



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Facultad de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería Química  
Facultad de Biología

**Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia para la  
implementación de una plantación forestal comercial en la localidad  
de San Felipe de los Herreros, Municipio de Charapan Michoacán.**

**TESIS**

que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

presenta

**Ing. Civil Jonathan Zacarías Calderón**

Director de Tesis:  
**Dr. Luis Armando Ochoa Franco**

**Morelia, Michoacán, Septiembre de 2017.**



## **Agradecimientos.**

A mis padres por el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, es por ello que cada logro personal es fruto de la comprensión amor y confianza que me brindan día a día.

A mi compañera de vida por ser el soporte de este sueño, por caminar paso a paso este peldaño, propiciando ese empuje y coraje para cumplir las metas planteadas, te amo. Y a la chaparra por su entusiasmo y acompañamiento infalible.

A mis hermanos, que han sido compañeros de este viaje desde su trinchera, su presencia y energía siempre aligeró los problemas suscitados y realzó los recuerdos memorables.

A mis amigos que han estado a mi lado, sin lugar a dudas un bastión importante en el desarrollo de esta etapa.

Al laboratorio de Edafología, perteneciente a la facultad de Biología de la UMSNH, por la cooperación y asesoramiento en las pruebas realizadas en sus instalaciones.

Al laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, perteneciente a la facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, por el respaldo y apoyo en las pruebas realizadas en sus instalaciones.

A la empresa INGEOLAB, por la asesoría y acompañamiento en el levantamiento topográfico requerido para la investigación.

A los habitantes de la localidad de San Felipe de los Herreros por la atención e información otorgada para el fortalecimiento del presente documento.

A mi asesor de tesis, por haber confiado en mi persona, por ser guía y apoyo en la dirección del proyecto de investigación.

A los sinodales, por sus observaciones, comentarios y aportaciones que realizarán para enriquecer el presente proyecto.

Al CONACyT, por el financiamiento durante mi estancia en la maestría.

Y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindar la estructura para el desarrollo del proyecto.

# ÍNDICE

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>10</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
3.1 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA .....	12
3.1.1 Antecedentes .....	12
3.1.2 Situación actual de los SCALL en México.....	15
3.1.3 Legislación aplicable a SCALL en México.....	16
3.1.4 Definición, clasificación y componentes del SCALL .....	25
3.1.5 Diseño de un SCALL .....	30
3.2 PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES.....	42
3.2.1 Antecedentes .....	42
3.2.2 Definición .....	43
3.2.3 Perspectiva de las plantaciones forestales comerciales en México .....	45
3.2.4 Servicios ambientales.....	46
<b>4. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>48</b>
<b>5. OBJETIVOS.....</b>	<b>50</b>
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	50
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	50
<b>6. HIPÓTESIS .....</b>	<b>51</b>
<b>7. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
7.1 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	52
7.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	52
7.3 SITUACIÓN ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN SFH .....	56
7.4 ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	57
7.4.1 Localización de la microcuenca en estudio.....	58
7.4.2 Características geomorfológicas de la microcuenca.....	59
7.4.3 Precipitación media.....	72

7.4.4. <i>Balance hídrico</i> .....	80
7.5 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL SUELO EN LA MICROCUENCA DE ESTUDIO. ....	85
7.5.1 <i>Características físicas y químicas del suelo</i> .....	87
7.5.2 <i>Ecuación universal de pérdida del suelo</i> . ....	88
7.6 CALIDAD DE AGUA DEL COMPONENTE DE CAPTACIÓN DEL SCALL.....	93
<b>8. RESULTADOS</b> .....	<b>97</b>
8.1 RESULTADOS DE LA SITUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN SFH .....	97
8.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO HIDROLÓGICO .....	101
8.3 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL SUELO. ....	104
8.4 RESULTADOS DE PÉRDIDA DE SUELO. ....	107
8.5 RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA.....	109
8.6 ELEMENTOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA.....	112
8.6.1. <i>Área de captación</i> . ....	113
8.6.2. <i>Tipo de almacenamiento</i> .....	117
8.6.3. <i>Filtrado, distribución y tratamiento</i> . ....	126
8.6.4. <i>Diseño final SCALL</i> . ....	126
8.7 ELEMENTOS DE DISEÑO DE LA PFC. ....	128
<b>9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>136</b>
<b>10. RECOMENDACIONES</b> . ....	<b>141</b>
<b>12. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>144</b>
<b>13. ANEXOS</b> . ....	<b>157</b>
13.1 ANEXO 1. ÁREAS ELEGIBLES 2015 DEL COMPONENTE VI. PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES EN EL ESTADO DE MICHOCÁN.....	157
13.2 ANEXO 2. ENCUESTA PARA EVALUAR LA SITUACIÓN HÍDRICA DE SFH .....	158



---

## **Abreviaturas**

CONAFOR. Comisión Nacional Forestal.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua.

DHT. Diseño Hidrológico del Terreno.

ETP. Evapotranspiración potencial.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación Y Agricultura.

PFC. Plantación Forestal Comercial.

PSA. Pago de Servicios Ambientales.

SCALL. Sistema de Captación de Agua de Lluvia.

SFH. San Felipe de los Herreros.

WRB. World Reference Base for Soil Resources.



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de cuencas por su tamaño (Faustino & Jiménez, 2000) ....	60
Tabla 2. Cuantificación de corrientes por orden de la microcuenca en estudio.....	63
Tabla 3. Procedimiento Método Horton para el cálculo de la pendiente media de la cuenca en estudio. ....	68
Tabla 4. Datos para elaborar Curva Hipsométrica .....	70
Tabla 5. Desarrollo del 3er criterio Método de trapecios .....	72
Tabla 6. Datos generales de estaciones utilizadas para estudio hidrológico. ....	73
Tabla 7. Datos para realizar la curva masa doble y revisar la consistencia de datos existentes. ....	76
Tabla 8. Precipitación media de la cuenca por el método aritmético.....	77
Tabla 9. Precipitación media de la cuenca por el método de polígonos de Thiessen .....	79
Tabla 10. Precipitación media de la cuenca por el método de Isoyetas.....	80
Tabla 11. Datos de la estación 16032 Charapan. Fuente: Enriqueta García (2004) .....	81
Tabla 12. Valores de Ka para corrección de ETP .....	84
Tabla 13. Características del sitio de muestreo en relación con las Isoyetas y el régimen de humedad (Alcalá et. al., 2001).....	85
Tabla 14. Principales propiedades del suelo (Álcala, et. al., 2001) A= Arena. L=Limo. R=Arcilla. Dap=Densidad aparente. RH= retención de humedad a 1500 KPa. MO= Materia Orgánica. CIC=Capacidad de Intercambio Catiónico. SB= Saturación de Bases. RF= Retención de Fósforos. VV= Vidrio Volcánico. Al= Aluminio. Fe= Hierro. Aloh= Alofano. ....	86
Tabla 15. Parámetros físicos y químicos de suelo a analizar.....	88
Tabla 16. Ecuaciones regionalizadas de factor R (Erosividad) para la República Mexicana. ....	90



Tabla 17. Valores de erosionabilidad de los suelos (K) estimado en función de la textura y el contenido de MO (Morgan, 1985). .....	91
Tabla 18. Factor de vegetación y/o uso de suelo (Montes, Uribe y García, 2011) 92	
Tabla 19. Factor P utilizando diversas prácticas de conservación del suelo y agua .....	93
Tabla 20. Parámetros físicos a evaluar de la NOM-127-SSA1-1994 .....	95
Tabla 21. Parámetros químicos a analizar, basados en la NOM-127-SSA -1994. 95	
Tabla 22. Parámetros físicos y químicos adicionales a la NOM-127-SSA -1994 para analizar .....	95
Tabla 23. Parámetros de evaluación de la NOM-001-SEMARNAT-1996 .....	96
Tabla 24. Características geomorfológicas de la microcuenca .....	101
Tabla 25. Precipitaciones medias de la cuenca por los métodos planteados. ....	102
Tabla 26. Calculo de ETP corregida.....	103
Tabla 27. Balance hídrico de la zona de estudio.....	103
Tabla 28. Resultado de las características físicas y químicas del suelo. ....	107
Tabla 29. Resultado de los parámetros físicos de la NOM-127-SSA -1994.....	110
Tabla 30. Resultados de los parámetros químicos de la NOM-127-SSA1-1994. 110	
Tabla 31. Resultados de parámetros adicionales a la NOM-127-SSA1-1994.....	110
Tabla 32. Resultados de los parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-1996 .....	111
Tabla 33. Escurrimientos de áreas de captación para diferentes tipos de suelo (Doherty, 1988; citado en Gras, 2010). .....	116
Tabla 34. Modelación pluvial para SCALL considerando el consumo de la PFC.121	
Tabla 35. Requerimientos ambientales del <i>Pinus pseudostrobus Lindl</i> y datos disponibles del sitio en estudio (Muñoz, Sáenz, García, Hernández, & Anguiano, 2011 : Muñoz, Saenz, García, Coria, & Muñoz, 2015).....	131



Tabla 36. Características físicas y químicas requeridas del *Pinus pseudostrobus* Lindl y datos disponibles del sitio en estudio. (Eguiluz, 1978, citado en Muñoz, Sáenz, García, Hernández, & Anguiano, 2011). ..... 131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de Andosoles en la República Mexicana Fuente: Mapa digital de México INEGI ..... 38

Figura 2. Ubicación geográfica de Charapan, Michoacán de Ocampo. Fuente: Atlas de peligros naturales de Charapan, 2011 ..... 53

Figura 3. Mapa generado para Delimitar el Parteaguas en ArcGis 10.1 ..... 60

Figura 4. Mapa generado para definir la Longitud del eje mayor y la longitud del ancho mayor de la cuenca ..... 61

Figura 5. Mapa generado para la red hidrológica de la cuenca ..... 63

Figura 6. Gráfico de la pendiente media Cauce. 2do criterio ..... 65

Figura 7. Mapa del cálculo de la Pendiente media del cauce por el tercer criterio Taylor-Schwarz ..... 66

Figura 8. Mapa generado para el Método de Horton y calcular la pendiente media de cuenca en estudio. .... 67

Figura 9. Mapa de la elevación media de la cuenca 1er criterio..... 69

Figura 10. Mapa para generar áreas y elaborar curva Hipsométrica ..... 71

Figura 11. Elevación cuenca 2do criterio, en relación con curva hipsométrica. .... 71

Figura 12. Mapa de la Cuenca y estaciones seleccionadas..... 74

Figura 13. Curva masa para la revisión de consistencia de datos. .... 76

Figura 14. Polígonos de Thiessen..... 79

Figura 15. Método de Isoyetas ..... 80



Figura 16. Regionalización nacional de factor R (Erosividad). Fuente Montes, Uribe y García, 2011 .....	90
Figura 17. Fuentes de abastecimiento de agua para la localidad de San Felipe de los Herreros.....	97
Figura 18. Operatividad de SCALL instalados en la localidad SFH.....	98
Figura 19. Tipos de almacenamiento de los SCALL en SFH .....	99
Figura 20. Usos del agua en SFH .....	100
Figura 21. Actividad forestal en SFH.....	100
Figura 22. Curva hipsométrica. ....	102
Figura 23. Balance hídrico de la zona de estudio.....	104
Figura 24. Perfil de suelo para obtención de muestras. ....	105
Figura 25. Extracción de muestras del perfil. ....	106
Figura 26. Método del cilindro para extraer muestra de Dap. ....	106
Figura 27. Perfil de suelo en SFH. ....	106
Figura 28. Hoya piloto de captación. ....	111
Figura 29. Componentes del SCALL.....	112
Figura 30. Identificación de los valles, crestas, línea clave y punto clave en base a las curvas de nivel del terreno. Fuente (Cortés & Ramírez, 2013) .....	114
Figura 31. Identificación de punto clave .....	115
Figura 32. Identificación de la línea clave, punto clave, valle y crestas del terreno. ....	116
Figura 33. Área de captación. ....	117
Figura 34. Distribución de agua almacenada por hoya de captación. ....	119
Figura 35. Dimensionamiento de Hoya de captación.....	123
Figura 36. Bordo en contrapeso de la hoya de captación. ....	124



---

Figura 37. Tubería de salida para abastecer PFC.....	125
Figura 38. Diseño del SCALL.....	127
Figura 39. Diagrama de las etapas a desarrollar para implementar PFC.....	128
Figura 40. Áreas potenciales para PFC con pendientes de 0-15% en la Sierra Purépecha del Estado de Michoacán (Muñoz, Saenz, García, Coria, & Muñoz, 2015).....	131
Figura 41. Espaciamiento tresbolillo, para la PFC.....	133
Figura 42. Espaciamiento tresbolillo para planta y terrazas individuales. ....	135



## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue diseñar un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL), considerando el manejo del suelo y del agua para la implementación de una Plantación Forestal Comercial (PFC) en la localidad de San Felipe de los Herreros, en el estado de Michoacán. Para lograr dicho objetivo fue necesario realizar el balance hídrico de la zona en estudio, a la par de identificar las características físicas y químicas del suelo a través de un perfil edafológico que permitió establecer la dinámica del agua en el suelo; además al existir una demanda de agua por la PFC fue necesario calcular un consumo semanal de la especie seleccionada. Los criterios de dimensionamiento, referencia espacial del SCALL y de la PFC se basaron en el Diseño Hidrológico de Terreno y en los principios de Permacultura, con la finalidad de optimizar los recursos del suelo y agua. Los resultados muestran una disponibilidad hídrica en la zona de estudio de 524.64 mm, una precipitación media anual de 1,264.60 mm y una evapotranspiración de 739.96 mm, identificando que los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre presentan un déficit hídrico y en este periodo se utilizará el volumen captado por la hoya para el riego de la PFC. El área de captación tiene una extensión de 9,488.25 m<sup>2</sup> y las características físicas del suelo le confieren un coeficiente de escurrimiento de 15%, lo cual garantizará un volumen de agua de 550,000 litros requeridos en la hoya de captación para satisfacer la demanda. Este volumen abastecerá por gravedad a 5,509 *Pinus pseudostrobus* Lindl, administrando una dotación semanal de 5 litros/árbol. El espaciamiento de los árboles y de las terrazas de cada uno de ellos será a tresbolillo. Las terrazas individuales como medida de conservación del suelo, disminuirán en un 10% el potencial de erosión presente en la poligonal.

**Palabras clave:** Sistemas de captación de agua de lluvia, plantaciones forestales comerciales, balance hídrico y suelo.



## ABSTRACT

The objective of this research was to design a rainwater harvesting system (RHS), through soil and water management in order to implement a Commercial Forest Plantation (CFP) at the location of San Felipe de los Herreros in the Mexican State of Michoacán. To achieve this objective, it was necessary to make a hydric balance of the study zone, and to identify the physical and chemical soil characteristics, through an edaphological profile that enabled the establishment of water dynamics in the soil; furthermore, because the commercial forest plantation water demand, it was necessary to set up a weekly uptake for the selected species. The sizing criteria, the spatial reference of the RHS and the CFP were based on the hydrological design of the site and on the permaculture principles, in the aim of optimizing soil and water resources. Results showed a hydric availability in the study zone of 524.64 mm, an annual average precipitation of 1,264.60 mm, and an evapotranspiration of 739.96 mm. January, February, March, April, May, November, and December present a hydric deficit, so the stored water in the reservoir hole will be used for the irrigation of the CFP. The captation area has an extension of 9,488.25 m<sup>2</sup>, and the soil physical characteristics confer a water runoff coefficient of 15%, which will guarantee a water volume of 550,000 liters that are required in the reservoir hole to satisfy the demand. This volume will supply water to 5,509 *Pinus pseudostrobus* trees by gravity, providing a weekly quantity of 5 liters/tree. Spacing between trees and terraces for each of them, will be in a staggered pattern. Individual terraces, as a measure of soil conservation, will decrease in 10% the current polygonal erosion potential.

**Keywords:** Rainwater harvesting systems, commercial forest plantations, hydric balance and soil



## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad está basado en sistemas y modelos económicos, los cuales están sustentados en el uso y explotación de los recursos naturales, dichos recursos son la principal fuente de materias primas utilizadas en los procesos productivos, obteniendo los bienes y servicios para garantizar la demanda de la población.

El aprovechamiento de los recursos naturales se realizaba con la creencia de que eran inagotables, por lo que conforme al desarrollo de nuevas tecnologías, se aumentó la capacidad para transformar la naturaleza, rebasando la capacidad de recuperación natural de los ciclos químico-biológicos de los recursos renovables aprovechados (Hernández & Torres, 2005).

En este sentido, el agua es uno de los recursos naturales que mayor importancia tiene para la sociedad y el medio ambiente, ya que es un elemento necesario para el funcionamiento de los ecosistemas, la supervivencia de la población y la producción agropecuaria e industrial (Ávila, 1996).

De acuerdo con lo anterior, a la necesidad o petición de agua se denomina demanda; conforme exista un aumento de población, coexistirá un incremento de la demanda de agua; para la satisfacción de las necesidades humanas, como alimento, uso doméstico, usos industriales, recreación, entre otras. Esta demanda es cada vez mayor y genera conflictos sociales por disposición de agua en cantidades suficientes y de manera oportuna (Benitez, 2013).

Actualmente la disponibilidad del vital líquido se encuentra limitado debido a factores como el crecimiento demográfico, acuíferos sobreexplotados, contaminación de cuerpos de agua, condiciones climatológicas y topográficas que condicionan que el ciclo hidrológico se mantenga constante y en equilibrio dinámico.



De acuerdo con Herrera (2010) la captación de agua de lluvia constituye un método opcional para el suministro de agua, que puede ser muy útil en comunidades marginadas del país que no cuentan con acceso a fuentes superficiales cercanas, y donde el nivel freático de las aguas subterráneas sea muy bajo. Por ello es importante considerar la precipitaciones pluviales en los sitios donde se pretenda implementar sistemas de captación, ya que en base a la cantidad de agua precipitable se garantizará la captación, almacenamiento y abastecimiento de agua para la población potencialmente beneficiada; y además recomienda aprovechar la captación de agua de lluvia en todas las zonas pobladas aunque exista un sistema de abastecimiento; considerando de esta manera a la captación de agua como un sistema alternativo o complementario de distribución de agua.

