7	0.1		2.8	0.00	
	8	1.1	0.0		1.6	0.2		1.8	0.88	
	9	1.0	0.1		2.2	0.1		2.3	0.23	
	$\bar{X}$	1.3	0.1	0.2	2.0	0.1	0.4	2.7	0.45	0.67
3 Zoquiapan	1	2.4	0.0		0.9	0.1		2.1	0.43	
	2	2.2	0.0		1.3	0.0		3.0	0.04	
	3	2.3	0.0		1.3	0.0		2.8	0.01	
	4	2.1	0.0		1.3	0.0		2.7	0.01	
	5	2.4	0.0		0.9	0.1		2.2	0.28	
	6	2.9	0.5		1.9	0.4		5.3	6.65	
	7	2.3	0.0		1.2	0.0		2.7	0.01	
	8	2.0	0.0		1.1	0.0		2.2	0.30	
	9	1.6	0.4		1.1	0.0		1.8	0.94	
	$\bar{X}$	2.2	0.1	0.3	1.2	0.1	0.3	2.8	1.08	1.04

## Anexo 6.Velocidad de Infiltración en los 3 sitios de estudio

Sitio de Estudio 1: Altzomoni No. sitio : 1 (Parte Alta de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.19	0.19	2	0.125	3.175	3.18	3.18	0.19	16.7
0.19	0.27	0.08	2	0.125	3.175	6.35	3.18	0.08	39.7
0.27	0.43	0.16	2	0.125	3.175	9.53	3.18	0.16	19.8
0.43	0.62	0.19	2	0.125	3.175	12.70	3.18	0.19	16.7
0.62	0.78	0.16	2	0.125	3.175	15.88	3.18	0.16	19.8
0.78	0.94	0.16	2	0.125	3.175	19.05	3.18	0.16	19.8
0.94	1.10	0.16	2	0.125	3.175	22.23	3.18	0.16	19.8
1.10	1.24	0.14	2	0.125	3.175	25.40	3.18	0.14	22.7
1.24	1.45	0.21	2	0.125	3.175	28.58	3.18	0.21	15.1
1.45	1.58	0.13	2	0.125	3.175	31.75	3.18	0.13	24.4
1.58	1.78	0.20	2	0.125	3.175	34.93	3.18	0.20	15.9
1.78	1.94	0.16	2	0.125	3.175	38.10	3.18	0.16	19.8
1.94	2.10	0.16	2	0.125	3.175	41.28	3.18	0.16	19.8
2.10	2.27	0.17	2	0.125	3.175	44.45	3.18	0.17	18.7
2.27	2.43	0.16	2	0.125	3.175	47.63	3.18	0.16	19.8
2.43	2.62	0.19	2	0.125	3.175	50.80	3.18	0.19	16.7
2.62	2.78	0.16	2	0.125	3.175	53.98	3.18	0.16	19.8
2.78	2.95	0.17	2	0.125	3.175	57.15	3.18	0.17	18.7
2.95	3.11	0.16	2	0.125	3.175	60.33	3.18	0.16	19.8
3.11	3.26	0.15	2	0.125	3.175	63.50	3.18	0.15	21.2
3.26	3.42	0.16	2	0.125	3.175	66.68	3.18	0.16	19.8
3.42	3.64	0.22	2	0.125	3.175	69.85	3.18	0.22	14.4
3.64	3.79	0.15	2	0.125	3.175	73.03	3.18	0.15	21.2
3.79	3.96	0.17	2	0.125	3.175	76.20	3.18	0.17	18.7
3.96	4.11	0.15	2	0.125	3.175	79.38	3.18	0.15	21.2
4.11	4.29	0.18	2	0.125	3.175	82.55	3.18	0.18	17.6
4.29	4.43	0.14	2	0.125	3.175	85.73	3.18	0.14	22.7
4.43	4.61	0.18	2	0.125	3.175	88.90	3.18	0.18	17.6
4.61	4.79	0.18	2	0.125	3.175	92.08	3.18	0.18	17.6
4.79	4.93	0.14	2	0.125	3.175	95.25	3.18	0.14	22.7
4.93	5.09	0.16	2	0.125	3.175	98.43	3.18	0.16	19.8
5.09	5.26	0.17	2	0.125	3.175	101.60	3.18	0.17	18.7
5.26	5.43	0.17	2	0.125	3.175	104.78	3.18	0.17	18.7
5.43	5.58	0.15	2	0.125	3.175	107.95	3.18	0.15	21.2
5.58	5.76	0.18	2	0.125	3.175	111.13	3.18	0.18	17.6
5.76	5.91	0.15	2	0.125	3.175	114.30	3.18	0.15	21.2
5.91	6.09	0.18	2	0.125	3.175	117.48	3.18	0.18	17.6
6.09	6.26	0.17	2	0.125	3.175	120.65	3.18	0.17	18.7
6.26	6.40	0.14	2	0.125	3.175	123.83	3.18	0.14	22.7
6.40	6.58	0.18	2	0.125	3.175	127.00	3.18	0.18	17.6
6.58	6.77	0.19	2	0.125	3.175	130.18	3.18	0.19	16.7
6.77	6.91	0.14	2	0.125	3.175	133.35	3.18	0.14	22.7
6.91	7.09	0.18	2	0.125	3.175	136.53	3.18	0.18	17.6
7.09	7.27	0.18	2	0.125	3.175	139.70	3.18	0.18	17.6

Sitio de Estudio 1: Altzomoni No. sitio : 2 (Parte Media Alta de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.09	0.09	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.09	17.6
0.09	0.17	0.08	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.08	19.8
0.17	0.25	0.08	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.08	19.8
0.25	0.31	0.06	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.06	26.5
0.31	0.41	0.10	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.10	15.9
0.41	0.48	0.07	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.07	22.7
0.48	0.55	0.07	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.07	22.7
0.55	0.62	0.07	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.07	22.7
0.62	0.70	0.08	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.08	19.8
0.70	0.76	0.06	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.06	26.5
0.76	0.89	0.13	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.13	12.2
0.89	0.98	0.09	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.09	17.6
0.98	1.06	0.08	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.08	19.8
1.06	1.15	0.09	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.09	17.6
1.15	1.22	0.07	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.07	22.7
1.22	1.29	0.07	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.07	22.7
1.29	1.38	0.09	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.09	17.6
1.38	1.48	0.10	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.10	15.9
1.48	1.58	0.10	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.10	15.9
1.58	1.66	0.08	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.08	19.8
1.66	1.76	0.10	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.10	15.9
1.76	1.82	0.06	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.06	26.5
1.82	1.93	0.11	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.11	14.4
1.93	2.00	0.07	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.07	22.7
2.00	2.08	0.08	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.08	19.8
2.08	2.18	0.10	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.10	15.9
2.18	2.27	0.09	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.09	17.6
2.27	2.36	0.09	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.09	17.6
2.36	2.46	0.10	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.10	15.9
2.46	2.52	0.06	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.06	26.5
2.52	2.59	0.07	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.07	22.7
2.59	2.72	0.13	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.13	12.2
2.72	2.81	0.09	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.09	17.6
2.81	2.89	0.08	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.08	19.8
2.89	2.99	0.10	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.10	15.9
2.99	3.09	0.10	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.10	15.9
3.09	3.16	0.07	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.07	22.7
3.16	3.23	0.07	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.07	22.7
3.23	3.33	0.10	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.10	15.9
3.33	3.42	0.09	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.09	17.6
3.42	3.50	0.08	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.08	19.8
3.50	3.54	0.04	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.04	39.7
3.54	3.68	0.14	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.14	11.3
3.68	3.77	0.09	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.09	17.6

7.27	7.44	0.17	2	0.125	3.175	142.88	3.18	0.17	18.7
7.44	7.60	0.16	2	0.125	3.175	146.05	3.18	0.16	19.8
7.60	7.77	0.17	2	0.125	3.175	149.23	3.18	0.17	18.7
7.77	7.94	0.17	2	0.125	3.175	152.40	3.18	0.17	18.7
7.94	8.11	0.17	2	0.125	3.175	155.58	3.18	0.17	18.7
8.11	8.28	0.17	2	0.125	3.175	158.75	3.18	0.17	18.7
8.28	8.45	0.17	2	0.125	3.175	161.93	3.18	0.17	18.7
									18.7

3.77	3.89	0.12	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.12	13.2
3.89	3.92	0.03	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.03	52.9
3.92	4.01	0.09	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.09	17.6
4.01	4.10	0.09	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.09	17.6
4.10	4.19	0.09	1	0.063	1.588	77.79	1.59	0.09	17.6
4.19	4.28	0.09	1	0.063	1.588	79.38	1.59	0.09	17.6
4.28	4.37	0.09	1	0.063	1.588	80.96	1.59	0.09	17.6
4.37	4.46	0.09	1	0.063	1.588	82.55	1.59	0.09	17.6
									17.6

Sitio de Estudio 1: Altzomoni No. sitio : 3 (Parte Media Baja de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.08	0.08	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.08	19.8
0.08	0.19	0.11	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.11	14.4
0.19	0.27	0.08	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.08	19.8
0.27	0.35	0.08	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.08	19.8
0.35	0.42	0.07	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.07	22.7
0.42	0.53	0.11	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.11	14.4
0.53	0.62	0.09	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.09	17.6
0.62	0.71	0.09	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.09	17.6
0.71	0.81	0.10	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.10	15.9
0.81	0.89	0.08	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.08	19.8
0.89	1.00	0.11	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.11	14.4
1.00	1.09	0.09	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.09	17.6
1.09	1.18	0.09	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.09	17.6
1.18	1.27	0.09	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.09	17.6
1.27	1.36	0.09	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.09	17.6
1.36	1.48	0.12	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.12	13.2
1.48	1.58	0.10	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.10	15.9
1.58	1.68	0.10	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.10	15.9
1.68	1.77	0.09	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.09	17.6
1.77	1.87	0.10	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.10	15.9
1.87	1.97	0.10	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.10	15.9
1.97	2.08	0.11	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.11	14.4
2.08	2.17	0.09	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.09	17.6
2.17	2.27	0.10	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.10	15.9
2.27	2.37	0.10	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.10	15.9
2.37	2.47	0.10	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.10	15.9
2.47	2.60	0.13	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.13	12.2
2.60	2.69	0.09	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.09	17.6
2.69	2.79	0.10	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.10	15.9
2.79	2.91	0.12	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.12	13.2
2.91	3.01	0.10	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.10	15.9
3.01	3.11	0.10	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.10	15.9
3.11	3.19	0.08	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.08	19.8
3.19	3.29	0.10	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.10	15.9
3.29	3.35	0.06	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.06	26.5
3.35	3.45	0.10	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.10	15.9
3.45	3.54	0.09	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.09	17.6
3.54	3.63	0.09	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.09	17.6

Sitio de Estudio 1: Altzomoni No. sitio : 4 (Parte Baja de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.07	0.07	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.07	22.7
0.07	0.17	0.10	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.10	15.9
0.17	0.24	0.07	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.07	22.7
0.24	0.36	0.12	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.12	13.2
0.36	0.44	0.08	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.08	19.8
0.44	0.55	0.11	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.11	14.4
0.55	0.66	0.11	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.11	14.4
0.66	0.77	0.11	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.11	14.4
0.77	0.87	0.10	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.10	15.9
0.87	0.94	0.07	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.07	22.7
0.94	1.02	0.08	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.08	19.8
1.02	1.13	0.11	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.11	14.4
1.13	1.20	0.07	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.07	22.7
1.20	1.28	0.08	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.08	19.8
1.28	1.39	0.11	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.11	14.4
1.39	1.51	0.12	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.12	13.2
1.51	1.61	0.10	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.10	15.9
1.61	1.69	0.08	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.08	19.8
1.69	1.77	0.08	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.08	19.8
1.77	1.87	0.10	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.10	15.9
1.87	1.99	0.12	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.12	13.2
1.99	2.11	0.12	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.12	13.2
2.11	2.25	0.14	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.14	11.3
2.25	2.37	0.12	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.12	13.2
2.37	2.51	0.14	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.14	11.3
2.51	2.60	0.09	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.09	17.6
2.60	2.70	0.10	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.10	15.9
2.70	2.79	0.09	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.09	17.6
2.79	2.88	0.09	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.09	17.6
2.88	2.96	0.08	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.08	19.8
2.96	3.07	0.11	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.11	14.4
3.07	3.15	0.08	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.08	19.8
3.15	3.24	0.09	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.09	17.6
3.24	3.34	0.10	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.10	15.9
3.34	3.52	0.18	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.18	8.8
3.52	3.63	0.11	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.11	14.4
3.63	3.78	0.15	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.15	10.6
3.78	3.88	0.10	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.10	15.9

3.63	3.71	0.08	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.08	19.8
3.71	3.79	0.08	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.08	19.8
3.79	3.87	0.08	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.08	19.8
3.87	3.96	0.09	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.09	17.6
3.96	4.06	0.10	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.10	15.9
4.06	4.16	0.10	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.10	15.9
4.16	4.26	0.10	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.10	15.9
4.26	4.35	0.09	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.09	17.6
4.35	4.44	0.09	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.09	17.6
4.44	4.53	0.09	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.09	17.6
4.53	4.63	0.10	1	0.063	1.588	77.79	1.59	0.10	15.9
4.63	4.73	0.10	1	0.063	1.588	79.38	1.59	0.10	15.9
4.73	4.83	0.10	1	0.063	1.588	80.96	1.59	0.10	15.9
4.83	4.93	0.10	1	0.063	1.588	82.55	1.59	0.10	15.9
4.93	5.03	0.10	1	0.063	1.588	84.14	1.59	0.10	15.9
									15.9