En el Municipio de Charapan del Estado de Michoacán ante la baja disponibilidad y pocas fuentes de abastecimiento de agua en algunas localidades como en San Felipe de los Herreros, parte de la población ha adoptado los sistemas de captación de agua de lluvia para cubrir la demanda de sus actividades. Siguiendo esta línea, dentro de estas actividades humanas se encuentran las del rubro forestal, en donde las plantaciones forestales comerciales son una alternativa viable, debido a que el Estado y el Municipio son zonas potenciales y prioritarias dentro del Programa Nacional Forestal (PRONAFOR) para el establecimiento de dichas plantaciones (CONAFOR, 2015).

En el municipio antes mencionado es posible establecer el siguiente binomio, por un lado los sistemas de captación de agua de lluvia y, por el otro las plantaciones forestales comerciales. Cuando el agua almacenada por el sistema de captación de agua de lluvia es aprovechado para dichas plantaciones se establece una relación entre estos componentes; por lo que uno de los objetivos de esta investigación es diseñar un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) para que este sea eficiente, tanto en el recurso captado, posteriormente transportado, almacenado, y finalmente utilizado o distribuido para ser aprovechado de manera óptima y eficaz para el fin proyectado, en este caso la plantación forestal comercial a implementar en la localidad de San Felipe de los Herreros, en Charapan, Michoacán.



Para poder fundamentar teóricamente el presente trabajo se contemplaron los siguientes ejes temáticos: sistemas de captación de agua de lluvia y plantaciones forestales comerciales.

Para llevar a cabo la presente investigación, se utilizó una encuesta basada en el índice de la prosperidad del agua, aplicadas a 50 familias para identificar los componentes de acceso, ambiente y uso. Se realizó un balance hídrico para cuantificar la disponibilidad del recurso y así relacionarlo con el diseño del SCALL y de la plantación forestal. Se llevó a cabo un muestreo de agua tomando en cuenta los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-127-SSA1-1994. Para identificar las características físicas y químicas del suelo, las cuales son relevantes para el presente trabajo, se reguló el perfil ejecutado con la NOM-021-RECNAT-2000. Finalmente, para seleccionar el método de diseño para SCALL se consideró el diseño hidrológico del terreno (KEYLINE) en combinación con los principios de permacultura.



## 2. ANTECEDENTES

Ávila (1996) menciona que una manera de satisfacer las necesidades de agua durante el año y lograr una mayor autosuficiencia en el abasto de la población, ha sido a través de estrategias de uso y manejo diversificado del recurso, que consiste en aprovechar y combinar estacionalmente todas las fuentes de abastecimiento disponibles durante el año en la meseta purépecha (agua de lluvia, manantiales y norias).

Dicha autora menciona que la explotación forestal es uno de los factores que potencializan la escasez de agua de la localidad de San Felipe de los Herreros, en donde existe una disputa de linderos con la localidad de Nurío (1540 has) y con Pomacuarán (1184 has).

Como estrategia para solventar la escasez de agua, se realizaron varias perforaciones de pozos y sus resultados fueron negativos debido a la complejidad geohidrológica regional. Esto propició que se adoptaran soluciones de tipo macro como los sistemas intercomunales de agua potable, los cuales consisten en abastecer con una sola fuente a varias localidades a la vez, sin importar distancia y desniveles topográficos por vencer.

En el municipio de Cherán se diseñó y construyó un SCALL, este sistema surge como una alternativa viable para aumentar la dotación de agua, con un costo de mantenimiento y operación reducido, bajo una propuesta de modelo comunitario para la captación y almacenamiento de agua de lluvia. Se analizaron dos alternativas de diseño, eligiendo la opción técnica y económica factible para el proyecto; además de considerar las propiedades del suelo, taludes e infiltración del agua de lluvia. El uso del agua captada es destinada para el suministro de agua purificada envasada en garrafones para los habitantes de la localidad (Cervantes, Hernández, Córdova, Vázquez, & Hernández, 2014). El sistema está integrado por una área de captación de 20 000 m<sup>2</sup>, un sedimentador, una hoya de almacenamiento de agua con un volumen de 19700 m<sup>3</sup>, una línea de tubería que



conduce el agua de la hoya, al tanque de regularización, y de éste se deriva una toma alterna para alimentar la planta purificadora que genera una producción aproximada de 1000 garrafones diarios para consumo diario (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2016).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua con el apoyo técnico de la Universidad Autónoma de Zacatecas y el financiamiento de la Fundación Gonzalo Río Arronte, ha transferido sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia en el municipio de Pátzcuaro, tomando en cuenta la baja disponibilidad del recurso hídrico, la alta precipitación registrada en la zona; además de localidades en las que el acceso fisiográfico es complicado, en donde las fuentes para obtener el vital líquido dependen de acarreo o compra de agua embotellada. Los modelos de diseño e implementación se basaron en modelos comunitarios de captación y aprovechamiento de agua de lluvia a escala vivienda y comunidad (Rivero, Gómez, & Barrios, 2010).

Dentro del proyecto de recuperación del lago de Pátzcuaro ejecutado por el IMTA las estrategias implementadas en el territorio fueron: sistemas de captación de agua de lluvia para escuelas rurales, un proyecto piloto de sistemas de captación de agua de lluvia para riego y, finalmente prácticas y obras para la repoblación forestal y conservación de suelos (IMTA, 2016).

De acuerdo con Rivas, Oballos, Ochoa y Santiago (2005) la captación de agua de lluvia en los bosques permite la recarga de los acuíferos y da continuidad a los volúmenes de agua de ríos y lagos, fomentando el equilibrio en el ciclo hidrológico, por lo cual resulta relevante la implementación en zonas rurales debido a que favorece el abastecimiento hidrológico en las plantaciones forestales.

La intercepción pluvial registrada en pinos de 18 cm de diámetro y 12 m de altura localizados en la cuenca hidrográfica de Cointzio, presentaron una captación hasta de 250 litros por evento de 25 mm de lluvia (Díaz & Gómez Tagle, 2012).



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Sistemas de Captación de Agua de Lluvia

El agua es un recurso natural vital que abunda en el planeta, la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1386 billones de  $\text{hm}^3$ , alrededor del 97.5% es salada y solo el 2.5 % es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano por que se encuentra en forma de nieve, glaciares y hielo (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2014).

Sin embargo, a pesar de su abundancia el vital líquido actualmente presenta una escasez y contaminación significativa, derivada de las actividades antropogénicas que ha generado daños de modo directo con el vertido de residuos industriales y de granjas, el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos en las tierras colindantes con los ríos, lagos u océanos; generando grandes daños evidentes que producen contaminación del agua y un deterioro significativo al medio ambiente, colaborando con el efecto invernadero que incide en el planeta actualmente.

Por tal motivo, teniendo en cuenta que una de las principales problemáticas del país es la falta de agua, surgen proyectos que coadyuvan a minimizar el impacto ambiental y a solventar las necesidades humanas con la captación, recolección y almacenamiento del agua de lluvia.

##### 3.1.1 Antecedentes

La falsa creencia de que el agua es un recurso ilimitado generó en el pasado la convicción de que se trata de un bien de carácter prácticamente inagotable y que no es preciso gestionarlo. Sin embargo, la realidad es que actualmente la sociedad se está enfrentando a un problema creciente de escasez de agua potable. Por otra parte, existen grandes pérdidas durante su transporte hasta los puntos de almacenamiento y consumo, demostrando la baja eficiencia de operación de los



sistemas tradicionales. En la actualidad el agua está considerada un recurso económico con el mismo valor que puedan tener las principales materias primas, y cada día está más extendida la convicción de que, como tal debe administrarse de la manera más racional posible.

Teniendo en cuenta que el agua constituye un factor de primer orden en el desarrollo de las actividades del ser humano y es el recurso más abundante a nivel global, a pesar de ello el agua es considerada un bien escaso en muchas zonas del planeta y la conveniencia de economizar y racionalizar su uso implica la necesidad e incluso la urgencia, de establecer sistemas de gestión sensatos del vital líquido. Esta gestión racional comienza con el nivel más elemental, el doméstico, y alcanza los niveles más complejos como la planificación de infraestructura para abastecer de agua a un país, por lo tanto se considera relevante la necesidad de implementar sistemas que favorezcan un aprovechamiento óptimo; en este sentido una alternativa viable es la implementación de sistemas para captar, recolectar y almacenar agua de lluvia.

Desde tiempos remotos la humanidad en la búsqueda de solventar los problemas de escasez de agua o la mala calidad de ésta, y ante la inminente demanda del líquido, ha implementado métodos y mecanismos para mitigar y resolver esta problemática, uno de estos métodos ha sido la cosecha de agua pluvial. Los factores asociados a la implementación de estos sistemas son la falta de sistemas de abastecimiento tradicionales de abasto de agua o la existencia de sistemas establecidos con operatividades deficientes, cuando no se dispone de recursos económicos para invertir, la calidad de agua de las posibles fuentes de abastecimiento es baja regularmente asociado a la contaminación por actividades antropogénicas, disponibilidad de agua baja en fuentes subterráneas o superficiales, prácticas culturales y la legislación vigente de cada zona.

La captación de agua de lluvia es un sistema tan antiguo de abastecimiento de agua de lluvia que perdió importancia a partir del rápido crecimiento de las



ciudades, y fue potencializado cuando los avances tecnológicos permitieron introducir el agua por medio de tuberías a los domicilios (Herrera, 2010).

De acuerdo con Ballén, Galarza y Ortiz (2006) civilizaciones de distintas culturas han utilizado esta técnica a través del tiempo, los ejemplos más antiguos pertenecen al continente Asiático, en el desierto de Negev, en donde los sistemas consistían en el desmonte de lomeríos para aumentar el escurrimiento superficial que era dirigido a predios agrícolas en las zonas bajas.

En los años 8000 a 400 a.C. en el oriente del actual Jericó, los habitantes practicaban el manejo de escurrimientos pluviales, los cuales permitían el cultivo de trigo y la cebada. Por otro lado en el continente Europeo, esta práctica fue implementada por primera vez en el imperio Romano, mediante el uso de presas de tierra y de mampostería para almacenar escurrimiento superficial (Anaya, 2011).

La ciudad de Roma en el transcurso de los siglos III y IV a.C. en su mayoría estaba diseñada con viviendas unifamiliares denominadas “La Domus” que contaban con un espacio principal a cielo abierto “Atrio”, en él se instalaba un estanque central para recoger el agua de lluvia llamado “Impluvium” en donde el agua entraba por un orificio en el techo llamado “Compluvim” (Sámamo, 2015).

En México, desde la época prehispánica se tenían obras hidráulicas para el almacenamiento, transporte y distribución del agua, y sistemas hidráulicos utilizados para el regadío o para la conducción del agua de consumo humano. Cabe mencionar que en esta época tenían una forma de nombrar a la tecnología hidráulica utilizada en la captación y almacenamiento del agua de lluvia, los vocablos jagüey o estanque eran denominados como “amanalli”, que se traduce como alberca o estanque de agua y tienen su raíz en mana que es poner, colocar, detener. Además, “atecochtli” y “atatactli” que tienen las raíces en “tecochtli”, que quiere decir sepultura, fosa, hoyo, cavidad, barranca, y “tataca” que se interpreta como rascar o cavar la tierra, estos vocablos sugieren una represa construida mediante una excavación sobre un curso de agua (permanente o temporal), los



cuales cumplen la función de almacenar agua, y más probablemente de lluvia (Galindo, Palerm, Tovar, & Rodarte, 2008).

La recolección y el almacenamiento de agua de lluvia, fueron prácticas comunes en Mesoamérica, generalmente en recipientes, depósitos subterráneos o a cielo abierto. El agua se captaba mediante canales y zanjas, recolectando el agua en patios de casas o en el campo en jagüeyes, bordos o conduciéndola desde los techos de las viviendas y edificios por medio de canoas o canjilones de madera, pencas o canalitos, a los depósitos. En las viviendas el agua se almacenó en recipientes de barro, enterrados o no, así como en piletas o pilas (CONAGUA, 2014).

En la península de Yucatán los Mayas aprovecharon la formación de los cenotes y de cuevas de formación natural para captar y almacenar agua de lluvia (Herrera, 2010).

Los estudios de la captación de agua de lluvia son más comunes a nivel mundial, en algunos países como Australia, Japón, Corea, Nigeria, Nueva Zelanda, Brasil y China, se han realizado estudios sobre el balance del promedio de agua captada en superficies, relacionándolo con los niveles medios reportados en diversas zonas y haciendo estudios para introducir sistemas de captación para el ahorro del agua (Rojas, Gallardo, & Martínez, 2012).

### **3.1.2 Situación actual de los SCALL en México.**

En América Latina, países como Brasil, Honduras, Nicaragua y México, han promovido los SCALL como una herramienta de gran valía para el abasto de agua de calidad y cantidad para diversos fines, pero principalmente para el consumo humano tanto en zonas rurales como urbanas (León, 2012).

En México a partir del año 2003 y debido a la necesidad de la creación de programas de captación de agua de lluvia para satisfacer la demanda hídrica, el



Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del agua de Lluvia (CIDECALLI) con el apoyo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación de México (SAGARPA), con el objetivo de generar y transferir tecnologías sobre sistemas de captación y aprovechamiento eficiente del agua de lluvia a nivel familiar y comunitario, han implementado cinco diferentes sistemas de captación de agua de lluvia los cuales ha denominado COLPOS, y todos ellos a excepción del prototipo COLPOS 3, están diseñados para prestar servicios a una sola familia (Herrera, 2010).

### **3.1.3 Legislación aplicable a SCALL en México.**

La captación de agua de lluvia en México es un tema incipiente en cuanto a una estructura legal definida tanto a nivel federal, estatal y municipal, a diferencia de otros países como Malasia en donde el gobierno federal promueve desde el año 2009 los SCALL (Ern, Mokhtar, Mohd, Abdul, & Badusah, 2016) o países como Estados Unidos de América, Bangladesh, Corea, Japón y Australia (Thomas, Kirisits, Lye, & Kinney, 2014) donde el fomento y el uso de sistemas de captación tienen un desarrollo con mayor longevidad y sus políticas sociales, tecnológicas y de sustentabilidad buscan la implementación y desarrollo de los sistemas como medidas para resolver el cambio climático, la escasez y disponibilidad de agua.

#### **3.1.3.1 Legislación Federal.**

A nivel federal se puede concluir que no existen leyes que regulen la cosecha de agua de lluvia, sin embargo ya existen propuestas, estrategias y lineamientos establecidos en diversos programas que tienen su fundamento en el Plan Nacional de Desarrollo y en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, con la finalidad de establecer una alternativa para los problemas de abastecimiento de agua en zonas rurales y urbanas, propiciar infiltración al suelo para recargar acuíferos, y la captación de agua de lluvia en zonas con vocación forestal entre otros objetivos.



Al respecto, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 4 indica que “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para su consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2016). Este artículo marca el eje del recurso natural agua en el país y jerárquicamente es el de mayor rango por tener su origen en la carta magna, posteriormente se enumeran en las leyes y programas referentes a la cosecha de agua de lluvia.

En la propia Constitución, el artículo 27 denota que las tierras y aguas que se encuentran dentro del territorio nacional, corresponden a la nación, por lo tanto la Ley de aguas nacionales se encarga de reglamentar dicho artículo y tiene como objetivo “regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo sustentable” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2016). Las disposiciones son aplicables a todas las aguas nacionales y del subsuelo; sin embargo los términos de gestión de agua y sustentabilidad, no son citados en este artículo si no en las leyes o programas que emanan de ellas.

Por otro lado, la Ley de Aguas Nacionales (2016) está sustentada legalmente en los artículos previamente citados, y la institución que se encargará de ejecutar dicha ley es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), sin embargo en cuestión de cosecha de agua de lluvia aún no hay ninguna referencia en algún artículo de la ley. Se tienen aspectos relevantes a las condicionantes del uso del recurso, cuando se dispone a otorgar una concesión o asignación denotadas en el artículo 22, las cuales priorizan el uso doméstico y el uso público urbano a cualquier otro uso, se privilegiarán propuestas que garanticen el uso racional, el reúso y la restauración del recurso hídrico. Si en algún momento los SCALL se sometieran a dicho mecanismo se verían beneficiados por los criterios citados. En el contenido del artículo 28, también se le da continuidad a las prioridades de uso, incluso a zonas



con reserva parcial o total de aguas nacionales y por medio de decreto el poder ejecutivo podrá utilizarlas para los siguientes casos:

- I. Uso doméstico y uso público urbano
- II. Generación de energía eléctrica para servicio público
- III. Garantizar los flujos mínimos para la protección ecológica, incluyendo la conservación o restauración de ecosistemas vitales.

Es importante retomar el contenido de este artículo para poder incidir en la toma de decisiones o investigaciones en los sistemas ambientales debido a su trascendencia y panorama actual del país.

Por otro lado en el artículo 99, la autoridad del agua, proporcionará a solicitud de los inversionistas, concesionarios o asignatarios, los apoyos y la asistencia técnica para la adecuada construcción, operación, conservación, mejoramiento y modernización de las obras hidráulicas y los servicios para su operación; mediante programas específicos que incluyan el manejo eficiente y la conservación del agua y suelo, en colaboración con organizaciones de usuarios. Dichas obras de infraestructura que puede ser administrada como un bien nacional descrito en el artículo 113, son los bordos, zanjas y acueductos financiados por el gobierno federal.