3.88	3.98	0.10	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.10	15.9
3.98	4.07	0.09	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.09	17.6
4.07	4.15	0.08	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.08	19.8
4.15	4.25	0.10	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.10	15.9
4.25	4.35	0.10	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.10	15.9
4.35	4.44	0.09	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.09	17.6
4.44	4.53	0.09	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.09	17.6
4.53	4.62	0.09	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.09	17.6
4.62	4.71	0.09	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.09	17.6
4.71	4.8	0.09	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.09	17.6
									17.6

Sitio de Estudio 2: El Paraje No. sitio : 1 (Parte Baja de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.20	0.20	2	0.125	3.175	3.18	3.18	0.20	15.9
0.20	0.56	0.36	2	0.125	3.175	6.35	3.18	0.36	8.8
0.56	0.79	0.23	2	0.125	3.175	9.53	3.18	0.23	13.8
0.79	0.99	0.20	2	0.125	3.175	12.70	3.18	0.20	15.9
0.99	1.19	0.20	2	0.125	3.175	15.88	3.18	0.20	15.9
1.19	1.39	0.20	2	0.125	3.175	19.05	3.18	0.20	15.9
1.39	1.61	0.22	2	0.125	3.175	22.23	3.18	0.22	14.4
1.61	1.80	0.19	2	0.125	3.175	25.40	3.18	0.19	16.7
1.80	2.02	0.22	2	0.125	3.175	28.58	3.18	0.22	14.4
2.02	2.24	0.22	2	0.125	3.175	31.75	3.18	0.22	14.4
2.24	2.44	0.20	2	0.125	3.175	34.93	3.18	0.20	15.9
2.44	2.66	0.22	2	0.125	3.175	38.10	3.18	0.22	14.4
2.66	2.88	0.22	2	0.125	3.175	41.28	3.18	0.22	14.4
2.88	3.14	0.26	2	0.125	3.175	44.45	3.18	0.26	12.2
3.14	3.34	0.20	2	0.125	3.175	47.63	3.18	0.20	15.9
3.34	3.56	0.22	2	0.125	3.175	50.80	3.18	0.22	14.4
3.56	3.74	0.18	2	0.125	3.175	53.98	3.18	0.18	17.6
3.74	3.95	0.21	2	0.125	3.175	57.15	3.18	0.21	15.1
3.95	4.12	0.17	2	0.125	3.175	60.33	3.18	0.17	18.7
4.12	4.30	0.18	2	0.125	3.175	63.50	3.18	0.18	17.6
4.30	4.47	0.17	2	0.125	3.175	66.68	3.18	0.17	18.7
4.47	4.67	0.20	2	0.125	3.175	69.85	3.18	0.20	15.9
4.67	4.94	0.27	2	0.125	3.175	73.03	3.18	0.27	11.8
4.94	5.10	0.16	2	0.125	3.175	76.20	3.18	0.16	19.8
5.10	5.31	0.21	2	0.125	3.175	79.38	3.18	0.21	15.1
5.31	5.51	0.20	2	0.125	3.175	82.55	3.18	0.20	15.9
5.51	5.90	0.39	2	0.125	3.175	85.73	3.18	0.39	8.1
5.90	6.14	0.24	2	0.125	3.175	88.90	3.18	0.24	13.2
6.14	6.40	0.26	2	0.125	3.175	92.08	3.18	0.26	12.2

Sitio de Estudio 2: El Paraje No. sitio : 2 (Parte Media Baja de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.15	0.15	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.15	10.6
0.15	0.28	0.13	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.13	12.2
0.28	0.37	0.09	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.09	17.6
0.37	0.58	0.21	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.21	7.6
0.58	0.87	0.29	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.29	5.5
0.87	1.03	0.16	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.16	9.9
1.03	1.24	0.21	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.21	7.6
1.24	1.41	0.17	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.17	9.3
1.41	1.69	0.28	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.28	5.7
1.69	1.84	0.15	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.15	10.6
1.84	2.03	0.19	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.19	8.4
2.03	2.21	0.18	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.18	8.8
2.21	2.42	0.21	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.21	7.6
2.42	2.60	0.18	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.18	8.8
2.60	2.76	0.16	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.16	9.9
2.76	2.90	0.14	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.14	11.3
2.90	3.10	0.20	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.20	7.9
3.10	3.25	0.15	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.15	10.6
3.25	3.44	0.19	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.19	8.4
3.44	3.59	0.15	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.15	10.6
3.59	3.98	0.39	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.39	4.1
3.98	4.17	0.19	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.19	8.4
4.17	4.39	0.22	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.22	7.2
4.39	4.54	0.15	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.15	10.6
4.54	4.69	0.15	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.15	10.6
4.69	4.88	0.19	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.19	8.4
4.88	5.00	0.12	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.12	13.2
5.00	5.16	0.16	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.16	9.9
5.16	5.32	0.16	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.16	9.9

6.40	6.60	0.20	2	0.125	3.175	95.25	3.18	0.20	15.9
6.60	6.78	0.18	2	0.125	3.175	98.43	3.18	0.18	17.6
6.78	6.97	0.19	2	0.125	3.175	101.60	3.18	0.19	16.7
6.97	7.20	0.23	2	0.125	3.175	104.78	3.18	0.23	13.8
7.20	7.42	0.22	2	0.125	3.175	107.95	3.18	0.22	14.4
7.42	7.63	0.21	2	0.125	3.175	111.13	3.18	0.21	15.1
7.63	7.84	0.21	2	0.125	3.175	114.30	3.18	0.21	15.1
7.84	8.10	0.26	2	0.125	3.175	117.48	3.18	0.26	12.2
8.10	8.29	0.19	2	0.125	3.175	120.65	3.18	0.19	16.7
8.29	8.51	0.22	2	0.125	3.175	123.83	3.18	0.22	14.4
8.51	8.76	0.25	2	0.125	3.175	127.00	3.18	0.25	12.7
8.76	8.94	0.18	2	0.125	3.175	130.18	3.18	0.18	17.6
8.94	9.19	0.25	2	0.125	3.175	133.35	3.18	0.25	12.7
9.19	9.40	0.21	2	0.125	3.175	136.53	3.18	0.21	15.1
9.40	9.61	0.21	2	0.125	3.175	139.70	3.18	0.21	15.1
9.61	9.84	0.23	2	0.125	3.175	142.88	3.18	0.23	13.8
9.84	10.09	0.25	2	0.125	3.175	146.05	3.18	0.25	12.7
10.09	10.31	0.22	2	0.125	3.175	149.23	3.18	0.22	14.4
10.31	10.52	0.21	2	0.125	3.175	152.40	3.18	0.21	15.1
10.52	10.84	0.32	2	0.125	3.175	155.58	3.18	0.32	9.9
10.84	11.00	0.16	2	0.125	3.175	158.75	3.18	0.16	19.8
11.00	11.26	0.26	2	0.125	3.175	161.93	3.18	0.26	12.2
11.26	11.46	0.20	2	0.125	3.175	165.10	3.18	0.20	15.9
11.46	11.77	0.31	2	0.125	3.175	168.28	3.18	0.31	10.2
11.77	12.00	0.23	2	0.125	3.175	171.45	3.18	0.23	13.8
12.00	12.21	0.21	2	0.125	3.175	174.63	3.18	0.21	15.1
12.21	12.47	0.26	2	0.125	3.175	177.80	3.18	0.26	12.2
12.47	12.74	0.27	2	0.125	3.175	180.98	3.18	0.27	11.8
12.74	13.02	0.28	2	0.125	3.175	184.15	3.18	0.28	11.3
13.02	13.30	0.28	2	0.125	3.175	187.33	3.18	0.28	11.3
13.30	13.59	0.29	2	0.125	3.175	190.50	3.18	0.29	10.9
13.59	13.89	0.30	2	0.125	3.175	193.68	3.18	0.30	10.6
13.89	14.19	0.30	2	0.125	3.175	196.85	3.18	0.30	10.6
14.19	14.49	0.30	2	0.125	3.175	200.03	3.18	0.30	10.6
14.49	14.79	0.30	2	0.125	3.175	203.20	3.18	0.30	10.6
14.79	15.09	0.30	2	0.125	3.175	206.38	3.18	0.30	10.6
15.09	15.39	0.30	2	0.125	3.175	209.55	3.18	0.30	10.6
									10.6

5.32	5.44	0.12	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.12	13.2
5.44	5.65	0.21	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.21	7.6
5.65	5.81	0.16	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.16	9.9
5.81	6.08	0.27	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.27	5.9
6.08	6.25	0.17	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.17	9.3
6.25	6.42	0.17	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.17	9.3
6.42	6.56	0.14	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.14	11.3
6.56	6.75	0.19	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.19	8.4
6.75	7.00	0.25	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.25	6.3
7.00	7.13	0.13	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.13	12.2
7.13	7.31	0.18	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.18	8.8
7.31	7.46	0.15	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.15	10.6
7.46	7.65	0.19	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.19	8.4
7.65	7.92	0.27	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.27	5.9
7.92	8.11	0.19	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.19	8.4
8.11	8.33	0.22	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.22	7.2
8.33	8.48	0.15	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.15	10.6
8.48	8.67	0.19	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.19	8.4
8.67	8.86	0.19	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.19	8.4
8.86	9.07	0.21	1	0.063	1.588	77.79	1.59	0.21	7.6
9.07	9.23	0.16	1	0.063	1.588	79.38	1.59	0.16	9.9
9.23	9.40	0.17	1	0.063	1.588	80.96	1.59	0.17	9.3
9.40	9.63	0.23	1	0.063	1.588	82.55	1.59	0.23	6.9
9.63	9.82	0.19	1	0.063	1.588	84.14	1.59	0.19	8.4
9.82	10.03	0.21	1	0.063	1.588	85.73	1.59	0.21	7.6
10.03	10.32	0.29	1	0.063	1.588	87.31	1.59	0.29	5.5
10.32	10.56	0.24	1	0.063	1.588	88.90	1.59	0.24	6.6
10.56	10.80	0.24	1	0.063	1.588	90.49	1.59	0.24	6.6
10.80	11.05	0.25	1	0.063	1.588	92.08	1.59	0.25	6.4
11.05	11.24	0.19	1	0.063	1.588	93.66	1.59	0.19	8.4
11.24	11.51	0.27	1	0.063	1.588	95.25	1.59	0.27	5.9
11.51	11.71	0.18	1	0.063	1.588	96.84	1.59	0.18	8.8
11.71	11.89	0.18	1	0.063	1.588	98.43	1.59	0.18	8.8
11.89	12.12	0.23	1	0.063	1.588	99.99	1.59	0.23	6.9
12.12	12.28	0.16	1	0.063	1.588	101.56	1.59	0.16	9.9
12.28	12.46	0.18	1	0.063	1.588	103.13	1.59	0.18	8.8
12.46	12.65	0.19	1	0.063	1.588	104.70	1.59	0.19	8.4
12.65	12.83	0.18	1	0.063	1.588	106.27	1.59	0.18	8.8
12.83	13.01	0.18	1	0.063	1.588	107.84	1.59	0.18	8.8
13.01	13.18	0.17	1	0.063	1.588	109.41	1.59	0.17	9.3
13.18	13.35	0.17	1	0.063	1.588	110.98	1.59	0.17	9.3
13.35	13.51	0.16	1	0.063	1.588	112.55	1.59	0.16	9.9
13.51	14.67	1.16	1	0.063	1.588	114.12	1.59	1.16	1.4
14.67	14.82	0.15	1	0.063	1.588	115.69	1.59	0.15	10.6
14.82	14.97	0.15	1	0.063	1.588	117.26	1.59	0.15	10.6
14.97	15.12	0.15	1	0.063	1.588	118.83	1.59	0.15	10.6
15.12	15.27	0.15	1	0.063	1.588	120.40	1.59	0.15	10.6
15.27	15.42	0.15	1	0.063	1.588	121.97	1.59	0.15	10.6
									10.6