Por otra parte, el Programa Hídrico Nacional (PHN) 2014-2018 es considerado como el documento rector que integra los planes hídricos de las cuencas a nivel nacional, en el cual se definen la disponibilidad, el uso y el aprovechamiento del recurso, así como las estrategias y políticas, para lograr el equilibrio del desarrollo regional sustentable y avanzar en la gestión integrada, logrando la seguridad y sustentabilidad hídrica en México a través de la CONAGUA, organismos de cuenca y consejo de cuenca (PHN, 2014).

Un punto fundamental dentro del PHN 2014-2018 es la comprensión del ciclo hidrológico, en cuanto la disponibilidad o carencia del recurso para poder lograr una



participación social efectiva. Además de promover el pago de servicios ambientales para la conservación de recursos hídricos, en donde los usuarios del agua, recurran a recursos financieros para llevar a cabo las acciones de conservación del agua, el suelo, bosques en las partes altas de la cuenca que favorezcan la recarga de acuíferos y la disminución de la erosión del suelo.

Se identifican algunos problemas que contribuyen al aprovechamiento exhaustivo del agua, como la deforestación de los bosques, cambios de uso de suelo; y en relación al aprovechamiento del agua de lluvia en el PHN 2014-2018 se sugiere realizar acciones para la recarga de acuíferos, a través de zonas de represa y pozos de absorción para infiltrar artificialmente el agua.

Dentro de los objetivo que plantea el PHN 2014-2018, el objetivo 3 busca fortalecer el abastecimiento de agua y acceso a los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, identificando como principal problemática la dispersión de las localidades rurales, por lo que se pretende desarrollar sistemas alternos que abastezcan éstas poblaciones, es ahí donde tiene importancia para el programa la captación de agua pluvial. Se propone el crear nueva infraestructura para el aprovechamiento de nuevas fuentes de abastecimiento y, por lo tanto ampliar y mejorar el uso de tecnologías como la desalinización y cosecha de agua de lluvia.

Paralelamente se incluyen el fomento de la participación de comunidades indígenas en la gestión de recursos hídricos para el desarrollo sustentable y difundir tecnología apropiada de suministro de agua como la captación de lluvia y niebla, cisternas, dispositivos de bombeo, filtración y desinfección.

En una escala individual, se promoverá la cosecha de agua de lluvia en los techos de las viviendas, a través de sencillos sistemas de captación y almacenamiento con el objetivo de satisfacer el uso doméstico; en los casos donde exista factibilidad se apoyarán sistemas colectivos de cosecha de agua de lluvia en el medio rural y urbano para uso doméstico, riego de jardines y sanitario.



Además este programa pretende difundir a través de material didáctico la tecnología apropiada para suministro de agua, incluyendo la captación de agua de lluvia y niebla, cisternas, dispositivos de bombeo, filtración y desinfección a comunidades y familias, con la finalidad de brindar información técnica y los apoyos para la construcción por parte del gobierno federal.

Por otra parte, el Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en zonas rurales (PROCAPTAR) surge en el año 2016 y su origen se fundamenta en la necesidad de dotar de agua a la población rural que presenta problemas técnicos y económicos para ser abastecidos de manera tradicional, siendo la captación de agua de lluvia una alternativa viable de abasto. Dentro de sus objetivos específicos está impulsar el desarrollo social, el acceso al agua y saneamiento de las viviendas de zonas rurales de mayor marginación. Por lo tanto se busca la participación de la sociedad y de esta manera ayudar a abatir la pobreza multidimensional en el ámbito de los servicios básicos.

Las localidades y municipios que estipulan en los lineamientos del programa como elegibles son las que presentan condiciones de alta o muy alta marginación, aquellas que presenten lluvias anuales acumuladas iguales o mayores a 1500 mm anuales y que se encuentren dentro de la estrategia política social, integral y participativa denominada Cruzada Nacional Contra el Hambre, en dichas localidades el apoyo del programa puede ser del 100% para la instalación del SCALL con fines de abasto de agua potable a nivel familiar, siempre y cuando garanticen el abastecimiento de por lo menos 50 litros de agua por persona al día

CONAGUA es la encargada de establecer los lineamientos técnicos para los SCALL con fines de abastecimiento doméstico del programa PROCAPTAR; los cuales definen la metodología de cálculo, especificaciones y características generales que deben cumplir los SCALL a instalar o realizar los cambios pertinentes a los ya existentes incluyendo las futuras reparaciones, mantenimiento u modificaciones aplicables (PROCAPTAR, 2016).



En este sentido, el Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario, Pesquero y Alimentario 2013-2018 (2013) tiene el desafío de incrementar la producción alimentaria a través de una mayor productividad, por lo que en el apartado del recurso hídrico en lo que compete a tecnificación, uso óptimo y sustentable para modernizar e incrementar la superficie de riego y hacer frente a la escasez del agua, propone la cosecha de agua de lluvia a través de infraestructura de captación para promover actividades que propicien la recarga de acuíferos.

Por otra parte, la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2015) es reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la cual tiene por objeto regular y fomentar la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus recursos. En el artículo 27 de dicha ley se incluye al sector femenino del medio rural de los territorios forestales en proyectos relacionados con estufas ahorradoras y plantaciones, componentes forestales para traspatio, cosecha de agua y labores silvícolas.

Así mismo, el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT) 2013-2018 propone diversas estrategias en beneficio del medio ambiente, en la estrategia 5.1 se pretende proteger los ecosistemas y el medio ambiente y reducir los niveles de contaminación en los cuerpos de agua, además se fomentan acciones para la recolección de agua de lluvia, especialmente en zonas urbanas. En lo que respecta a los instrumentos económicos encaminados a la conservación, destaca el Pago por Servicios Ambientales (PSA) a través del cual se otorgan recursos a los propietarios de los terrenos con ecosistemas forestales que generen servicios ambientales, principalmente zonas de captación de agua o por su biodiversidad, para incentivar su protección y evitar el cambio de uso de suelo (Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2014-2018, 2013).



### **3.1.3.2 Legislación estatal.**

En términos generales el marco legal del estado de Michoacán de Ocampo, dista de incluir en sus políticas y programas la captación hídrica como una solución viable a los problemas relacionados con los recursos hídricos.

En este sentido, el Programa Hídrico de Visión 2030 del estado de Michoacán de Ocampo (PHVEMICH) tiene el objetivo de sentar las bases que permitan ordenar el desarrollo estatal en congruencia con la disponibilidad de los recursos hídricos y con relación al crecimiento social y de la economía en torno del agua; por lo que se define como el documento rector de la política hídrica del estado de Michoacán de Ocampo en donde se definen la disponibilidad, uso y aprovechamiento del recurso, así como las estrategias, prioridades y políticas para lograr el equilibrio del desarrollo sustentable en las cuencas y acuíferos del estado y avanzar en la gestión integrada de los recursos hídricos (PHVEMICH, 2009).

Sin embargo en ninguno de sus objetivos o estrategias se proponen los sistemas de captación de agua de lluvia como una solución alterna para el abastecimiento de agua, infiltración artificial o medida de gestión o sustentabilidad del recurso.

Por otro lado, la Ley del Agua y Gestión de Cuencas para el estado de Michoacán de Ocampo (2007) tiene la función de regular la participación de las dependencias y entidades de Administración Pública Estatal y Municipal, así como los sectores privado y social, en la planeación, administración, explotación, uso, aprovechamiento, preservación y recarga de agua, así como los servidores públicos, los estudios, proyectos y obras relacionadas con los recursos hídricos en el marco del desarrollo sustentable del Estado. Se hace mención de los servicios ambientales derivados de las cuencas hidrológicas como la regulación climática, conservación de ciclos de agua, control de la erosión, recarga de acuífero, mantenimiento de los escurrimientos en cantidad y calidad, formación de suelo entre otros.



Dicha Ley considera los recursos forestales y su vínculo con los hídricos para llevar a cabo estos servicios; además traza la gestión integrada del recurso como la base de la política hídrica estatal. A pesar de esto en ninguna línea se contempla aún la cosecha de agua de lluvia como una opción para resolver las problemáticas vigentes en nuestro territorio.

Así mismo, la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable del estado de Michoacán de Ocampo (2007), tiene una relación muy estrecha con los instrumentos o leyes que buscan la gestión del agua en el estado y tienen como finalidad regular y fomentar la conservación, protección, restauración, producción, ordenación, el cultivo, manejo y aprovechamiento forestal. Dentro del artículo 20, se marca como un criterio obligado de dicha política la captación, protección y conservación de los recursos hídricos y la capacidad de recarga de los acuíferos.

Por otro lado, la Ley Ambiental para el Desarrollo Sustentable del estado de Michoacán de Ocampo (2013) tiene como objeto proteger al ambiente, conservar el patrimonio natural y propiciar el desarrollo sustentable del estado. En tanto el capítulo tres referente a las áreas naturales protegidas son catalogadas dentro de esta clasificación las zonas de captación y recarga de mantos acuíferos.

### **3.1.3.3 Legislación Ciudad de México.**

En contraste en la Ciudad de México, la legislación referente a los sistemas de captación de agua de lluvia es específica y con un desarrollo sólido, por lo tanto las leyes y programas tienen como objetivo fortalecer esta alternativa para hacer frente a los problemas graves de disponibilidad y calidad de agua que imperan en su territorio.

En este sentido, la Ley de aguas del Distrito Federal (2011), exige la captación de agua de pluvial en nuevas edificaciones y promueve la implementación de estos sistemas. En el título noveno se publican las disposiciones referentes de la cosecha de agua de lluvia, en el cual el artículo 123 de dicha ley establece la



regulación, promoción, organización de la cosecha de agua de lluvia principalmente para su potabilización y el uso en actividades rurales, urbanas, comerciales e industriales y coordinará la bases para garantizar la participación de los sectores público, privado y social. Con fundamento en el principio de que el agua es para todos los seres vivos presentes y futuros, el artículo 124 otorga el derecho de cosechar agua de lluvia individual y colectivamente, además de reconocer a los cosechadores en un padrón de registro y ser candidatos a obtener incentivos del programa general y de los subprogramas generados para el desarrollo de la captación pluvial.

El artículo 125 menciona la obligatoriedad en todas las nuevas edificaciones que se construyan en el Distrito Federal, de construir las obras e instalar los equipos e instrumentos necesarios para cosechar agua de lluvia. Posteriormente se definen los ejes principales de la Ley redactados en el artículo 126, el cual indica que la cosecha de agua de lluvia debe ser considerada una política prioritaria y, por ende promovida, organizada e incentivada en congruencia con los programas, subprogramas y fondos que de esta Ley se generen.

En el año 2011, la ley de aguas del Distrito Federal sufrió modificaciones, y las referentes a la cosecha de agua de lluvia se redactan en el artículo 125 bis, 125 bis 1 y 125 bis 4, los cuales indican que las construcciones edificadas en la zona I y II (de loma y transición), cerca de zonas boscosas, áreas verdes, barrancas o cualquier cobertura vegetal natural situadas en el Distrito Federal, es obligatorio que cuenten con sistemas de cosecha de agua de lluvia y recarga de aguas pluviales al suelo. Dicha infiltración deberá encausarse a través de diferentes sistemas, como zanjas y pozos de absorción, pisos filtrantes, estacionamientos con pasto o de cualquier material que permita la infiltración del agua de lluvia al subsuelo.

Dentro de la Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal (2011), el principal artículo que hace referencia a los sistemas de captación de agua de lluvia es el Artículo 22, en él los sistemas se consideran como parte de la solución del cambio climático y exige en las nuevas



construcciones su adecuada utilización en la instalación para la captación, tratamiento y aprovechamiento del agua de lluvia; además pretende preservar y aprovechar los recursos hídricos, sugiere la ejecución de sistemas de captación y recargas de agua pluviales al subsuelo, mediante la colocación de zanjas de absorción o cualquier otra tecnología que permita la infiltración. El aprovechamiento de agua de lluvia se propone como una solución alterna del abastecimiento de agua para centros urbanos.

El programa de certificaciones de Edificaciones Sustentables (2012), de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, tiene como finalidad promover la reducción de emisiones contaminantes, el uso eficiente de los recursos naturales en el diseño y operación de edificaciones del Distrito Federal con base a criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental, a través de un esquema de implementación y certificación voluntaria, otorgando incentivos económicos a quienes cumplan con los indicadores de la certificación. En este caso la cosecha y la infiltración de agua de lluvia están incluidos como un criterio de sustentabilidad el cual evalúa la infraestructura construida para este fin.

### **3.1.4 Definición, clasificación y componentes del SCALL.**

Los sistemas de captación de agua de lluvia presentan varios beneficios para la sociedad, ya sea urbana o rural, y pueden ser aplicables en diversos contextos desde el doméstico hasta las grandes industrias.

La captación pluvial se considera como la recolección, transporte y almacenamiento del agua de lluvia que cae sobre una superficie de manera natural o hecha por el ser humano. El agua almacenada puede ser utilizada para satisfacer la necesidad hídrica tanto de los habitantes como de la zona en la que se instale (Adler, Carmona, & Bojalil, 2008).



Por otra parte, para Sámano (2015) un sistema de captación de agua de lluvia constituye un medio para interceptar la precipitación con el objetivo de obtener agua, almacenarla y poder disponer de ella para darle un determinado uso.

La captación de agua de lluvia es considerada como la recolección o cosecha de escorrentía superficial para propósitos de producción agropecuaria y forestal (FAO, 2002). Las prácticas de captación de agua de lluvia, además minimizan el riesgo de erosión hídrica, al disminuir la escorrentía libre del agua sobre los suelos.

De acuerdo con Adler, Carmona y Bojalil (2008) los beneficios de los sistemas de agua pluvial a diferencia de las redes que distribuyen el agua, son los siguientes:

- El agua de lluvia tienen un costo bajo, la única inversión que hay que realizar es en la captación, tratamiento y almacenamiento dependiendo del lugar de instalación, teniendo la amortización garantizada del sistema en un mediano plazo.
- Con este método se paga anualmente menos en cuentas de agua. La poca o nula dureza del agua de lluvia ayuda a aumentar la escala en aplicaciones, extendiendo su uso.
- Los sistemas presentan un fácil mantenimiento en general. El agua de lluvia provee una fuente de agua cuando es temporada de estiaje y la dotación se reduce fuertemente, o cuando hay escasez del agua subterránea.
- El agua de lluvia se recolecta y almacena, lo cual elimina la necesidad de sistemas de distribución costosos y complejos.
- Se logra un gran ahorro de energía, ya que se evita todo el proceso de extracción o entubamiento, el de distribución y bombeo del agua para su transportación, los cuales demandan una gran cantidad de energéticos.
- Tiene un costo mucho menor que el de las redes hidráulicas públicas, tanto en la inversión primaria como en el costo de mantenimiento, reparación y ampliación del sistema de redes.



- No impacta al subsuelo (con la extracción acelerada) ni a los ríos y sus ecosistemas (con el desvío y entubamiento de éstos) ya que su fuente principal viene de la lluvia. Por tanto se mantienen los mantos acuíferos en mejores condiciones al tener una menor necesidad de extracción.

El desarrollo y crecimiento exponencial de la población en el mundo han venido acompañados de un incremento de las necesidades de agua, no sólo en lo que hace referencia al uso industrial y público, sino también al doméstico. El agua constituye el principal elemento que interviene en la higiene corporal y doméstica, por lo que, en países industrializados, el bienestar requiere garantizar un abastecimiento ilimitado y fácil de agua.

El incremento de la población ha generado mayor consumo de agua, lo que conlleva a implementar sistemas de tuberías para el traslado del agua a los hogares, sobreexplotando las superficies de agua dulce o acuíferos generando grandes costos e impacto ambiental.

La demanda de agua de la población ha generado nuevos métodos que se enfocan en soluciones de menor costo, que utilicen los recursos disponibles y además reduzcan los impactos al medio ambiente. Como una alternativa para minimizar el impacto ambiental y los altos costos, se han implementado sistemas de captación de agua de lluvia.

Dichos sistemas se han clasificado de acuerdo a las necesidades antropogénicas, por las zonas en las que es necesario abastecer de agua y por las actividades en las que se pretende aprovechar el agua captada.

Al respecto, Herrera (2010) afirma que los SCALL también pueden clasificarse por su uso en sistemas para uso humano, sistemas para uso agrícola y ganadero, recarga de mantos acuíferos y captación de agua de niebla.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) menciona que se puede manejar como técnicas para captar agua de lluvia



para el aprovechamiento de producción de plantas, que usan el suelo para almacenar el agua (FAO, 2002). Por lo tanto se pueden agrupar en:

- Captación de agua en rampas pequeñas (Microcaptación o captación de microcuencas)
- Captación de agua en rampas largas (Captación externa o captación de macrocuencas)
- Captación de agua de inundaciones dentro del cauce (Corrientes efímeras)
- Derivación de corrientes para control de inundaciones (de corrientes efímeras a otro lugar)

Los sistemas de cosecha de agua de lluvia pueden ser clasificados como activos y pasivos. Los sistemas activos son aquellos que recolectan la lluvia, la filtran y la almacenan para reusarla (componentes: tanques, cisternas, bombas y filtros). Los sistemas pasivos son aquellos que no tienen componentes mecánicos para recolectar, limpiar y almacenar el agua, la idea principal de estos sistemas es recolectar el agua en zonas específicas en la topografía para que pueda ser absorbida por el suelo de forma natural (Kinkade-Levario, 2007).

De acuerdo con Galindo et al. (2008), para mantener la operatividad óptima en los sistemas de captación de agua de lluvia en zonas rurales es necesario vigilar la operación del sistema, hacer recorridos constantes de campo, fotografías y cartas topográficas. Para lograr lo anterior mencionan algunos componentes necesarios dentro de los SCALL los cuales son:

- Zona de captación: en las que se integra por laderas de cerros cubiertos de vegetación.
- Obras de conducción: donde se clasifican en dos tipos, naturales o lechos de arroyos secos y superficiales que son hechos por los pobladores locales, la finalidad es concentrar y transportar la escorrentía hacia un solo punto.
- Jagüey u obra de almacenamiento el cual se localiza sobre lechos de arroyos secos, su forma, tamaño y material de construcción son variables.



Por otra parte, Kinkade-Levario (2007) clasifica los componentes de un sistema de captación de agua de lluvia en: *captación, transporte, filtración, almacenaje, distribución y purificación.*

- 1 En la *captación* se refiere a la superficie donde la lluvia cae, la cual puede ser un techo o superficie impermeable en el pavimento.
- 2 El *transporte* es en el que se requieren los artefactos que conducen el agua desde la superficie hasta el sistema de almacenamiento.
- 3 El filtrado permite que no entren contaminantes o basura al área de almacenaje.
- 4 El *sistema de almacenaje* en donde se retiene el agua por medio de tanques o cisternas.
- 5 La *distribución* abastece el agua cuando es requerida, mediante equipos de bombeo o gravedad.
- 6 El *sistema de purificación* filtra y desinfecta el agua para el consumo humano.

Al respecto, Herrera (2010) menciona algunos componentes de los SCALL, los cuales son:

- 1) El área de captación en la que se requiere de un techo con lámina galvanizada ya que ésta presenta una superficie lisa de fácil escurrimiento y efecto esterilizante debido al calentamiento del metal por el sol;
- 2) Recolección y conducción, cuyo material puede ser aluminio, bambú, madera, PVC o lámina galvanizada. Éste material debe ser liviano, resistente a la corrosión y fácil de unirse entre sí;
- 3) Interceptor o filtro, cuyo objetivo es separar un sólido del líquido en el que está suspendido, para evitar la contaminación del agua almacenada;
- 4) Almacenamiento, cuya finalidad es mantener el agua durante una temporada en la que es requerida y puede ser guardada en tanques o cisternas;
- 5) Bombeo, el cual se realiza para la distribución del agua captada para los servicios requeridos, sin embargo se requiere de energía.



Teniendo en cuenta que en diversas zonas la cantidad de energía es escasa, dificulta la distribución óptima del agua, en este sentido se pueden elaborar bombas manuales que se construyen con tuberías de material específico.

En lo que respecta al abastecimiento de agua para consumo humano, Anaya (1998) menciona en un “programa piloto de abastecimiento de agua potable a comunidades rurales por medio de captación de agua de lluvia en los techos de las viviendas y almacenamiento de cisternas” desarrollados en distintas regiones, es necesario considerar las siguientes características para los sistemas de captación de agua de lluvia:

- Área de captación (techumbres) en las cuales se emplean tejas y lámina galvanizada acanalada.
- Conducción lateral perimetral la cual consiste en una canaleta de lámina galvanizada cuyas medidas dependerán del área de captación.
- Conducción vertical de PVC en la que se utiliza una tubería hidráulica de PVC.
- Distribución consiste en una tubería con dimensiones específicas en las que se utiliza una llave de nariz.

### **3.1.5 Diseño de un SCALL**

Para llevar a cabo el diseño de un SCALL es necesario contemplar diversos aspectos como: las condiciones de la zona donde se tiene planeado implementar el proyecto, los componentes que favorecen la operatividad del sistema, así como el objetivo para el cual fue diseñado. Para ello se abordarán diversas técnicas y métodos que coadyuven al diseño del SCALL.

En este sentido, el método de la Línea Clave o Keyline permite diseñar y manejar el patrón de laboreo de suelo de una manera tal que favorece la captación y almacenamiento del agua de lluvia sobre el terreno, lo que hace posible maximizar el recurso hídrico y mejorar las condiciones de profundidad y fertilidad de suelo. Esta técnica se origina de un sistema que tiene como objetivo el manejo del suelo



con un enfoque holístico, desarrollado en los años 50's del siglo pasado por P. A. Yeomans en Australia (Cortés & Ramírez, 2013).

Por otro lado, las técnicas de captación de agua de lluvia se clasifican en tres categorías básicas:

1. *Microcaptaciones o captación dentro del sistema* (FAO, 1990), se define por las siguientes características: la captación de flujo superficial para distancias cortas del área escorrentía; la longitud del área de captación varía, generalmente entre uno y treinta metros; la escorrentía superficial es almacenada en el perfil del suelo; la relación del área de captación / área de plantas, generalmente es 1:1 a 3:1; normalmente sin previsión para flujos considerables y crecimiento regular de la planta (FAO, 2002).
2. *Sistemas de captación externa* (FAO, 1990), considera los siguientes aspectos: captación de agua de escorrentía superficial y de arroyos; el área de captación generalmente es de treinta a doscientos metros de largo; la relación área de captación / área de plantas es de 2:1 a 10:1; se requiere una vía trazada para desfogar el exceso de agua y las plantas tienen un crecimiento regular, a menos que se nivele el terreno (FAO, 2002).
3. *Sistemas de inundación, derivación y distribución* (FAO, 1990), lo describen de la siguiente manera: captación y aprovechamiento de flujos turbulentos, ya sea por derivación o distribución desde del lecho del curso de agua hacia las tierras del valle; longitud del área de captación de varios kilómetros; relación área de captación / área cultivada superior a 10:1 y una vía preparada para el exceso de agua (FAO, 2002).

La última técnica revisada es el concepto de permacultura, el cual parte de un sistema integrado y evolutivo de especies vegetales y animales sustentables útiles para el hombre, trabajando con principios éticos y respetando la naturaleza para obtener los recursos de manera más eficiente y con la menor energía posible, este concepto lo acuñan Mollison y Holmgren por primera vez en 1978 (Caballero & Montes, 1997). David Holmgren propone una evolución conceptual al creado en



1978 con Mollison, en el cual la permacultura es el instrumento para una transición productiva de la sociedad industrial de alto consumo energético, a una civilización sostenible, donde los recursos naturales y la energía serán cada vez más escasos, por lo cual propone doce principios de diseño que rigen la permacultura para enfrentar los desafíos globales (Holmgren, 2014):

1. Observar e interactuar
2. Captar y almacenar energía
3. Obtener un rendimiento
4. Aplicar auto regulación y aceptar retroalimentación
5. Usar y valorar los recursos y servicios renovables
6. No producir desperdicios
7. Diseñar desde los patrones a los detalles
8. Integrar más que segregar
9. Utilizar soluciones lentas y pequeñas
10. Usar y valorar la diversidad
11. Usar los bordes y valorar lo marginal
12. Usar y responder creativamente al cambio

### **3.1.5.1 Análisis de los SCALL**

Una de las principales funciones del análisis es determinar en qué medida se están consiguiendo los objetivos o metas planteadas al momento de llevar a cabo cualquier proyecto.

Al respecto, Anaya (1998) menciona la importancia de realizar estudios en los sistemas de captación de agua de lluvia para identificar si se cumple con los objetivos establecidos, tomando en cuenta que las evaluaciones de seguimiento durante los ciclos de cultivo y actividades colaterales son significativas, así como al término de cada proyecto.



Independientemente del objetivo de la evaluación, se deberá analizar el proyecto desde el punto de vista de su relevancia respecto a las prioridades y necesidades del grupo objetivo y de los beneficiarios, sus efectos, impactos y eficiencia (Roukonen, 1994).

El análisis de sistemas de captación de agua de lluvia se pueden dividir en: técnico, económico, social y ambiental.

En este apartado se deberán de analizar situaciones desde dos escenarios, en donde se contemple el problema a solucionar sin proyecto que ayude a mitigar dicha situación y, un segundo escenario donde se defina el mismo problema pero con un proyecto específico que teóricamente facilitará a resolver la problemática fundamentada.

Este análisis, ayudará a cimentar una base para ejecutar una inversión inteligente, dicha base deberá ser precisamente un proyecto bien estructurado y evaluado (Baizabal, 2006).

Es recomendable realizar un análisis de oferta y demanda del servicio; es normal que con la ejecución de un proyecto la demanda tienda a aumentar, por lo que representa un beneficio (Baizabal, 2006).

Para el análisis de la oferta para proyectos sociales y de infraestructura, se deben de establecer las condiciones de la oferta existente, debido a que los costos de producción dependen de las condiciones físicas y de operación. Cuando se analiza una situación de un proyecto es necesario realizar una descripción de las características físicas y operativas.

### **3.1.5.2 Topografía.**

Aprovechar corrientes intermitentes, acondicionar el terreno con un bordo en forma de media luna o rectangular, para captar agua en un terreno de ladera con pendiente uniforme o realizar una excavación para coleccionar volúmenes de agua con



pendientes muy ligera, son tan solo algunos criterios de diseño para hoyas de captación, en donde se puede apreciar que las características topográficas del terreno juegan un rol principal en el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia (Domínguez, 2009).

### 3.1.5.3 Balance Hídrico.

El balance hídrico, es el equilibrio de todos los recursos hídricos que ingresan y que salen del sistema en un intervalo de tiempo determinado (Jofré et al., 2013).

Sirve para determinar el agua disponible. Para realizar el balance se requieren los datos de precipitación y los consumos de agua de las plantaciones consideradas, posteriormente se determina si hay necesidad de agua de riego o la implementación de obras de captación de agua de lluvia, para lo cual se deben analizar excesos o deficiencias de agua por medio del balance hídrico.

De manera general, las entradas comprenden la precipitación realmente recibida en la superficie del suelo (P), las aguas superficiales y subsuperficiales recibidas dentro de la cuenca (Q). Las salidas incluyen la evaporación y transpiración (ET), la salida de las aguas superficiales en forma de escorrentía (ES), y las aguas subterráneas (ST) definiéndose la siguiente ecuación del balance hídrico para cualquier zona o cuenca (FAO, 2000):

$$P + Q = ET + ES + ST \quad (1)$$

Para su aplicación, la ecuación podrá simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, el objetivo del cálculo y las dimensiones de la masa de agua. La ecuación simplificada del balance hídrico es:

$$P = ET + ES \quad (2)$$



#### **3.1.5.4 La interacción del suelo-agua y la influencia en los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia en suelos Andosoles.**

Cuando el agua entra en el suelo, ésta actúa como medio de transporte de nutrientes, contaminantes, compuestos orgánicos, que al moverse por el suelo interactúan con éste, para propiciarle diversas características como fertilidad, humedad, temperatura, textura, estructura; por lo que es preponderante conocer la dinámica del agua en el suelo para tratar de entender los procesos resultantes de esta relación (Jordan, 2005).

Las fuentes que dan origen al agua en el suelo, son el resultado de la precipitación y agua freática principalmente. Una vez en el suelo el agua puede ser clasificada en: gravitacional de escorrentía y retenida. El agua de escorrentía depende de la topografía y de la capacidad del suelo para saturarse, además de no permitir la infiltración; en el caso del agua gravitacional, es la que se infiltra por la acción de la gravedad a través de los macroporos y mesoporos. Y por último el agua retenida en los mesoporos y microporos donde la fuerza de gravedad es menor a las fuerzas capilares.

Según el IUSS Grupo de trabajo WRB (2014), los Andosoles (An) son los suelos en donde la química del Hierro (Fe) y/o Aluminio, le confieren características que juegan un rol principal en su formación; la cual le confiere una de las GSR de la base referencial del sistema de clasificación mencionado. Los nombres comunes internacionales son Andosoles (FAO-UNESCO-ISRIC), Andisoles (USDA, Soil Taxonomy).

El origen de la palabra tiene una connotación de origen japonés, an: oscuro y do: suelo, que se puede interpretar como suelos oscuros. El material parental son vidrios y productos derivados de erupciones volcánicas (cenizas, tufa y pómez entre otros) u otro material rico en silicatos bajo una meteorización acida en climas húmedos.



Son generalmente de colores oscuros y tienen alta capacidad de retención de humedad, si presentan alófanos o complejos de aluminio en los primeros 30 cm de profundidad, muestran generalmente valores superiores a 3.0% de carbono orgánico, se erosionan rápidamente por deforestación y remoción de raíces; son suelos ligeros, de consistencia resbaladiza y untuosa, llegando a términos tixotrópicos cuando se friccionan con los dedos (INEGI, 2015).

Los ecosistemas favorables son regiones montañosas a onduladas, húmedas y regiones árticas a tropicales con un amplio rango de vegetaciones. Los perfiles de desarrollo son condicionados por la meteorización rápida de vidrios y eyecciones volcánicas tiene como resultado complejos orgánicos-minerales estables o minerales de bajo grado de ordenamiento como alófanos, imogolita y ferrihidrita.

En el centro del país, dentro del eje Neovolcánico se encuentra un suelo dominante derivado de erupciones volcánicas que se denomina suelo Andosol, “polvilla” o “Tupuri”. Presentan propiedades ándicas, resultado de la presencia de materiales amorfos, constituidos de minerales como el alófano, imogolita, ferrihidrita, complejos aluminio-humus o cantidades específicas de vidrio volcánico (Partiff & Clayden, 1991, citado en Alcalá & Gutiérrez, 2001).

Tiene características especiales si se compara con otros suelos, es rico en materia orgánica, muy ácido, retiene el fósforo por el alófano, demasiado permeable y frágil y con alta capacidad de retención de agua (Aguilar, López, Nuñez, & Khalil, 2003).

Por este tipo de relación de los suelos Andosoles y el agua, es importante conocer aspectos de este binomio, para seleccionar los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia adecuados que garanticen un manejo óptimo de los recursos citados.



El área total de los suelos Andosoles en el mundo se estima en 110 millones de hectáreas que tan solo ocupan el 1% de la superficie terrestre y más de la mitad de esta área está situada en los trópicos. Por otro lado, los Andosoles que se originan de otros materiales diferentes a ceniza e inyecciones volcánicas ocurren en regiones húmedas (IUSS Grupo de trabajo WRB, 2014). América central y Sur América contiene entre 35 y 40 millones de hectáreas de suelos Andosoles.

Otra característica es que tienen, generalmente, bajos rendimientos agrícolas debido a la alta fijación de fósforo relacionado con la presencia de aluminio y hierro, por lo que no se encuentra disponible para las plantas. Sin embargo si se manejan esquemas adecuados de fertilización (Aplicaciones calcáreas, sílice, material orgánico y fertilizantes fosfatados) los rendimientos agrícolas pueden elevarse considerablemente. Los Andosoles son fáciles de cultivar y tienen buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua; cuando los Andosoles están fuertemente hidratados son difíciles de labrar por su baja capacidad de carga y adhesividad. Los cultivos asociados a los Andosoles son la caña de azúcar, té, vegetales, trigo, arroz y cultivos hortícolas. Pero indudablemente el uso más favorable para su conservación es el forestal.

### **Distribución de suelos Andosoles en México.**

Los suelos Andosoles se distribuyen en 5 regiones fisiográficas del país (Figura 1), distribuido en 2 475 202.98 hectáreas (INEGI, 2000); pudiéndose enumerar de oeste a este, la Neovolcánica Nayarita, Neovolcánica Tarasca y Mil Cumbres en Michoacán, los Lagos y Volcanes de Anáhuac, Chiconquiaco y la Sierra de los Tuxtlas en Veracruz. La mayor parte de los Andosoles en México están situados sobre depósitos de basalto, andesitas, brechas volcánicas básicas, brechas sedimentarias y estructuras volcanoclásticas.



Los Andosoles mexicanos son frágiles ya que la mayoría están situados en regiones con cambios drásticos en el uso del suelo, por ejemplo bosques de oyamel, pino o incluso mesófilos, que hoy son terrenos agrícolas de regular o baja productividad.



Figura 1. Distribución de Andosoles en la República Mexicana Fuente: Mapa digital de México INEGI

### Características hidrológicas del andosol.

La mayoría de los Andosoles cuentan con un excelente drenaje interno, originado por su alta porosidad; con alta ocurrencia en posiciones altas de terreno. Sin embargo, se pueden desarrollar propiedades gleicas, cuando en el perfil existe un nivel freático somero.

Las características físicas de los Andosoles condicionan las características hidrológicas, por ejemplo una buena estabilidad de los agregados, así como alta permeabilidad al agua le confieren al suelo resistencia a la erosión hídrica. Sin embargo existen algunos Andosoles altamente hidratados que al secarse



drásticamente, el material superficial se desmorona en gránulos duros y son susceptibles a ser removidos por escorrentía superficial.

El contenido de humedad a 1500 KPa punto de marchitez permanente es alto en la mayoría de los Andosoles, por lo que la cantidad de agua disponible es mayor a comparación de otros suelos minerales.

La retención del agua, capacidad de intercambio catiónico, el volumen del suelo y la cohesión de las partículas se ven afectadas por el excesivo secado por aire de los materiales que forman los Andosoles.

Sin embargo, estas características contrastan con las reacciones generadas a los procesos de escurrimiento superficial y del transporte de sólidos. Se esperaría que no existieran elevadas tasas de erosión por la alta capacidad de retención de agua que presentan, pero se pudo observar que en las áreas productivas de estos suelos son productoras de sedimentos y contaminantes (Rivera et al., 2012).

La mayor producción de sedimentos y escorrentía tiene lugar con las lluvias que caen sobre el suelo seco. La hidrofobicidad de los horizontes orgánicos superficiales de los Andosoles, con el suelo seco se genera una elevada escorrentía que arrastra los agregados de la superficie del suelo desnudo, independientemente de la intensidad de lluvia ocurrida (Guerra, Arbelo, Armas, Rodríguez, & Mora, 2003).

Luego de la lenta humectación del suelo, la velocidad de infiltración elevada y la gran capacidad de retención de agua de los Andosoles, condicionan a que la escorrentía sea muy baja y solo se produzca ésta con ocasión de lluvias de alto volumen de agua precipitada (independientemente de la intensidad) que arrastra mediante flujo laminar los agregados humectados que han sido fragmentados por el impacto de gota de lluvias previas de elevada intensidad (Rodríguez et al., 2002, citado en Guerra et. al., 2003)



En Xalapa Veracruz se elaboró una caracterización de un suelo Andosol (Quantin & Geissert, 1988), en lo que respecta a retención de agua en la parte superior del suelo (A11) fue del 50%, y 40% en el horizonte B considerando que la medida fue realizada en el suelo secado al aire, el valor real de la capacidad de retención del suelo húmedo puede alcanzar 70 a 80% en A11 y 60 a 70% en B, teniendo en cuenta el efecto de deshidratación irreversible. La reserva de agua útil para plantas o cultivos es probablemente superior a 10 % del peso de suelo seco. En este caso los autores clasificaron el Andosol según CPSC 1962 y 1972 como: Andosol con perfil diferenciado, desaturado ( $S/T < 50\%$ ) con horizonte A1 crómico, derivado de cenizas rio-dacíticas recientes; y de acuerdo al sistema Soil Taxonomy (USDA, 1975) corresponden a Typic- Dystrandepsts.