Sitio de Estudio 2: El Paraje No. sitio : 3 (Parte Media Alta de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.10	0.10	2	0.125	3.175	3.18	3.18	0.10	31.8
0.10	0.25	0.15	2	0.125	3.175	6.35	3.18	0.15	21.2
0.25	0.38	0.13	2	0.125	3.175	9.53	3.18	0.13	24.4
0.38	0.51	0.13	2	0.125	3.175	12.70	3.18	0.13	24.4
0.51	0.73	0.22	2	0.125	3.175	15.88	3.18	0.22	14.4
0.73	0.87	0.14	2	0.125	3.175	19.05	3.18	0.14	22.7
0.87	1.04	0.17	2	0.125	3.175	22.23	3.18	0.17	18.7
1.04	1.20	0.16	2	0.125	3.175	25.40	3.18	0.16	19.8
1.20	1.36	0.16	2	0.125	3.175	28.58	3.18	0.16	19.8
1.36	1.48	0.12	2	0.125	3.175	31.75	3.18	0.12	26.5
1.48	1.62	0.14	2	0.125	3.175	34.93	3.18	0.14	22.7
1.62	1.74	0.12	2	0.125	3.175	38.10	3.18	0.12	26.5
1.74	1.89	0.15	2	0.125	3.175	41.28	3.18	0.15	21.2
1.89	2.02	0.13	2	0.125	3.175	44.45	3.18	0.13	24.4
2.02	2.20	0.18	2	0.125	3.175	47.63	3.18	0.18	17.6
2.20	2.34	0.14	2	0.125	3.175	50.80	3.18	0.14	22.7
2.34	2.64	0.30	2	0.125	3.175	53.98	3.18	0.30	10.6
2.64	2.80	0.16	2	0.125	3.175	57.15	3.18	0.16	19.8
2.80	2.92	0.12	2	0.125	3.175	60.33	3.18	0.12	26.5
2.92	3.13	0.21	2	0.125	3.175	63.50	3.18	0.21	15.1
3.13	3.28	0.15	2	0.125	3.175	66.68	3.18	0.15	21.2
3.28	3.40	0.12	2	0.125	3.175	69.85	3.18	0.12	26.5
3.40	3.57	0.17	2	0.125	3.175	73.03	3.18	0.17	18.7
3.57	3.77	0.20	2	0.125	3.175	76.20	3.18	0.20	15.9
3.77	3.92	0.15	2	0.125	3.175	79.38	3.18	0.15	21.2
3.92	4.07	0.15	2	0.125	3.175	82.55	3.18	0.15	21.2
4.07	4.24	0.17	2	0.125	3.175	85.73	3.18	0.17	18.7
4.24	4.56	0.32	2	0.125	3.175	88.90	3.18	0.32	9.9
4.56	4.76	0.20	2	0.125	3.175	92.08	3.18	0.20	15.9
4.76	4.92	0.16	2	0.125	3.175	95.25	3.18	0.16	19.8
4.92	5.12	0.20	2	0.125	3.175	98.43	3.18	0.20	15.9
5.12	5.28	0.16	2	0.125	3.175	101.60	3.18	0.16	19.8
5.28	5.48	0.20	2	0.125	3.175	104.78	3.18	0.20	15.9
5.48	5.65	0.17	2	0.125	3.175	107.95	3.18	0.17	18.7
5.65	5.80	0.15	2	0.125	3.175	111.13	3.18	0.15	21.2
5.80	5.99	0.19	2	0.125	3.175	114.30	3.18	0.19	16.7
5.99	6.13	0.14	2	0.125	3.175	117.48	3.18	0.14	22.7
6.13	6.24	0.11	2	0.125	3.175	120.65	3.18	0.11	28.9
6.24	6.39	0.15	2	0.125	3.175	123.83	3.18	0.15	21.2
6.39	6.56	0.17	2	0.125	3.175	127.00	3.18	0.17	18.7
6.56	6.71	0.15	2	0.125	3.175	130.18	3.18	0.15	21.2
6.71	6.87	0.16	2	0.125	3.175	133.35	3.18	0.16	19.8
6.87	7.02	0.15	2	0.125	3.175	136.53	3.18	0.15	21.2
7.02	7.16	0.14	2	0.125	3.175	139.70	3.18	0.14	22.7
7.16	7.42	0.26	2	0.125	3.175	142.88	3.18	0.26	12.2
7.42	7.61	0.19	2	0.125	3.175	146.05	3.18	0.19	16.7
7.61	7.72	0.11	2	0.125	3.175	149.23	3.18	0.11	28.9
7.72	7.87	0.15	2	0.125	3.175	152.40	3.18	0.15	21.2

Sitio de Estudio 2: El Paraje No. sitio : 4 (Parte Alta de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.23	0.23	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.23	6.9
0.23	0.33	0.10	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.10	15.9
0.33	0.47	0.14	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.14	11.3
0.47	0.59	0.12	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.12	13.2
0.59	0.79	0.20	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.20	7.9
0.79	1.07	0.28	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.28	5.7
1.07	1.33	0.26	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.26	6.1
1.33	1.53	0.20	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.20	7.9
1.53	1.80	0.27	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.27	5.9
1.80	1.94	0.14	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.14	11.3
1.94	2.11	0.17	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.17	9.3
2.11	2.26	0.15	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.15	10.6
2.26	2.45	0.19	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.19	8.4
2.45	2.84	0.39	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.39	4.1
2.84	3.05	0.21	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.21	7.6
3.05	3.30	0.25	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.25	6.3
3.30	3.52	0.22	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.22	7.2
3.52	3.69	0.17	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.17	9.3
3.69	3.88	0.19	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.19	8.4
3.88	4.11	0.23	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.23	6.9
4.11	4.30	0.19	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.19	8.4
4.30	4.46	0.16	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.16	9.9
4.46	4.69	0.23	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.23	6.9
4.69	4.96	0.27	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.27	5.9
4.96	5.18	0.22	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.22	7.2
5.18	5.37	0.19	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.19	8.4
5.37	5.57	0.20	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.20	7.9
5.57	5.81	0.24	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.24	6.6
5.81	5.98	0.17	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.17	9.3
5.98	6.12	0.14	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.14	11.3
6.12	6.36	0.24	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.24	6.6
6.36	6.59	0.23	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.23	6.9
6.59	6.91	0.32	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.32	5.0
6.91	7.07	0.16	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.16	9.9
7.07	7.20	0.13	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.13	12.2
7.20	7.34	0.14	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.14	11.3
7.34	7.53	0.19	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.19	8.4
7.53	7.67	0.14	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.14	11.3
7.67	7.82	0.15	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.15	10.6
7.82	8.12	0.30	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.30	5.3
8.12	8.32	0.20	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.20	7.9
8.32	8.48	0.16	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.16	9.9
8.48	8.67	0.19	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.19	8.4
8.67	9.01	0.34	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.34	4.7
9.01	9.31	0.30	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.30	5.3
9.31	9.46	0.15	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.15	10.6
9.46	9.64	0.18	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.18	8.8
9.64	9.83	0.19	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.19	8.4

7.87	8.03	0.16	2	0.125	3.175	155.58	3.18	0.16	19.8
8.03	8.21	0.18	2	0.125	3.175	158.75	3.18	0.18	17.6
8.21	8.36	0.15	2	0.125	3.175	161.93	3.18	0.15	21.2
8.36	8.53	0.17	2	0.125	3.175	165.10	3.18	0.17	18.7
8.53	8.79	0.26	2	0.125	3.175	168.28	3.18	0.26	12.2
8.79	8.99	0.20	2	0.125	3.175	171.45	3.18	0.20	15.9
8.99	9.13	0.14	2	0.125	3.175	174.63	3.18	0.14	22.7
9.13	9.29	0.16	2	0.125	3.175	177.80	3.18	0.16	19.8
9.29	9.43	0.14	2	0.125	3.175	180.98	3.18	0.14	22.7
9.43	9.81	0.38	2	0.125	3.175	184.15	3.18	0.38	8.4
9.81	9.97	0.16	2	0.125	3.175	187.33	3.18	0.16	19.8
9.97	10.16	0.19	2	0.125	3.175	190.50	3.18	0.19	16.7
10.16	10.29	0.13	2	0.125	3.175	193.68	3.18	0.13	24.4
10.29	10.46	0.17	2	0.125	3.175	196.85	3.18	0.17	18.7
10.46	10.66	0.20	2	0.125	3.175	200.03	3.18	0.20	15.9
10.66	10.86	0.20	2	0.125	3.175	203.20	3.18	0.20	15.9
10.86	11.06	0.20	2	0.125	3.175	206.38	3.18	0.20	15.9
11.06	11.26	0.20	2	0.125	3.175	209.55	3.18	0.20	15.9
11.26	11.46	0.20	2	0.125	3.175	212.73	3.18	0.20	15.9
11.46	11.66	0.20	2	0.125	3.175	215.90	3.18	0.20	15.9
									15.9

9.83	10.02	0.19	1	0.063	1.588	77.79	1.59	0.19	8.4
10.02	10.24	0.22	1	0.063	1.588	79.38	1.59	0.22	7.2
10.24	10.46	0.22	1	0.063	1.588	80.96	1.59	0.22	7.2
10.46	10.66	0.20	1	0.063	1.588	82.55	1.59	0.20	7.9
10.66	10.86	0.20	1	0.063	1.588	84.14	1.59	0.20	7.9
10.86	11.04	0.18	1	0.063	1.588	85.73	1.59	0.18	8.8
11.04	11.22	0.18	1	0.063	1.588	87.31	1.59	0.18	8.8
11.22	11.40	0.18	1	0.063	1.588	88.90	1.59	0.18	8.8
11.40	11.58	0.18	1	0.063	1.588	90.49	1.59	0.18	8.8
11.58	11.76	0.18	1	0.063	1.588	92.08	1.59	0.18	8.8
									8.8

Sitio de Estudio 3: Zoquiapan No. sitio : 1 (Parte Alta de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.05	0.05	2	0.125	3.175	3.18	3.18	0.05	63.5
0.05	0.09	0.04	2	0.125	3.175	6.35	3.18	0.04	79.4
0.09	0.13	0.04	2	0.125	3.175	9.53	3.18	0.04	79.4
0.13	0.17	0.04	2	0.125	3.175	12.70	3.18	0.04	79.4
0.17	0.21	0.04	2	0.125	3.175	15.88	3.18	0.04	79.4
0.21	0.25	0.04	2	0.125	3.175	19.05	3.18	0.04	79.4
0.25	0.29	0.04	2	0.125	3.175	22.23	3.18	0.04	79.4
0.29	0.33	0.04	2	0.125	3.175	25.40	3.18	0.04	79.4
0.33	0.37	0.04	2	0.125	3.175	28.58	3.18	0.04	79.4
0.37	0.42	0.05	2	0.125	3.175	31.75	3.18	0.05	63.5
0.42	0.46	0.04	2	0.125	3.175	34.93	3.18	0.04	79.4
0.46	0.50	0.04	2	0.125	3.175	38.10	3.18	0.04	79.4
0.50	0.54	0.04	2	0.125	3.175	41.28	3.18	0.04	79.4
0.54	0.59	0.05	2	0.125	3.175	44.45	3.18	0.05	63.5
0.59	0.66	0.07	2	0.125	3.175	47.63	3.18	0.07	45.4
0.66	0.69	0.03	2	0.125	3.175	50.80	3.18	0.03	105.8
0.69	0.75	0.06	2	0.125	3.175	53.98	3.18	0.06	52.9
0.75	0.80	0.05	2	0.125	3.175	57.15	3.18	0.05	63.5
0.80	0.87	0.07	2	0.125	3.175	60.33	3.18	0.07	45.4
0.87	0.92	0.05	2	0.125	3.175	63.50	3.18	0.05	63.5
0.92	0.96	0.04	2	0.125	3.175	66.68	3.18	0.04	79.4
0.96	0.99	0.03	2	0.125	3.175	69.85	3.18	0.03	105.8
0.99	1.04	0.05	2	0.125	3.175	73.03	3.18	0.05	63.5
1.04	1.08	0.04	2	0.125	3.175	76.20	3.18	0.04	79.4

Sitio de Estudio 3: Zoquiapan No. sitio : 2 (Parte Media Alta de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	Volumen (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.09	0.09	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.09	17.6
0.09	0.17	0.08	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.08	19.8
0.17	0.25	0.08	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.08	19.8
0.25	0.31	0.06	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.06	26.5
0.31	0.41	0.10	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.10	15.9
0.41	0.48	0.07	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.07	22.7
0.48	0.55	0.07	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.07	22.7
0.55	0.62	0.07	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.07	22.7
0.62	0.70	0.08	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.08	19.8
0.70	0.76	0.06	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.06	26.5
0.76	0.89	0.13	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.13	12.2
0.89	0.98	0.09	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.09	17.6
0.98	1.06	0.08	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.08	19.8
1.06	1.15	0.09	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.09	17.6
1.15	1.22	0.07	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.07	22.7
1.22	1.29	0.07	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.07	22.7
1.29	1.38	0.09	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.09	17.6
1.38	1.48	0.10	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.10	15.9
1.48	1.58	0.10	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.10	15.9
1.58	1.66	0.08	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.08	19.8
1.66	1.76	0.10	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.10	15.9
1.76	1.82	0.06	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.06	26.5
1.82	1.93	0.11	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.11	14.4
1.93	2.00	0.07	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.07	22.7

1.08	1.13	0.05	2	0.125	3.175	79.38	3.18	0.05	63.5
1.13	1.18	0.05	2	0.125	3.175	82.55	3.18	0.05	63.5
1.18	1.22	0.04	2	0.125	3.175	85.73	3.18	0.04	79.4
2.22	2.29	0.07	2	0.125	3.175	88.90	3.18	0.07	45.4
2.29	2.33	0.04	2	0.125	3.175	92.08	3.18	0.04	79.4
2.33	2.37	0.04	2	0.125	3.175	95.25	3.18	0.04	79.4
2.37	2.44	0.07	2	0.125	3.175	98.43	3.18	0.07	45.4
2.44	2.50	0.06	2	0.125	3.175	101.60	3.18	0.06	52.9
2.50	2.55	0.05	2	0.125	3.175	104.78	3.18	0.05	63.5
2.55	2.63	0.08	2	0.125	3.175	107.95	3.18	0.08	39.7
2.63	2.69	0.06	2	0.125	3.175	111.13	3.18	0.06	52.9
2.69	2.72	0.03	2	0.125	3.175	114.30	3.18	0.03	105.8
2.72	2.75	0.03	2	0.125	3.175	117.48	3.18	0.03	105.8
2.75	2.79	0.04	2	0.125	3.175	120.65	3.18	0.04	79.4
2.79	2.83	0.04	2	0.125	3.175	123.83	3.18	0.04	79.4
2.83	2.88	0.05	2	0.125	3.175	127.00	3.18	0.05	63.5
2.88	2.92	0.04	2	0.125	3.175	130.18	3.18	0.04	79.4
2.92	2.98	0.06	2	0.125	3.175	133.35	3.18	0.06	52.9
2.98	3.02	0.04	2	0.125	3.175	136.53	3.18	0.04	79.4
3.02	3.06	0.04	2	0.125	3.175	139.70	3.18	0.04	79.4
3.06	3.11	0.05	2	0.125	3.175	142.88	3.18	0.05	63.5
3.11	3.16	0.05	2	0.125	3.175	146.05	3.18	0.05	63.5
3.16	3.20	0.04	2	0.125	3.175	149.23	3.18	0.04	79.4
3.20	3.25	0.05	2	0.125	3.175	152.40	3.18	0.05	63.5
3.25	3.30	0.05	2	0.125	3.175	155.58	3.18	0.05	63.5
3.30	3.34	0.04	2	0.125	3.175	158.75	3.18	0.04	79.4
3.34	3.38	0.04	2	0.125	3.175	161.93	3.18	0.04	79.4
3.38	3.42	0.04	2	0.125	3.175	165.10	3.18	0.04	79.4
3.42	3.48	0.06	2	0.125	3.175	168.28	3.18	0.06	52.9
3.48	3.52	0.04	2	0.125	3.175	171.45	3.18	0.04	79.4
3.52	3.56	0.04	2	0.125	3.175	174.63	3.18	0.04	79.4
4.56	4.60	0.04	2	0.125	3.175	177.80	3.18	0.04	79.4
3.60	3.64	0.04	2	0.125	3.175	180.98	3.18	0.04	79.4
3.64	3.69	0.05	2	0.125	3.175	184.15	3.18	0.05	63.5
3.69	3.74	0.05	2	0.125	3.175	187.33	3.18	0.05	63.5
3.74	3.80	0.06	2	0.125	3.175	190.50	3.18	0.06	52.9
3.80	3.85	0.05	2	0.125	3.175	193.68	3.18	0.05	63.5
3.85	3.90	0.05	2	0.125	3.175	196.85	3.18	0.05	63.5
3.90	3.94	0.04	2	0.125	3.175	200.03	3.18	0.04	79.4
3.94	3.98	0.04	2	0.125	3.175	203.20	3.18	0.04	79.4
3.98	4.05	0.07	2	0.125	3.175	206.38	3.18	0.07	45.4
4.05	4.09	0.04	2	0.125	3.175	209.55	3.18	0.04	79.4
4.09	4.14	0.05	2	0.125	3.175	212.73	3.18	0.05	63.5
4.14	4.19	0.05	2	0.125	3.175	215.90	3.18	0.05	63.5
4.19	4.24	0.05	2	0.125	3.175	219.08	3.18	0.05	63.5
4.24	4.29	0.05	2	0.125	3.175	222.25	3.18	0.05	63.5
4.29	4.33	0.04	2	0.125	3.175	225.43	3.18	0.04	79.4
4.33	4.45	0.12	2	0.125	3.175	228.60	3.18	0.12	26.5
4.45	4.56	0.11	2	0.125	3.175	231.78	3.18	0.11	28.9
4.56	4.70	0.14	2	0.125	3.175	234.95	3.18	0.14	22.7
4.70	4.85	0.15	2	0.125	3.175	238.13	3.18	0.15	21.2
4.85	4.97	0.12	2	0.125	3.175	241.30	3.18	0.12	26.5
4.97	5.09	0.12	2	0.125	3.175	244.48	3.18	0.12	26.5