La modificación de cambio de uso en Andosoles provoca una drástica disminución en la tasa de infiltración básica, pasando de muy rápida a moderadamente rápida. Este comportamiento tiene repercusiones en el comportamiento hídrico, aumentando la escorrentía, acelerando los procesos de erosión hídrica y disminuyendo la reserva de agua en el suelo así como la recarga del acuífero (Neris, Fuentes, Dorta, Jiménez, & Tejedor, 2009)

Los suelos Andosoles tienen una alta capacidad de infiltración del agua de lluvia cuando está en condición seca y por lo tanto es difícil que se puedan generar eventos de escurrimiento, sin embargo, una vez que se tienen condiciones de humedad cercanas a la capacidad de campo, el suelo se satura rápidamente con lluvias de intensidad moderada y es entonces cuando se presenta el movimiento de agua sobre la superficie (Rivera et al., 2012).

Viramontes et al. (2008, citado en Rivera et al., 2012) encontraron que los Andosoles son resistentes a la erosión cuando no son perturbados, pero pueden ser muy frágiles en condiciones de degradación.



## Aprovechamiento de agua de lluvia en suelos Andosoles.

En los modelos de gestión de recursos del agua en suelos Andosoles, se favorecen los procesos de infiltración y de posible recarga de acuíferos, ya que en la mayoría de los casos la captación de agua es subterránea.

La captación de agua de lluvia está basada en el uso de la escorrentía, por lo que se caracteriza por tener un área donde se capte el agua que circula superficialmente sobre el terreno y otra para recibirla y almacenarla.

La ocurrencia y cantidad de escorrentía superficial dependen de las características de la precipitación, clima, suelo, vegetación, pendiente y tamaño de área. La teoría general de captación de agua de lluvia (FAO, 2000) es:

Captación de agua de lluvia=escorrentía inducida + precipitación recogida.

$$Ac = (PP * Ac * Ce) + (PP * As)$$

(3)

Donde:

Ac= Volumen de agua captado (litros)

PP= Precipitación (mm)

Ac= Área de captación (m<sup>2</sup>)

As= Área de siembra/cosecha (m<sup>2</sup>)

Ce= Coeficiente de escorrentía

En este caso interesa el coeficiente de escorrentía, que depende de las características del suelo; en el área de captación, el suelo más conveniente es el que facilita la escorrentía (compacto, impermeable, sin vegetación). En contraste el otro factor es el área de cultivo en donde los requerimientos del suelo son diferentes (permeables, retención de nutrientes, fértiles). Es importante en el diseño de sistemas de captación, implementar la relación entre el área de recolección (Ac) y el área cultivada (As).



## **3.2 PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES.**

La actividad forestal es un importante elemento en el desarrollo del país, que debido a las heterogéneas características de suelo, clima y altitud de México, favorecen dicha actividad. Por lo que existen programas que apoyan los proyectos de plantaciones forestales comerciales, no sólo beneficiando la producción sino también ayudando a mitigar el impacto ambiental por los servicios ambientales generados al implementar este tipo de plantaciones.

Las Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) se convierten en una alternativa productiva para los habitantes del área rural, sin embargo es necesario considerar que las plantaciones implican costos de inversión, mantenimiento y producción. Los SCALL podrían ser una alternativa benéfica para mitigar los costos de abastecimiento de agua de una plantación forestal debido a que pueden satisfacer la demanda hídrica que requieren para su desarrollo en temporada de estiaje.

### **3.2.1 Antecedentes**

Desde 1930 en México comienzan las incursiones de grandes empresas en la industria forestal, lo cual favoreció el desarrollo de las plantaciones forestales comerciales, siendo Chalco, en el Estado de México, la primera zona en donde se desarrollarían las PFC.

De acuerdo con datos de la CONAFOR (2015), entre 1974 y 1983 el Gobierno Federal, a través de un fideicomiso para el Desarrollo del Plan de Estructuración de Bosques Artificiales (FIDEBA), plantó aproximadamente 9 mil hectáreas de pinos tropicales en varias regiones de Oaxaca. Posteriormente en el Estado de Chihuahua, se establecieron alrededor de 6,500 hectáreas de plantaciones con diferentes especies de pinos.



En 1997 se creó el Programa Nacional para el Desarrollo de Plantaciones Forestales (PRODEPLAN) y fue reestructurado en 2001, cuyo objetivo fue apoyar en el establecimiento de 875, 000 hectáreas de plantaciones forestales, en un periodo de 25 años. Además, tenía el propósito de reducir las importaciones de productos forestales, generando opciones de desarrollo sustentable y productividad en México (CONAFOR, 2015).

Veracruz fue el primer estado en establecer plantaciones forestales comerciales bajo un esquema de financiamiento dirigido al sector rural; en este estado entre los años 1994-1996 se establecieron 2,291 hectáreas de plantaciones maderables comerciales (Rivera, 2013).

### **3.2.2 Definición**

De acuerdo con la CONAFOR (2015) las Plantaciones Forestales Comerciales son aquellas cuyo objetivo puede ser maderable y no maderable, la primera (Industrial o maderable) se orienta la producción de madera para celulosa y para la industria forestal mecánica (tablas, tableros, muebles, etc.). Por otra parte, las no maderables se destinan para la obtención de productos como leña, carbón vegetal y que combinan la producción forestal con actividades agropecuarias.

En este sentido, la FAO (2002) define las plantaciones forestales como aquellas formaciones forestales sembradas en el contexto de un proceso de forestación o reforestación. Estas pueden ser especies introducidas, cumpliendo con los requisitos de una superficie mínima de 0.5 ha; una cubierta de copa de al menos el 10 por ciento de la cobertura de la tierra, y una altura total de los árboles adultos por encima de los 5 m.

Por otra parte, el potencial de las plantaciones forestales para satisfacer la demanda de madera y fibras está aumentando. Sin embargo, las plantaciones forestales abarcan el 5% de la cubierta forestal mundial, en el 2000 se estimó que



las plantaciones forestales proporcionaban 35% de la madera en todo el mundo, actualmente se prevé que para el 2020 aumentará al 44%.

De acuerdo con Cabrera (2003) existen diferentes formas para clasificar las plantaciones forestales, las principales son:

- a) Clasificación determinada por el ecosistema en el cual se realizó la plantación; la cual consiste en un sistema de reforestación donde se realiza la siembra de árboles en un sitio que carece de cobertura vegetal y arbustiva, los árboles plantados se convierten en la especie dominante.  
En este sentido, también se considera la plantación agroforestal, cuyo objetivo es la producción forestal, incorporando a la plantación un cultivo agrícola o pecuario, brinda la ventaja de que el propietario puede percibir ingresos de la cosecha de los productos.
- b) Clasificación en función de la composición florística de la plantación; en la que se encuentra la plantación pura o monoespecífica, las cuales son las que se realizan con una sola especie, y por otro lado, existe la plantación mixta las cuales incluyen dos o más especies combinadas en un mismo espacio geográfico, con el objeto de proveer diferentes productos forestales e ingresos escalonados en el tiempo.
- c) Clasificación determinada por el origen de las especies plantadas; en las que se utilizan especies nativas, las cuales pertenecen al sistema natural donde se establecen; y las plantaciones combinadas en las que se utilizan especies nativas y exóticas en un mismo espacio geográfico.
- d) Clasificación con base en el destino de la producción, son aquellas cuyos productos están dirigidos a abastecer la industria, entre las que se encuentra la plantación energética; en las cuales sus productos son utilizados como combustibles.



### 3.2.3 Perspectiva de las plantaciones forestales comerciales en México

De acuerdo con Martínez, Azpíroz, Rodríguez, Cetina, y Gutiérrez (2006) el establecimiento de PFC en México, se ha limitado principalmente a la protección de áreas degradadas, y pocos son los ejemplos de poblaciones establecidas con fines comerciales.

México dispone de aproximadamente 64 millones de hectáreas de bosques de clima templado y selvas que abarcan el 32% del territorio nacional. Además el país cuenta con 56 millones de hectáreas de matorrales y cerca de 2 millones de hectáreas de vegetación hidrófila. Dichos recursos son de gran importancia para el país desde el punto de vista social, económico y ambiental (Torres, 2004).

De acuerdo con Elizondo (2006) históricamente la producción de madera en México proviene de bosques naturales, sin embargo a pesar de su extensión y diversidad se tiene un bajo rendimiento maderable. La proporción de la superficie forestal presenta bajo aprovechamiento y existen problemas adicionales de manejo forestal, industrialización, organización para la producción y tipo de propiedad, así como restricciones institucionales que hacen que la actividad forestal maderable sea poco eficiente (CONAFOR, 2001).

Una estrategia implementada por el gobierno mexicano para reducir la presión que sufren los ecosistemas forestales e incrementar la producción forestal, maderable y no maderable, ha sido el establecimiento de PFC (SEMARNAT, 2005).

Las PFC representan una solución para disminuir la importación de productos maderables, así como para reducir la presión productiva de bosques y selvas del país.

La superficie de plantaciones comerciales en México registrada en 1999, se estimaba que solo existían 34 mil hectáreas de plantaciones comerciales y alrededor de 590, 000 hectáreas de plantaciones no comerciales, las cuales tenían como objetivos la protección y restauración.



Actualmente en México la superficie cubierta en cuestión de PFC de diversas especies a nivel nacional, alcanza aproximadamente 117, 479 ha, de las cuales la de mayor cuantía son las especies maderables con un 85.2 %, distribuidas principalmente en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, predominando el cedro rojo y el eucalipto. El 14.8 % de superficie con plantaciones forestales comerciales corresponde a especies no maderables plantadas (CONAFOR, 2015).

Se cuenta con los datos y registros, los cuales indican que en el país se han establecido un poco más de 10 000 hectáreas de PFC maderables por año en promedio durante la última década (CONAFOR, 2015). Por lo que si se mantiene la misma tendencia, la expectativa actual es alcanzar en el año 2025 una superficie de 300 mil hectáreas, teniendo como principales especies implementadas el eucalipto, teca y melina; y con respecto a las especies nativas las dominantes serían pinos, cedros y caoba.

### **3.2.4 Servicios ambientales**

Se considera que las zonas forestales de captación del agua son vitales para el bienestar ambiental del mundo, debido a que albergan una enorme biodiversidad, proporcionando alimento, forrajes y productos forestales. Por otra parte, los bosques protegen las cuencas hidrográficas de las montañas, las cuales son una fuente del agua dulce que consume más de la mitad de la humanidad (Rivas et al., 2005).

Por otra parte, Hofstede, Lips y Sevink (1998) mencionan que la implantación de árboles favorece la estabilidad del ecosistema creando más biomasa, se aumenta la cobertura vegetal y la entrada de materia orgánica al suelo; sin embargo, esto no es una actividad sencilla.

Por otro lado, De Camino (1995) menciona algunas investigaciones realizadas en diferentes lugares de América Latina en las que reportan impactos



positivos y negativos de acuerdo con las plantaciones forestales estudiadas, las cuales son:

- El impacto ambiental se verá reflejado de acuerdo a la procedencia de las especies, los monocultivos, los efectos sobre el suelo y la vegetación, los fuegos forestales, los efectos sobre la fertilidad, la actividad biológica y humana.
- En cuanto al aspecto socioeconómico influirán los siguientes aspectos: la tenencia de la tierra, los territorios de pueblos originales, los lugares sagrados y culturales, las especies medicinales y rituales, los derechos de los trabajadores, las relaciones con las comunidades y sus derechos, la generación de empleo local, la rentabilidad, la formación de capital social y los ingresos por productos y por servicios ambientales.

Dicha autora afirma que las plantaciones cumplen varias funciones entre las que se encuentran:

- 1) Abastecer de leña y productos forestales;
- 2) Recuperar suelos degradados (evitar la erosión, la escorrentía y la sedimentación);
- 3) Asegurar pendientes inestables, costas, riberas y dunas, especialmente, en las cercanías de obras de infraestructura y de terrenos agrícolas;
- 4) Manejo del paisaje;
- 5) Combatir la desertificación; y
- 6) Promover las actividades tendientes a fijar de dióxido carbono.



#### 4. JUSTIFICACIÓN.

La disponibilidad y calidad del recurso natural no renovable agua a nivel mundial es limitado, por lo que la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación de cuerpos superficiales de agua, el crecimiento exponencial de los centros urbanos, aspectos socioeconómicos y demográficos, el cambio climático y el desequilibrio hídrico global tan solo son algunos de los factores que contribuyen a esta situación.

En este sentido, la región de la meseta purépecha no es ajena a esta realidad, por lo que las actividades antropogénicas se ven limitadas impidiendo el desarrollo económico y social, debido a la influencia de algunos de los factores antes citados, y particularidades de la zona, que dan como resultado una baja disponibilidad de agua.

Como una alternativa para resolver parte de esta problemática, instituciones gubernamentales, privadas, académicas y, en menor proporción, habitantes de esta región, han impulsado el desarrollo de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia, intentando cubrir las necesidades específicas de la población a través de la disponibilidad del vital líquido.

En este sentido, las medidas destinadas a mejorar el acceso al agua potable favorecen en particular a las personas de bajos recursos, tanto en zonas rurales como urbanas y pueden ser un componente eficaz de las estrategias de mitigación de pobreza (OMS, 2006).

En este contexto, el Programa Nacional Hídrico (2014-2018), incluye dentro de sus objetivos, impulsar el desarrollo de sistemas alternativos e implementar tecnología apropiada para disponer de agua a través de captaciones de agua pluvial a poblaciones rurales, debido a las dificultades imperantes en estas zonas.

Los usos que se pueden destinar al agua de lluvia recolectada dependen de la necesidad a cubrir por el usuario; en este caso el área que se pretende estudiar es la localidad de San Felipe de los Herreros en el Municipio de Charapan del



Estado de Michoacán de Ocampo, en donde el objetivo es implementar Plantaciones Forestales Comerciales con la finalidad de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización.

En este sentido, las PFC se convierten en una alternativa productiva para los habitantes de zonas rurales, teniendo en cuenta que el hecho de implementar plantaciones implica inversión, riesgos económicos, manejo forestal; por lo que los SCALL son una opción benéfica para mitigar dichos costos de operatividad y proporcionar a la plantación forestal certidumbre en su productividad al disponer de agua para su uso, focalizando la temporada de estiaje en donde se presentan panoramas drásticos de deficiencia hídrica.



---

## **5. OBJETIVOS.**

### **5.1. Objetivo General.**

Diseñar un sistema de captación de agua de lluvia, considerando el manejo del suelo y del agua para la implementación de una plantación forestal comercial en la localidad de San Felipe de los Herreros, Charapan, Michoacán.

### **5.2. Objetivos Específicos.**

- Realizar el balance hídrico de la zona de estudio.
- Analizar la relación agua-suelo del área de estudio.
- Identificar un método eficiente para el diseño del sistema de captación de agua de lluvia enfocado al aprovechamiento forestal.
- Realizar un inventario de los sistemas de captación de agua de lluvia existentes en la localidad para analizar la situación actual del recurso hídrico.



---

## 6. HIPÓTESIS

**H<sub>1</sub>:** La planeación estratégica de los sistemas de captación de agua de lluvia es una alternativa viable para las plantaciones forestales comerciales en San Felipe de los Herreros, Charapan.

**H<sub>2</sub>:** Las características del suelo en la zona de estudio, favorecerán el diseño del sistema de captación de agua de lluvia para la plantación forestal comercial proyectada.



## 7. MATERIAL Y MÉTODOS

### 7.1 Selección del área de estudio

San Felipe de los Herreros (SFH), es una comunidad indígena con un alto grado de marginación, ubicada en el municipio de Charapan, Michoacán. Las principales actividades económicas de la localidad son la agricultura de temporal y el manejo de recursos forestales.

Al respecto, CONAFOR (2014) menciona que el municipio de Charapan presenta áreas potenciales para el desarrollo de programas enfocados en la restauración de cuencas y PFC. Es así que a través de su Coordinación General de Producción y Productividad en el 2015 plantea un mapa del Estado de Michoacán con las áreas elegibles y las prioritarias para el establecimiento de PFC en las regiones templadas y tropicales (Anexo 1). Por lo que los SCALL podrían considerarse como una alternativa viable para las necesidades de las plantaciones sobre todo en la temporada de estiaje.

Por otra parte, en la localidad SFH en el 2014 la fundación Pro Mazahua instaló 32 SCALL a nivel vivienda para satisfacer sistemas de microtúneles y necesidades humanas como limpieza y consumo, señalando un método adicional de desinfección para su potabilización. Los sistemas a la fecha siguen en su mayoría en operación, lo que se traduce en una aceptación de la ecotecnología por parte del usuario, favoreciendo su desarrollo a corto y mediano plazo.