2.00	2.08	0.08	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.08	19.8
2.08	2.18	0.10	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.10	15.9
2.18	2.27	0.09	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.09	17.6
2.27	2.36	0.09	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.09	17.6
2.36	2.46	0.10	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.10	15.9
2.46	2.52	0.06	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.06	26.5
2.52	2.59	0.07	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.07	22.7
2.59	2.72	0.13	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.13	12.2
2.72	2.81	0.09	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.09	17.6
2.81	2.89	0.08	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.08	19.8
2.89	2.99	0.10	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.10	15.9
2.99	3.09	0.10	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.10	15.9
3.09	3.16	0.07	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.07	22.7
3.16	3.23	0.07	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.07	22.7
3.23	3.33	0.10	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.10	15.9
3.33	3.42	0.09	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.09	17.6
3.42	3.50	0.08	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.08	19.8
3.50	3.54	0.04	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.04	39.7
3.54	3.68	0.14	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.14	11.3
3.68	3.77	0.09	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.09	17.6
3.77	3.89	0.12	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.12	13.2
3.89	3.92	0.03	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.03	52.9
3.92	4.01	0.09	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.09	17.6
4.01	4.10	0.09	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.09	17.6
4.10	4.19	0.09	1	0.063	1.588	77.79	1.59	0.09	17.6
4.19	4.28	0.09	1	0.063	1.588	79.38	1.59	0.09	17.6
4.28	4.37	0.09	1	0.063	1.588	80.96	1.59	0.09	17.6
4.37	4.46	0.09	1	0.063	1.588	82.55	1.59	0.09	17.6
4.46	4.55	0.09	1	0.063	1.588	84.14	1.59	0.09	17.6

17.6

5.09	5.26	0.17	2	0.125	3.175	247.65	3.18	0.17	18.7
5.26	5.39	0.13	2	0.125	3.175	250.83	3.18	0.13	24.4
5.39	5.51	0.12	2	0.125	3.175	254.00	3.18	0.12	26.5
5.51	5.63	0.12	2	0.125	3.175	257.18	3.17	0.12	26.5
5.63	5.76	0.13	2	0.125	3.175	260.35	3.18	0.13	24.4
5.76	5.92	0.16	2	0.125	3.175	263.53	3.18	0.16	19.8
5.92	6.05	0.13	2	0.125	3.175	266.70	3.18	0.13	24.4
6.05	6.18	0.13	2	0.125	3.175	269.88	3.18	0.13	24.4
6.18	6.35	0.17	2	0.125	3.175	273.05	3.18	0.17	18.7
6.35	6.50	0.15	2	0.125	3.175	276.23	3.18	0.15	21.2
6.50	6.64	0.14	2	0.125	3.175	279.40	3.18	0.14	22.7
6.64	6.77	0.13	2	0.125	3.175	282.58	3.18	0.13	24.4
6.77	6.90	0.13	2	0.125	3.175	285.75	3.18	0.13	24.4
6.90	7.03	0.13	2	0.125	3.175	288.93	3.18	0.13	24.4
7.03	7.17	0.14	2	0.125	3.175	292.10	3.18	0.14	22.7
7.17	7.30	0.13	2	0.125	3.175	295.28	3.18	0.13	24.4
7.30	7.44	0.14	2	0.125	3.175	298.45	3.18	0.14	22.7
7.44	7.56	0.12	2	0.125	3.175	301.63	3.18	0.12	26.5
7.56	7.68	0.12	2	0.125	3.175	304.80	3.18	0.12	26.5
7.68	7.80	0.12	2	0.125	3.175	307.98	3.18	0.12	26.5
7.80	7.92	0.12	2	0.125	3.175	311.15	3.18	0.12	26.5
									26.5

Sitio de Estudio 3: Zoquiapan No. sitio : 3 (Parte Media Baja de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.08	0.08	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.08	19.8
0.08	0.19	0.11	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.11	14.4
0.19	0.27	0.08	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.08	19.8
0.27	0.35	0.08	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.08	19.8
0.35	0.42	0.07	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.07	22.7
0.42	0.53	0.11	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.11	14.4
0.53	0.62	0.09	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.09	17.6
0.62	0.71	0.09	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.09	17.6
0.71	0.81	0.10	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.10	15.9
0.81	0.89	0.08	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.08	19.8
0.89	1.00	0.11	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.11	14.4
1.00	1.09	0.09	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.09	17.6
1.09	1.18	0.09	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.09	17.6
1.18	1.27	0.09	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.09	17.6
1.27	1.36	0.09	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.09	17.6
1.36	1.48	0.12	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.12	13.2
1.48	1.58	0.10	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.10	15.9
1.58	1.68	0.10	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.10	15.9
1.68	1.77	0.09	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.09	17.6
1.77	1.87	0.10	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.10	15.9
1.87	1.97	0.10	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.10	15.9
1.97	2.08	0.11	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.11	14.4
2.08	2.17	0.09	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.09	17.6