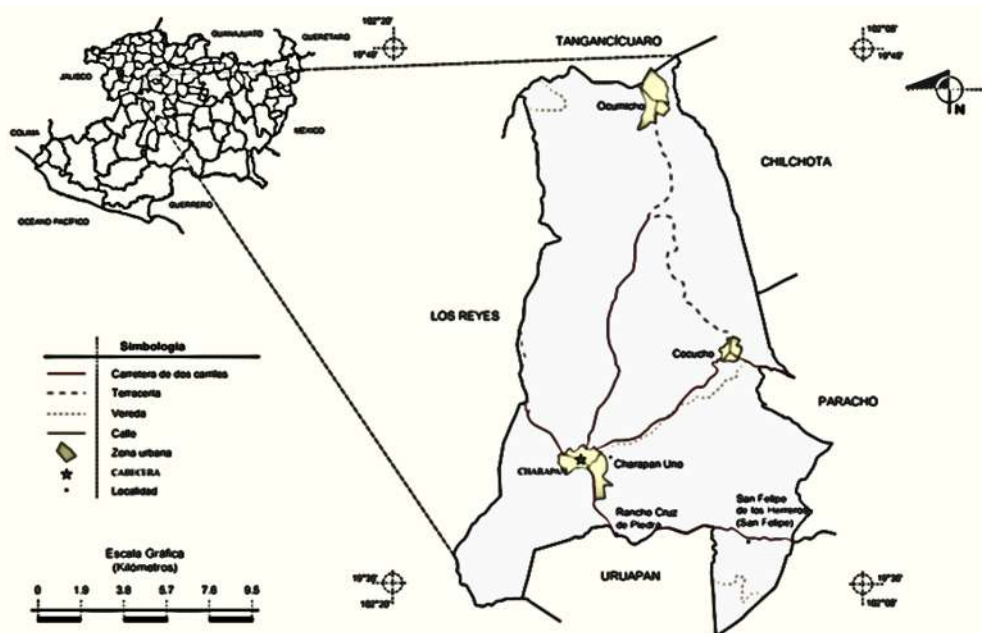
### 7.2 Localización del área de estudio.

Charapan es un Municipio perteneciente al Estado de Michoacán de Ocampo, cuenta con 7 localidades y una población total de 12, 163 habitantes. Además es la cabecera municipal y entre las localidades con más importancia se encuentran Cocucho, Ocumicho y San Felipe de los Herreros. Cabe mencionar que las primeras

dos localidades cuentan con una población mayor a 2500 habitantes mientras que en San Felipe de los Herreros tiene 1898 habitantes (INEGI, 2009).

Por otro lado, de acuerdo con la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL, 2014) la superficie de dicho municipio es de 234,452 Km<sup>2</sup>, es una zona no urbana con un grado de marginación alto, sin embargo el Plan de Desarrollo Municipal 2008-2011 indica que posee un potencial significativo de recursos forestales y turísticos (SEDESOL, 2011). Charapan, Cocucho y Ocumicho son consideradas zonas urbanas mientras que San Felipe de los Herreros, Cruz de Piedra, entre otras localidades son consideradas dentro del ámbito rural por las condiciones de vivienda y cantidad de población.

De acuerdo con los datos proporcionados por INEGI (2009), Charapan se encuentra ubicado entre los paralelos 19°34' y 19°49' de latitud norte; los meridianos 102°08' y 102°19' de longitud oeste; altitud entre 1 900 y 3 200 m. Colinda al norte con los municipios de Los Reyes, Tangancicuaro y Chilchota; al este con Chilchota, Paracho y Uruapan; al sur con Uruapan y Los Reyes; al oeste con Los Reyes (figura 2).



**Figura 2.** Ubicación geográfica de Charapan, Michoacán de Ocampo. Fuente: Atlas de peligros naturales de Charapan, 2011



### **7.2.1. Climatología y temperatura**

En Charapan prevalecen dos climas principalmente, dominando en casi todo el municipio, el clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw), con temperaturas medias anuales entre 12°C y 18°C, las cuales pueden alcanzar hasta los 28°C en el mes más cálido.

El otro clima presente es semifrío subhúmedo (Cb[w2]) con una presencia mínima en el sureste del municipio, caracterizado por un verano fresco, con temperaturas medias anuales entre 5°C y 12°C, con extremas que pueden alcanzar una mínima de -3°C y una máxima de 18°C. El rango de precipitación es de 1000-1500 mm (INEGI, 2009).

### **7.2.2 Hidrología.**

El municipio de Charapan se encuentra dentro de la cuenca del río Balsas en la subregión de Tepalcatepec. La red Hidrológica del municipio es de tipo detrítico, con dirección del centro hacia el sur y norte.

Los ríos son en su mayoría de tipo intermitente y los permanentes no superan la categoría del tercer orden, consecuencia del poco recorrido que realizan desde su inicio hacia las planicies; el inicio se ubica en las partes altas de los edificios volcánicos, a partir de este punto se distribuyen en forma radial sobre las laderas volcánicas, pero dada la reciente configuración del relieve con valores bajos de disección y el suelo con características de consolidación de baja a media. La infiltración condiciona la formación de cauces importantes así como un bajo rango de escurrimiento superficial (SEDESOL, 2011).



### **7.2.3 Edafología.**

En Charapan existe un dominio en prácticamente todo el municipio de suelos Andosoles resultado de la intensa actividad volcánica, que presentan características altamente favorables para las actividades agrícolas.

La clasificación del suelo de Charapan son: Andosol ocupando un 96.11% del municipio, Phaeozem con un 0.65% y Vertisol teniendo un 0.61%, también cuenta con un 5.63% de suelo residual y un 5.04% de aluvial (INEGI, 2009).

### **7.2.4 Uso de suelo y vegetación.**

La vegetación dominante en el municipio de Charapan es el bosque de pino, con áreas en las cuales es posible encontrar encino y una franja mínima de pastizal inducido.

En el municipio de Charapan se presentan básicamente dos usos de suelo: asentamientos humanos y agricultura. Los asentamientos humanos están representados principalmente por Ocumicho en el noreste, Cocucho al centro-orientado, San Felipe de los Herreros en la porción sureste y Charapan al suroeste del municipio (SEDESOL, 2011).

La agricultura es de tipo temporal, enfocada a cultivos anuales; esta actividad económica ocupa la mayor parte del municipio en términos espaciales, con cerca del 50% del área total del municipio.

### **7.2.5 Geología.**

La localización de la cuenca se encuentra en el eje Neovolcánico transversal, por lo cual esta ubicación condiciona la mayoría de sus características naturales, de las que destacan su geología derivada de un campo de volcanes monogenéticos recientes, los cuales dan origen a los suelos volcánicos de la zona y su



geomorfología dominante de conos volcánicos, en el cual el volcán el santísimo tiene la principal injerencia en la cuenca de estudio.

La región es tectónicamente activa como consecuencia de la actividad sísmica, por su cercanía a las zonas de contacto de las placas tectónicas del Pacífico, de Cocos, Rivera y Norteamericana. En este sentido cabe destacar, una franja de material aluvial cerca de San Felipe de los Herreros, que contrasta con la litología de la zona en donde tobas, brechas y andesitas son dominantes, por lo que se puede concluir la complejidad litológica baja resultado de la actividad volcánica reciente y por consiguiente una geomorfología dinámica pero joven.

### **7.2.6 Geomorfología.**

Está asociada a la actividad volcánica dominante en la región, la cual define las principales formas de relieve, que se agrupan en edificios volcánicos de tipo cónico y domos volcánicos, además de planicies piroclásticas sobre derrames lávicos, formas endógenas parcialmente cubiertas por materiales arrastrados por procesos erosivos.

La dinámica geomorfológica de la zona de estudio ha favorecido el desarrollo de suelos con características de profundidad y riqueza de nutrientes que favorecen la actividad agrícola y crean espacios para asentamientos humanos, basados en la pendiente del terreno.

### **7.3 Situación actual del recurso hídrico en SFH**

Si dicho índice se sustenta en los aspectos relevantes, puede ser crucial para la toma de decisiones en determinado territorio, además se generará información que determine la situación actual del agua, y a partir de ello proponer acciones para su manejo, monitoreo del progreso de un proyecto o diseñar sistemas que busquen la sostenibilidad del recurso agua (Sullivan, Meigh, & Giacomello, 2003).



En esta investigación se propone utilizar el Índice de Prosperidad del Agua (IPA), el cual se fundamenta en la metodología del índice sobre la pobreza de agua de Sullivan, pero con aportes de otros autores que formulan un nuevo enfoque de prosperidad. Es necesario que el índice se conforme con aspectos relevantes para la muestra, que definan la situación del recurso en la comunidad, sustentado con datos provenientes de diferentes bases y fuentes, proponiendo un énfasis en los aspectos positivos que definan un entorno de prosperidad y no de pobreza.

En el índice de pobreza de agua se propone considerar cinco componentes esenciales, los cuales describirán la situación de la relación entre el agua y el territorio, los cuales son recursos, acceso, capacidad, uso y ambiente. Los componentes están estructurados por otros subcomponentes o indicadores, que tienen la finalidad de describir, integrar y obtener los aspectos relacionados al agua (Navarro, 2016).

Debido a los alcances del presente trabajo se proponen tres componentes esenciales para el levantamiento de datos de la muestra:

- Componente Acceso
- Componente Uso
- Componente Ambiental

Se pretende recabar información que genere una visión general del recurso agua en la comunidad, además de inventariar en este caso los SCALL generando datos adicionales como el tipo de almacenamiento, uso, calidad, operación y adaptabilidad de los sistemas en la localidad, a través de una encuesta estructurada (Anexo 2).

#### **7.4 Estudio Hidrológico.**

A través del estudio hidrológico se estimarán las características físicas y geomorfológicas de una cuenca, para ello es necesario analizar y manejar



información hidrometeorológica existente, en donde las estaciones consideradas se localicen en las proximidades del área de estudio.

Además, se determinará la demanda de agua para las áreas de riego, para consecuentemente calcular el balance hídrico de la cuenca. Por lo tanto, un análisis hidrológico detallado, es por ende, el primer paso elemental en la planeación, diseño y operación de los proyectos hidráulicos (Aparicio, 1992).

En este caso, el estudio hidrológico a implementar requiere que se conozcan los volúmenes y láminas de los procesos recurrentes en el ciclo hídrico, como la precipitación, escurrimiento e infiltración de una zona determinada, siguiendo la metodología pertinente para la generación de dicha información.

#### **7.4.1 Localización de la microcuenca en estudio.**

El organismo de cuenca Lerma-Santiago-Pacífico gestiona la región hidrológica administrativa IV Balsas, la cual está constituida por la región hidrológica número 18, tiene una superficie territorial de 117 305 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2014), está conformada por ocho estados y 420 municipios, con una superficie correspondiente a 6% del territorio nacional, concentrando en el mismo más del 10% de la población nacional (Valencia, 2015). La cuenca cerrada Paracho-Nahuatzen contiene dentro de sus límites la microcuenca en estudio del presente análisis hidrológico, con una superficie total de 848.50 km<sup>2</sup>, un escurrimiento total de 83.2 Hm<sup>3</sup>/año, volumen disponible a la salida de la cuenca de -0.40 millones de m<sup>3</sup>, lo cual la clasifica con un volumen por disponibilidad como deficiente (PHVEMICH, 2009).

La microcuenca en referencia a la zona de estudio, se encuentra en la región de la Meseta Purépecha, para ser específicos en el municipio de Charapan en la parte suroeste de dicho municipio teniendo como punto de referencia la localidad rural de San Felipe de los Herreros, además parte de la cuenca incluye una mínima porción del municipio de Uruapan, en la región Noroeste que incluye la localidad de Corupo.



#### 7.4.2 Características geomorfológicas de la microcuenca.

Para poder realizar el estudio hidrológico es indispensable definir la zona de estudio, y posteriormente buscar los recursos digitales y físicos necesarios para su elaboración. En este sentido, el primer paso fue consultar en la base de datos las cartas topográficas, edafológicas y, finalmente uso y cobertura de suelo en las bases de datos del INEGI. Los recursos utilizados fueron los siguientes:

- Carta topográfica Paracho E13B29
- Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III. E13B29 (Paracho).
- Carta edafológica Paracho E13B29
- Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1: 250 000 serie II (Continuo nacional)
- Datos vectoriales escala 1:250 000 serie V (Capa unión) para Uso de suelo y vegetación.

Posteriormente se procedió a utilizar los datos vectoriales de información topográfica, en el sistema de información geográfica ArcGis 10.1, en donde se proyectó el parteaguas (Figura 3) que funge como el límite de la cuenca de estudio.

El análisis morfométrico de cuencas es una herramienta importante dentro del análisis hídrico (Maidment, 1992), ya que permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región y también facilita el análisis espacial para el manejo y planeación de recursos naturales.

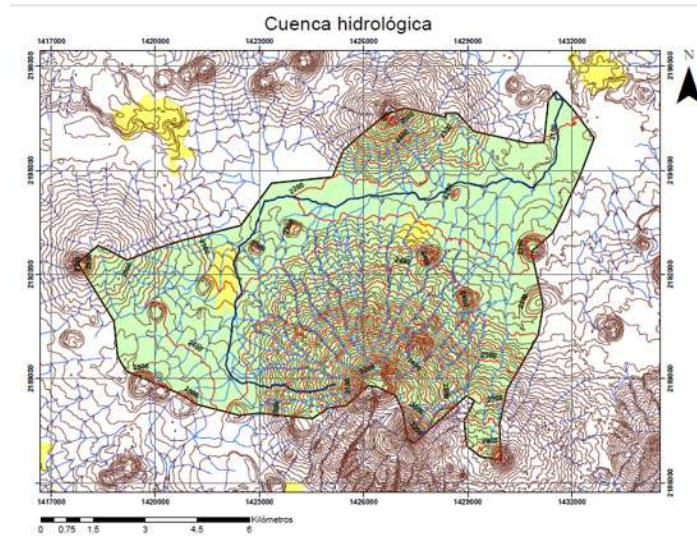


Figura 3. Mapa generado para Delimitar el Parteaguas en ArcGis 10.1

#### 7.4.2.1 Área de la microcuenca.

Este índice queda definido al realizar el parteaguas sobre nuestra zona de estudio y utilizando las herramientas del SIG para poder calcular su valor. La cuenca en cuestión es de categoría microcuenca (Tabla 1) de tipo endorreico al ser una cuenca cerrada con un total de 84.5 Km<sup>2</sup> de área.

Unidad	No de orden	Área (Km <sup>2</sup> )
Microcuenca	1,2,3	10-500
Subcuenca	4,5	500-2000
Cuenca	6,7 o más	Más de 2000

Tabla 1. Clasificación de cuencas por su tamaño (Faustino & Jiménez, 2000)

#### 7.4.2.2 Longitud de cauce principal.

Es el cauce de mayor dimensión que concluye en el punto de salida de la cuenca. Se encuentra situado en las partes más altas del parteaguas y este parámetro influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos.

### 7.4.2.3 Longitud del eje mayor de la cuenca y longitud del ancho mayor.

Se utilizó la herramienta del SIG, para poder trazar un par de líneas perpendiculares definidas como longitud y ancho de la microcuenca (Figura 4), con la mayor distancia posible dentro de ésta.

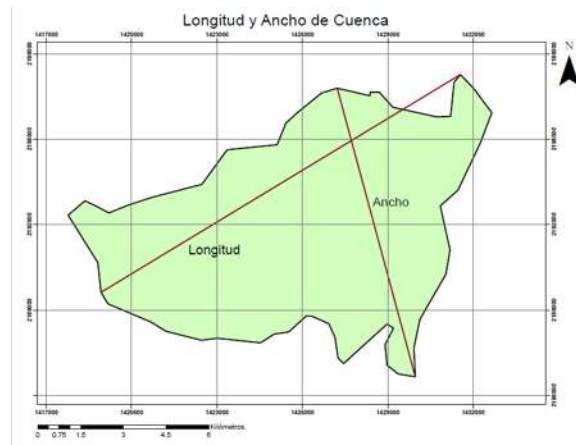


Figura 4. Mapa generado para definir la Longitud del eje mayor y la longitud del ancho mayor de la cuenca

### 7.4.2.4 Forma de la cuenca.

La forma de una cuenca está formado por tres indicadores, el coeficiente de compacidad, la relación de elongación y el índice de forma.

- **Coeficiente de compacidad (C<sub>c</sub>).**

Este coeficiente es propuesto por Gravelius, y consiste en comparar la forma de la cuenca con la de una circunferencia:

$$C_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)



- **Relación de elongación (Re).**

Este valor nos indica que existen relieves altos y pendientes pronunciadas en la cuenca:

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L_c} \quad (5)$$

Donde:

L<sub>c</sub>: Longitud del eje mayor de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

- **Índice de forma (Rf).**

Es la relación entre el área de la cuenca y el área del cuadrado de una determinada longitud. Este factor relaciona la forma de una cuenca con la de un cuadrado, un valor superior a la unidad nos proporciona el grado de achatamiento de la cuenca o el de un río principal corto, por lo tanto con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas (Fuentes, 2004).

$$R_f = \frac{A}{(L_c)^2} \quad (6)$$

Donde:

L<sub>c</sub>: Longitud del eje mayor de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

#### 7.4.2.5 Razón de bifurcación.

Es el cociente del número de corrientes entre el número de corrientes del orden superior (Tabla 2):

$$R_{bu} = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (7)$$

Donde:

N<sub>u</sub>: Numero de corrientes

N<sub>u+1</sub>: Numero de corrientes de orden superior



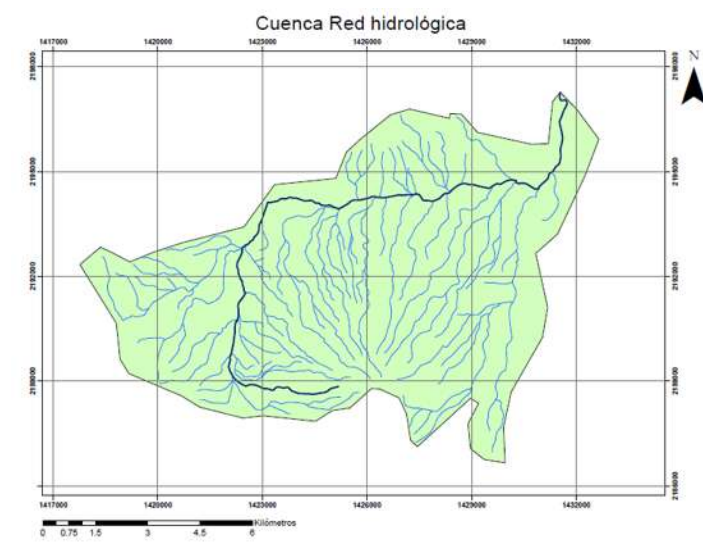
### Cuantificación de corrientes por orden

Corrientes de 1er orden	83
Corrientes 2do orden	25
Corrientes 3er orden	6
Corrientes 4to orden	1

**Tabla 2.** Cuantificación de corrientes por orden de la microcuenca en estudio.

Para finalizar, es necesario obtener el grado de bifurcación de la cuenca con respecto al sistema de drenaje presente (Figura 5), que determina la respuesta de la cuenca ante los eventos de precipitación incidentes en la zona de estudio. Como indicadores del grado de bifurcación o grado de respuesta de la cuenca es necesario calcular los siguientes datos:

- El orden de corrientes
- Densidad de corrientes
- Densidad de drenaje
- Pendiente del cauce principal.



**Figura 5.** Mapa generado para la red hidrológica de la cuenca



#### 7.4.2.6 Orden de corrientes.

Este índice está basado en el método de Strahler y consiste en asignar el orden a las corrientes tributarias, para poder definir el drenaje de la cuenca, se considera una corriente de primer orden la que no tiene afluentes, una de segundo orden es aquella que reúne dos corrientes de primer orden y así sucesivamente.

#### 7.4.2.7 Densidad de corrientes ( $D_s$ ).

Es la medida de desarrollo de la red de drenaje de la cuenca. La densidad de corrientes, que representa la cantidad de corrientes intermitentes en este caso, por unidad de área, se aplicó la siguiente expresión:

$$D_s = \frac{N_s}{A} \quad (8)$$

Donde:

$N_s$ : Número de corrientes.

A: Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

#### 7.4.2.8 Densidad de drenaje ( $D_d$ ).

Este dato se relaciona con la edad del relieve y la resistencia a la erosión. La densidad de drenaje, está definida por la longitud de corrientes por unidad de área.

$$D_d = \frac{L_s}{A} \quad (9)$$

Donde:

$L_s$ : Longitud de las corrientes (km).

A: Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

### 7.4.2.9 Pendiente del cauce principal.

Para poder obtener la pendiente del cauce se realizarán tres criterios:

- 1) Pendiente media que es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividido entre su longitud medida en planta. Para obtener dicho dato se emplea la siguiente fórmula:

$$S = \frac{E_2 - E_1}{L} \quad (10)$$

Donde:

$E_2$  : Elevación superior del perfil del cauce (m).

$E_1$ : Elevación inferior del perfil del cauce (m).

L: Longitud total del cauce (m).

- 2) La pendiente media definida por este criterio, menciona que es necesaria una línea recta que apoyándose en el extremo aguas debajo de la corriente hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce, arriba y debajo de dicha línea (Figura 6).

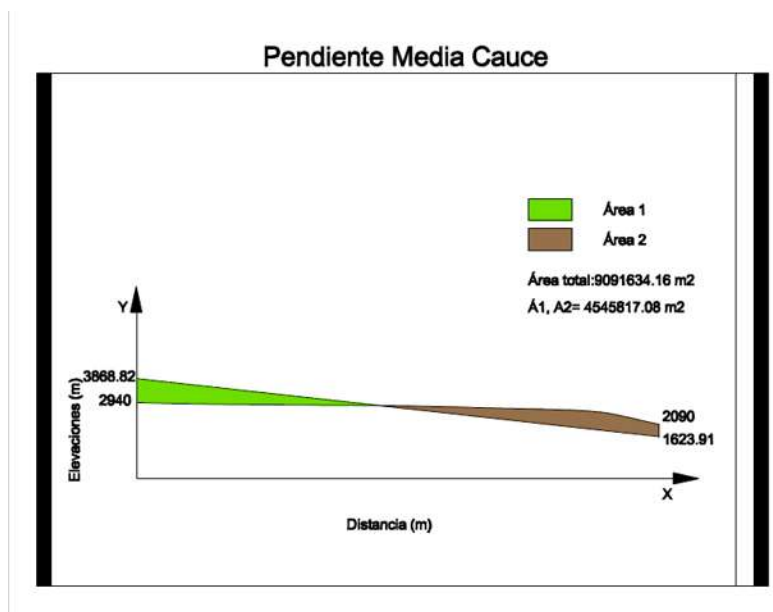


Figura 6. Gráfico de la pendiente media Cauce. 2do criterio



Para obtener la pendiente media del cauce se emplea la siguiente fórmula:

$$S = \frac{E_2 - E_1}{L} \quad (11)$$

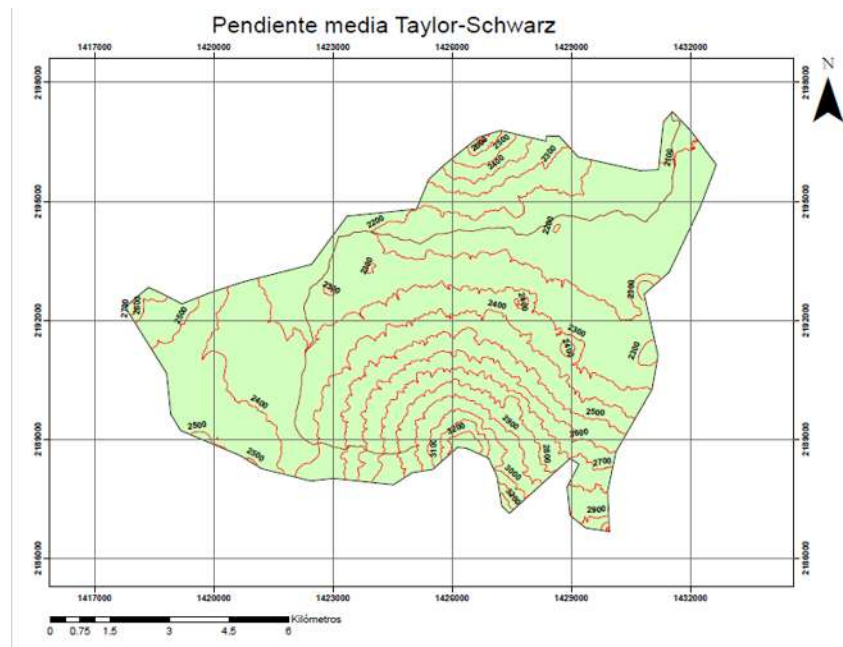
Donde:

$E_2$  : Elevación superior de la línea que se empleó para compensar áreas (m).

$E_1$ : Elevación inferior de la línea que se empleó para compensar áreas (m).

L: Longitud total de la línea proyectada (m).

- 3) Taylor y Schwarz, proponen calcular como la pendiente de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión (Figura 7).



**Figura 7.** Mapa del cálculo de la Pendiente media del cauce por el tercer criterio Taylor-Schwarz

Se requiere utilizar la siguiente ecuación:

$$s = \left[ \frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{L_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (12)$$

Donde:

L: Longitud total (m)

L<sub>m</sub>: Longitud del tramo del cauce que queda entre dos curvas de nivel (m).

S<sub>m</sub>: Pendiente del cauce comprendido entre dos curvas de nivel

#### 7.4.2.10 Pendiente media de la cuenca.

Para este parámetro se siguió el criterio de Horton, el cual consiste en colocar una malla sobrepuesta sobre la cuenca y ésta se orienta según la dirección del cauce principal; al finalizar se obtiene dos promedios el aritmético y un geométrico (ver figura 8).

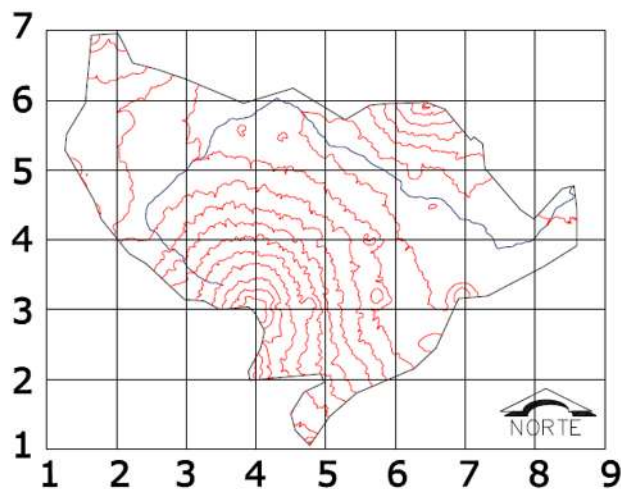


Figura 8. Mapa generado para el Método de Horton y calcular la pendiente media de cuenca en estudio.

Las pendientes en la dirección x, y se calcularon con las fórmulas 13 y 14 respectivamente (tabla 4)

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x} \quad (13)$$



$$S_y = \frac{N_y D}{L_y} \quad (14)$$

Donde:

Sx: Pendiente de la cuenca en dirección x.

Sy: Pendiente de la cuenca en dirección y.

D: Desnivel constante entre curvas de nivel (m).

Lx: Longitud total de las líneas de la malla en la dirección x, comprendidas dentro de la cuenca (m).

Ly: Longitud total de las líneas de la malla en la dirección y, comprendidas dentro de la cuenca (m).

Nx: Número total de las intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección x con las curvas de nivel.

Ny: Número total de las intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección y con las curvas de nivel.

Numero de malla	Nx	Ny	Lx	Ly
1	0	0	0	0
2	6	3	2239.7399	5866.32
3	15	9	5801.0037	6316.8728
4	24	10	13161.9	6855.54
5	11	12	11752.08	9001.89
6	2	5	6035.87	7835.66
7	0	4	0	4709.02
8	0	0	0	1524.49
<b>Σ</b>	58	43	38990.59	42109.79
<b>Total</b>		101		81100.39

Tabla 3. Procedimiento Método Horton para el cálculo de la pendiente media de la cuenca en estudio.

D= 100 m

Sx= 0.14875383

Sy= 0.10211401

**Promedio Aritmético**

S= 0.12543392      S= 12.54 %

**Promedio Geométrico**



$$S= 0.12324711 \quad S= 12.32 \%$$

#### 7.4.2.11 Elevación de la cuenca.

Es el valor representativo del cambio de elevación en el espacio de una cuenca. Este factor está asociado a la temperatura y, por ende, a la precipitación de la zona de estudio. Se utilizaron tres criterios para la obtención de este parámetro.

- 1) Se define una malla con líneas referenciadas a los ejes “x” y “y”, esta malla debe de tener la característica de producir un mínimo de 100 intersecciones dentro de la cuenca (Figura 9).

$$\bar{E}_l = \frac{\sum_1^n E_{li}}{n} \quad (15)$$

Donde:

$E_{li}$ : Elevación de cada punto (m).

n: Número de puntos

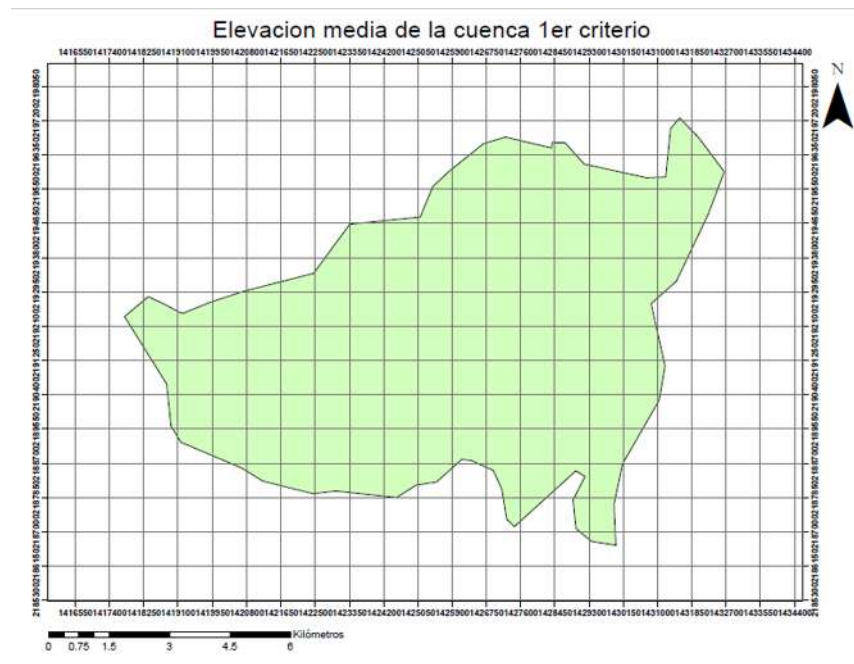


Figura 9. Mapa de la elevación media de la cuenca 1er criterio



#### 7.4.2.11.1 Curva hipsométrica.

Indica el porcentaje de área de la cuenca o la superficie de la cuenca que existe por encima de la cota determinada. Por lo tanto, se maneja en forma gráfica, la cual relaciona las elevaciones de la cuenca con las áreas asociadas a dichas elevaciones (Figura 10 y Tabla 4).

Intervalo entre curvas de nivel	Cota media	Área (km <sup>2</sup> )	Área/Área Total (%)	Área acumulada (%)	Área*Cota media
	3250			0	
3300	3200	3250	0.28626209	0.34	930.351793
3200	3100	3150	0.45329247	0.54	1427.87128
3100	3000	3050	1.35567726	1.60	4134.81564
3000	2900	2950	2.16187844	2.56	6377.5414
2900	2800	2850	3.28452189	3.89	9360.88739
2800	2700	2750	3.65449429	4.33	10049.8593
2700	2600	2650	4.27823506	5.06	11337.3229
2600	2500	2550	6.32359856	7.48	16125.1763
2500	2400	2450	13.5561541	16.04	33212.5776
2400	2300	2350	16.1214818	19.08	37885.4822
2300	2200	2250	16.5772794	19.62	37298.8786
2200	2100	2150	15.7519285	18.64	33866.6462
2100	2000	2050	0.69160886	0.82	1417.79816
		84.4964127	100.00		

Tabla 4. Datos para elaborar Curva Hipsométrica

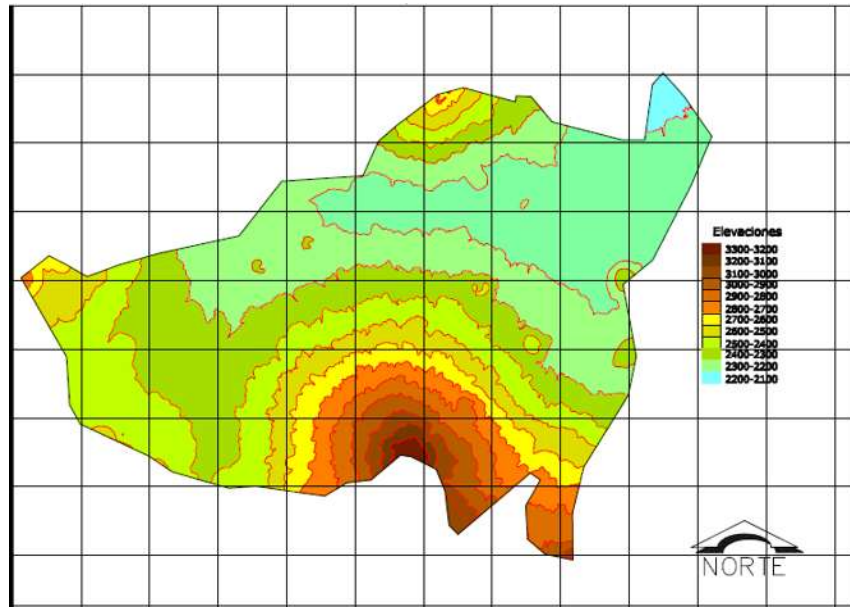


Figura 10. Mapa para generar áreas y elaborar curva Hipsométrica

- 2) Una vez obtenida la curva hipsométrica se puede desarrollar el segundo criterio, el cual requiere que del área bajo la curva resultante, proyectar una línea del área acumulada al 50% que intersecte a la curva y sacar el valor de la elevación (Figura 11).

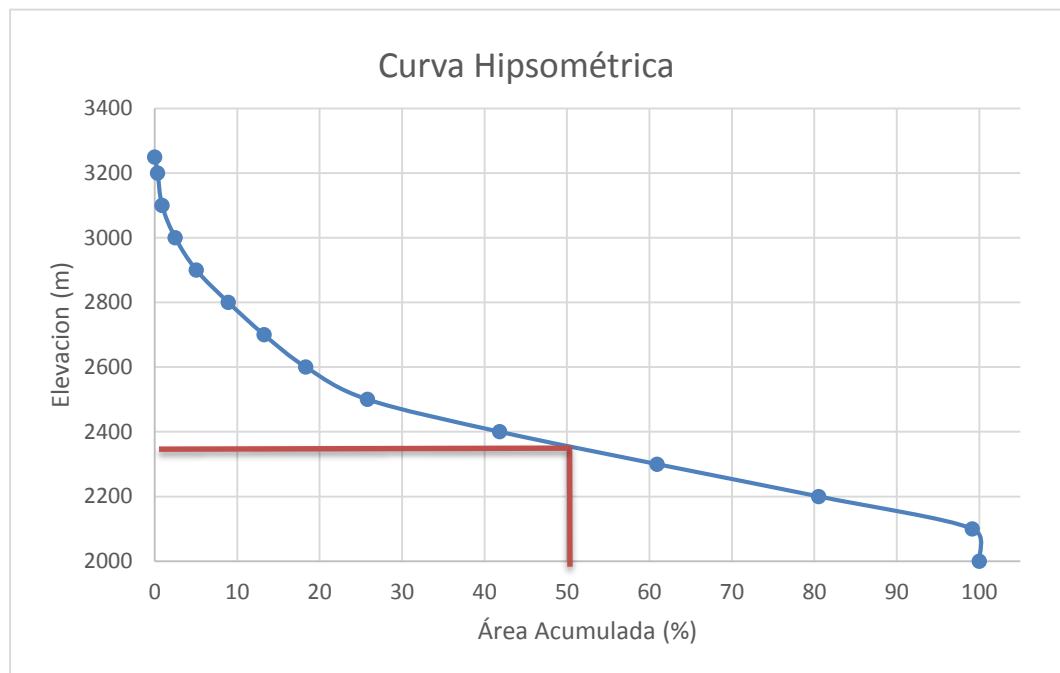


Figura 11. Elevación cuenca 2do criterio, en relación con curva hipsométrica.