Sitio de Estudio 3: Zoquiapan No. sitio : 4 (Parte Baja de la Ladera)									
Tiempo inicial	Tiempo final	Diferencia	nivel (1/16 pulgadas)	Pulgadas	nivel	nivel acumulado	Δ del flujo	Δ tiempo	Δ nivel/ Δ tiempo
min	min		1/16"		mm			min	
0.00	0.07	0.07	1	0.063	1.588	1.59	1.59	0.07	22.7
0.07	0.17	0.10	1	0.063	1.588	3.18	1.59	0.10	15.9
0.17	0.24	0.07	1	0.063	1.588	4.76	1.59	0.07	22.7
0.24	0.36	0.12	1	0.063	1.588	6.35	1.59	0.12	13.2
0.36	0.44	0.08	1	0.063	1.588	7.94	1.59	0.08	19.8
0.44	0.55	0.11	1	0.063	1.588	9.53	1.59	0.11	14.4
0.55	0.66	0.11	1	0.063	1.588	11.11	1.59	0.11	14.4
0.66	0.77	0.11	1	0.063	1.588	12.70	1.59	0.11	14.4
0.77	0.87	0.10	1	0.063	1.588	14.29	1.59	0.10	15.9
0.87	0.94	0.07	1	0.063	1.588	15.88	1.59	0.07	22.7
0.94	1.02	0.08	1	0.063	1.588	17.46	1.59	0.08	19.8
1.02	1.13	0.11	1	0.063	1.588	19.05	1.59	0.11	14.4
1.13	1.20	0.07	1	0.063	1.588	20.64	1.59	0.07	22.7
1.20	1.28	0.08	1	0.063	1.588	22.23	1.59	0.08	19.8
1.28	1.39	0.11	1	0.063	1.588	23.81	1.59	0.11	14.4
1.39	1.51	0.12	1	0.063	1.588	25.40	1.59	0.12	13.2
1.51	1.61	0.10	1	0.063	1.588	26.99	1.59	0.10	15.9
1.61	1.69	0.08	1	0.063	1.588	28.58	1.59	0.08	19.8
1.69	1.77	0.08	1	0.063	1.588	30.16	1.59	0.08	19.8
1.77	1.87	0.10	1	0.063	1.588	31.75	1.59	0.10	15.9
1.87	1.99	0.12	1	0.063	1.588	33.34	1.59	0.12	13.2
1.99	2.11	0.12	1	0.063	1.588	34.93	1.59	0.12	13.2
2.11	2.25	0.14	1	0.063	1.588	36.51	1.59	0.14	11.3

2.17	2.27	0.10	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.10	15.9
2.27	2.37	0.10	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.10	15.9
2.37	2.47	0.10	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.10	15.9
2.47	2.60	0.13	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.13	12.2
2.60	2.69	0.09	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.09	17.6
2.69	2.79	0.10	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.10	15.9
2.79	2.91	0.12	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.12	13.2
2.91	3.01	0.10	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.10	15.9
3.01	3.11	0.10	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.10	15.9
3.11	3.19	0.08	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.08	19.8
3.19	3.29	0.10	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.10	15.9
3.29	3.35	0.06	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.06	26.5
3.35	3.45	0.10	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.10	15.9
3.45	3.54	0.09	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.09	17.6
3.54	3.63	0.09	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.09	17.6
3.63	3.71	0.08	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.08	19.8
3.71	3.79	0.08	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.08	19.8
3.79	3.87	0.08	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.08	19.8
3.87	3.96	0.09	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.09	17.6
3.96	4.06	0.10	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.10	15.9
4.06	4.16	0.10	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.10	15.9
4.16	4.26	0.10	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.10	15.9
4.26	4.35	0.09	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.09	17.6
4.35	4.44	0.09	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.09	17.6
4.44	4.53	0.09	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.09	17.6
4.53	4.63	0.10	1	0.063	1.588	77.79	1.59	0.10	15.9
4.63	4.73	0.10	1	0.063	1.588	79.38	1.59	0.10	15.9
4.73	4.83	0.10	1	0.063	1.588	80.96	1.59	0.10	15.9
4.83	4.93	0.10	1	0.063	1.588	82.55	1.59	0.10	15.9
4.93	5.03	0.10	1	0.063	1.588	84.14	1.59	0.10	15.9
									15.9

2.25	2.37	0.12	1	0.063	1.588	38.10	1.59	0.12	13.2
2.37	2.51	0.14	1	0.063	1.588	39.69	1.59	0.14	11.3
2.51	2.60	0.09	1	0.063	1.588	41.28	1.59	0.09	17.6
2.60	2.70	0.10	1	0.063	1.588	42.86	1.59	0.10	15.9
2.70	2.79	0.09	1	0.063	1.588	44.45	1.59	0.09	17.6
2.79	2.88	0.09	1	0.063	1.588	46.04	1.59	0.09	17.6
2.88	2.96	0.08	1	0.063	1.588	47.63	1.59	0.08	19.8
2.96	3.07	0.11	1	0.063	1.588	49.21	1.59	0.11	14.4
3.07	3.15	0.08	1	0.063	1.588	50.80	1.59	0.08	19.8
3.15	3.24	0.09	1	0.063	1.588	52.39	1.59	0.09	17.6
3.24	3.34	0.10	1	0.063	1.588	53.98	1.59	0.10	15.9
3.34	3.52	0.18	1	0.063	1.588	55.56	1.59	0.18	8.8
3.52	3.63	0.11	1	0.063	1.588	57.15	1.59	0.11	14.4
3.63	3.78	0.15	1	0.063	1.588	58.74	1.59	0.15	10.6
3.78	3.88	0.10	1	0.063	1.588	60.33	1.59	0.10	15.9
3.88	3.98	0.10	1	0.063	1.588	61.91	1.59	0.10	15.9
3.98	4.07	0.09	1	0.063	1.588	63.50	1.59	0.09	17.6
4.07	4.15	0.08	1	0.063	1.588	65.09	1.59	0.08	19.8
4.15	4.25	0.10	1	0.063	1.588	66.68	1.59	0.10	15.9
4.25	4.35	0.10	1	0.063	1.588	68.26	1.59	0.10	15.9
4.35	4.44	0.09	1	0.063	1.588	69.85	1.59	0.09	17.6
4.44	4.53	0.09	1	0.063	1.588	71.44	1.59	0.09	17.6
4.53	4.62	0.09	1	0.063	1.588	73.03	1.59	0.09	17.6
4.62	4.71	0.09	1	0.063	1.588	74.61	1.59	0.09	17.6
4.71	4.80	0.09	1	0.063	1.588	76.20	1.59	0.09	17.6
									17.6