- 3) Utilizando también la curva hipsométrica, el tercer criterio denominado método de Trapecios o Simsons, requiere sacar con áreas determinadas por cada elevación y las acumuladas, manejando áreas de trapecio y triángulos para desarrollar el método (Tabla 5).

<b>Áreas (m<sup>2</sup>)</b>	
<b>A1</b>	1092.6
<b>A2</b>	1689.9
<b>A3</b>	4893.5
<b>A4</b>	7547.7
<b>A5</b>	11078
<b>A6</b>	11894
<b>A7</b>	13418
<b>A8</b>	19084
<b>A9</b>	39306
<b>A10</b>	44837
<b>A11</b>	44143
<b>A12</b>	40081
<b>A13</b>	1677.9
<b>Total</b>	<b>240742 mKm<sup>2</sup></b>

Tabla 5. Desarrollo del 3er criterio Método de trapecios

### 7.4.3 Precipitación media.

#### 7.4.3.1 Recopilación de datos.

La importancia de la obtención de datos para su posterior análisis en el estudio hidrológico, radica en conseguir información de estaciones climáticas superficiales que estén situadas dentro o aledañas a la cuenca de estudio.



Se optó por utilizar los datos de la plataforma desarrollada por las Naciones Unidas denominado CLImate COMputing Project (CLICOM), el cual es un sistema de software de datos climatológicos, dicha información permitió ubicar espacialmente las estaciones y poder revisar los períodos en las que éstas operaron o si aún están activas, en este sentido el criterio fue localizar las estaciones cercanas a la cuenca y que contaran con datos de 20 años contiguos (Tabla 6).

ESTACION	NOMBRE	NUMERO	COORDENADAS		Elevación
			Latitud (N)	Longitud (W)	
EB	Tanaco	16253	19.7	-102.1	2140
E1	Patamban	16251	19.8	-102.3	2140
E2	Uruapan (CFE)	16165	19.4	-102.1	1611

**Tabla 6.** Datos generales de estaciones utilizadas para estudio hidrológico.

Los datos se ordenaron en una hoja de cálculo electrónico, en donde se revisaron los disponibles de las estaciones seleccionadas, definiendo un periodo para las 3 estaciones de 20 años (1982-2001). Los datos manejados fueron mensuales, acomodados de manera vertical; la estación base está registrada con el nombre de Tanaco y se trabajaron con dos estaciones auxiliares (Figura 12). Es importante señalar que la disponibilidad de datos y las pocas estaciones cercanas a la cuenca de estudio, aumentaron la complejidad del estudio hidrológico realizado.

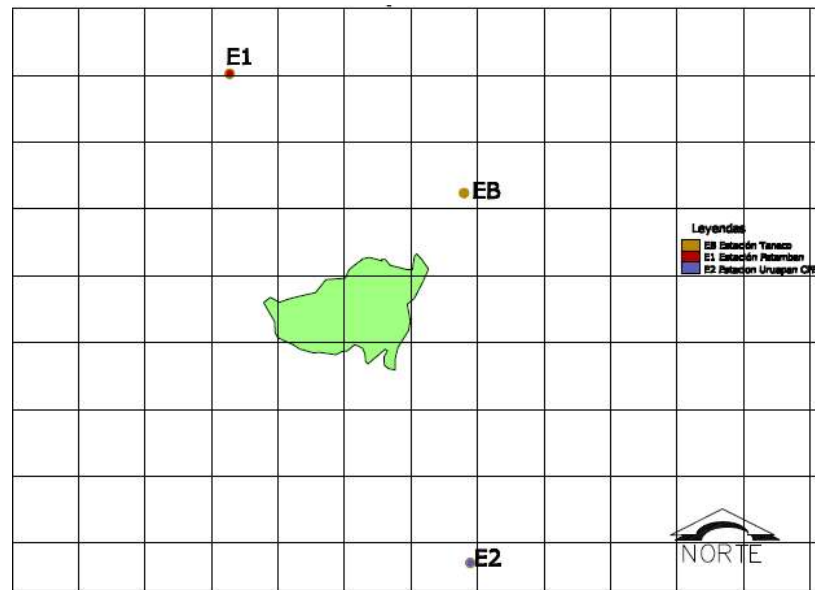


Figura 12. Mapa de la Cuenca y estaciones seleccionadas

#### 7.4.3.2 Deducción de datos faltantes.

Después de ordenar los datos en la hoja de cálculo electrónica, se ubicaron los faltantes de cada estación, por lo que posteriormente se revisaron los métodos viables para la deducción de los datos ausentes, decidiendo utilizar el método racional deductivo y el inverso por la distancia al cuadrado diseñado por US National Weather Service.

- **Método racional deductivo.**

Este método demanda que los datos de precipitación sean de índole mensual, y debido a que en algunos casos las estaciones auxiliares tampoco contaban con la información para emplear otro método. Por lo que este método solo toma los datos de dicha estación en la que se requieran los faltantes, utilizando el promedio de mes en cuestión.



- **Método del inverso por la distancia al cuadrado.**

Este método también incluye utilizar datos mensuales y requiere de, por lo menos, dos estaciones auxiliares para su ejecución. Sin embargo el número recomendable de estaciones para su desarrollo es de cuatro. Es necesario tener la distancia en kilómetros entre cada estación y el dato de precipitación de las estaciones auxiliares que se van a utilizar para obtener el dato faltante de la estación involucrada, la fórmula 15 indica las variables a utilizar por este método:

$$P_x = \frac{\sum \frac{P_i}{(d_i)^2}}{\sum \frac{1}{(d_i)^2}} \quad (16)$$

Donde:

Px: Dato faltante

Pi: Precipitación en la estación auxiliar

di: Distancia entre la estación auxiliar y la estación del dato faltante

#### **7.4.3.3 Consistencia de datos.**

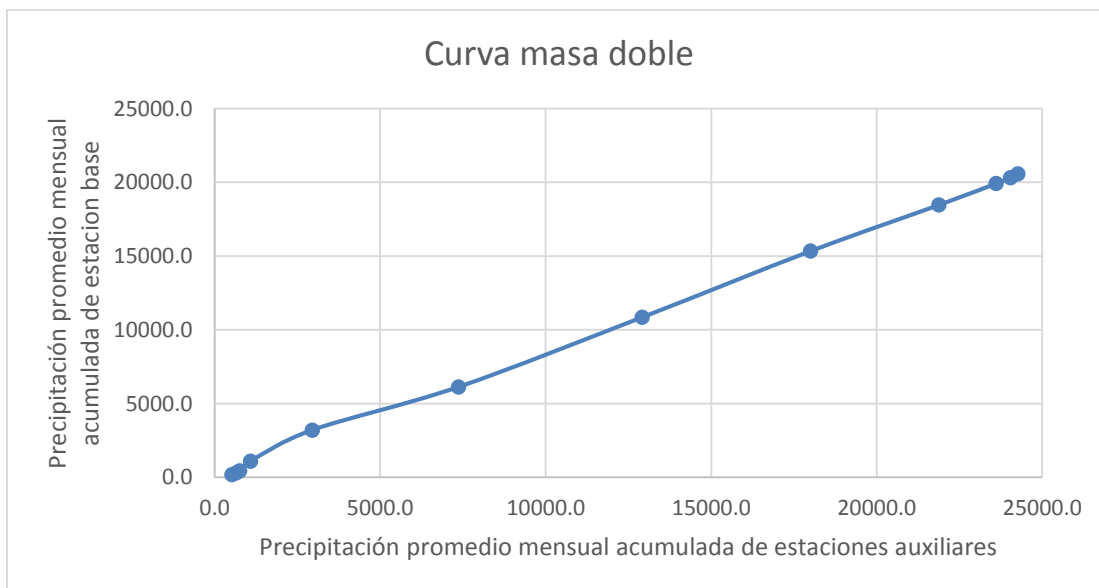
Este proceso se realizó utilizando el criterio de la curva masa doble, en donde es necesario tener las sumatorias de precipitación por mes de las estaciones auxiliares y de la estación base ordenadas en una hoja de cálculo electrónico para, posteriormente ingresar en una columna el promedio mensual de dichas estaciones (Tabla 7 ).

Es necesario colocar posteriormente la precipitación promedio mensual acumulada, y estos datos definirán los valores de la curva masa doble (Figura 13), apreciando que la consistencia de datos tiene un comportamiento casi lineal, por lo que no requiere de ajustes.



Estación	Estaciones auxiliares		Pp mensual promedio	Precipitación promedio mensual acumulada	Estación Base 16253	Precipitación promedio mensual acumulada
	16251	16165				
Enero	218.3	820.4	519.4	519.4	177.1	177.1
Febrero	96.8	181.3	139.1	658.4	131.5	308.6
Marzo	121.6	65.8	93.7	752.1	135.1	443.6
Abril	454.0	207.7	330.8	1082.9	646.1	1089.7
Mayo	1797.0	1924.4	1860.7	2943.6	2104.8	3194.6
Junio	3248.9	5596.6	4422.7	7366.3	2927.9	6122.4
Julio	4759.3	6349.2	5554.2	12920.6	4730.6	10853.0
Agosto	4601.6	5556.2	5078.9	17999.5	4481.2	15334.2
Septiembre	2942.3	4806.5	3874.4	21873.9	3126.6	18460.9
Octubre	1471.1	1997.1	1734.1	23607.9	1460.9	19921.8
Noviembre	340.9	535.5	438.2	24046.1	384.2	20306.0
Diciembre	224.7	218.8	221.7	24267.9	256.9	20562.9
				X datos		Y datos

**Tabla 7.** Datos para realizar la curva masa doble y revisar la consistencia de datos existentes.



**Figura 13.** Curva masa para la revisión de consistencia de datos.



#### 7.4.3.4 Cálculo de precipitación media de la cuenca.

Ya con los datos agrupados, ordenados y revisados, se calcularon las precipitaciones medias de cada estación, y posteriormente, se emplearon tres métodos para cuantificar la precipitación media de la cuenca:

- Método aritmético
- Polígonos de Thiessen
- Isoyetas

##### a) Método aritmético.

Consiste en el cálculo de la precipitación media de cada estación, y posteriormente, realizar un promedio de las medias de las estaciones para poder definir la precipitación media de la microcuenca (Tabla 8).

Meses	Estaciones		
	16253	16251	16165
Enero	177.1	218.3	820.4
Febrero	131.5	96.8	181.3
Marzo	135.1	121.6	65.8
Abril	646.1	454.0	207.7
Mayo	2104.8	1797.0	1924.4
Junio	2927.9	3248.9	5596.6
Julio	4730.6	4759.3	6349.2
Agosto	4481.2	4601.6	5556.2
Septiembre	3126.6	2942.3	4806.5
Octubre	1460.9	1471.1	1997.1
Noviembre	384.2	340.9	535.5
Diciembre	256.9	224.7	218.8
Media	1713.6	1689.7	2354.9
Método aritmético	1919.4	mm	

Tabla 8. Precipitación media de la cuenca por el método aritmético.



$$hp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hpi \quad (17)$$

Donde:

n: Número de estaciones

hpi: Precipitación promedio en cada estación.

### **b) Polígonos de Thiessen.**

Este método consiste en trazar triángulos que ligan las estaciones utilizadas en el estudio hidrológico y, posteriormente formar polígonos cuyas caras son las líneas que bisectoras de los lados de los triángulos; se generan áreas de influencia de cada estación (Figura 14), para ulteriormente calcular la precipitación media de la cuenca obteniendo la suma del producto del área de influencia de cada estación por la precipitación de esa estación y, finalmente esa sumatoria dividirla entre el área total de la cuenca (Tabla 9).

$$hp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hpi \quad (18)$$

Donde:

Ai: Área de influencia de cada estación

hpi: Precipitación promedio en cada estación

At: Área total de la cuenca

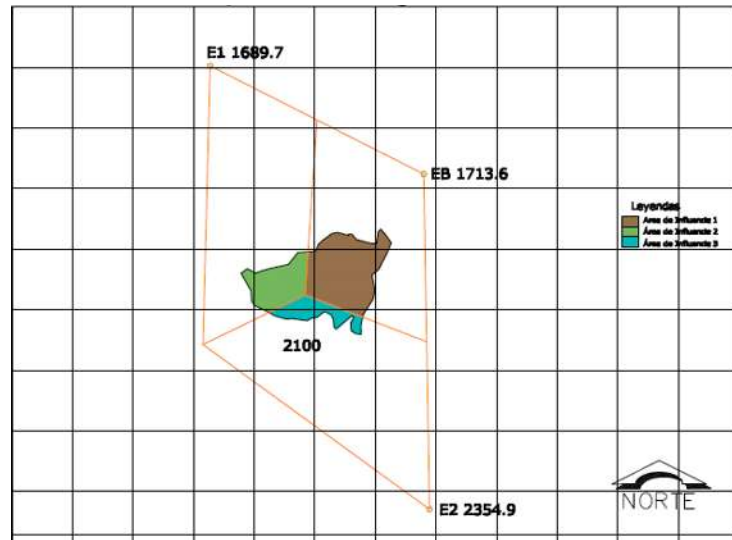


Figura 14. Polígonos de Thiessen

Estaciones	Pmedia	Áreas de influencia (km <sup>2</sup> )	Pmedia Thiessen(mm)
EB	1713.6	47.83901776	1810.5
E1	1689.7	23.03328507	
E2	2354.9	13.62763679	
	Área total=	84.49993962	

Tabla 9. Precipitación media de la cuenca por el método de polígonos de Thiessen

### c) Método de Isoyetas.

Con los datos de precipitación, se construye un plano de isoyetas, que son curvas que unen puntos de igual precipitación (Figura 15 y Tabla 10).

$$\overline{hp} = \frac{1}{At} \sum_{i=1}^n Ai \overline{hpi} \quad (19)$$

Donde:

Ai: Área de influencia entre isoyetas

hpi: Isoyeta promedio

At: Área total de la cuenca

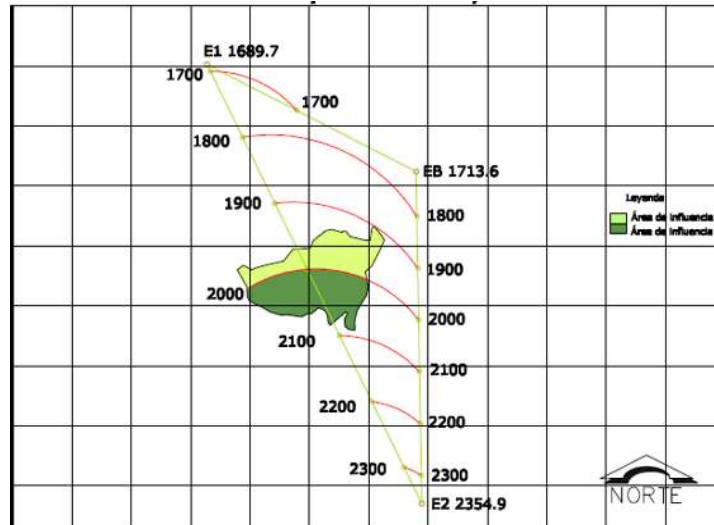


Figura 15. Método de Isoyetas

Área de influencia (km <sup>2</sup> )	Pmedia entre isoyetas (mm)	Pmedia Isoyetas (mm)
37.29238191	1950	2005.9
47.20755771	2050	
<b>84.49993962</b>		

Tabla 10. Precipitación media de la cuenca por el método de Isoyetas.

#### 7.4.4. Balance hídrico.

Debido a la ubicación espacial de las estaciones utilizadas para el estudio hidrológico las cuales podrían dar datos no significativos para el área de estudio debido a la lejanía de estas con la poligonal del proyecto y por ende la amplitud del parteaguas, fue necesario revisar modelos que permitieran estimar la precipitación incidente en la zona de estudio, la evapotranspiración en base a la temperatura registrada y, así estimar un balance hídrico que permita conocer el volumen de agua disponible que puede ser almacenada en el SCALL y posteriormente usar en la PFC.

Para estimar el balance hídrico teniendo como datos referenciales la precipitación y la temperatura media mensual de la estación climatológica



correspondiente; en este caso se utilizó como referencia la base de datos generada para las modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen realizadas por M.C. Enriqueta García (García, 2004), los cuales se sustentaron en información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Comisión Nacional del Agua (CNA) y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), recopilados y procesados por el Instituto de Geografía de la UNAM. Tanto la precipitación y la temperatura se basan en las medias mensuales de los datos disponibles de las estaciones y en un periodo de 1921-1995, expresados en milímetros (mm) y grados centígrados (°C) respectivamente.

Además en dicha base de datos incluye una columna con el cociente de precipitación total anual y la temperatura media anual (P/T), esta relación también es conocido como índice de humedad/aridez o Índice de Lang; se anexa una columna que representa el porcentaje de la precipitación (%P) recibida en los meses invernales (diciembre, enero, febrero, y marzo) con respecto a la precipitación total anual. La columna consecutiva contiene la diferencia entre temperatura del mes más frío y el más caliente es decir la oscilación anual de las temperaturas medias mensuales (Osc) y, por último la columna que incluye el clima de cada estación meteorológica según el sistema modificado (Tabla 11).

Para seleccionar la estación 16 032 localizada en las coordenadas, longitud -102°15´ y latitud 19° 38´ denominada con el nombre de Charapan, dicha estación se encuentra a 5865 metros del predio en estudio.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Temperatura (°C)	10.3	10.7	11.8	13.3	14.5	14.2	13.2	13.3	13.6	12.7	11.9	11.0	12.5
Precipitación (mm)	20.0	7.0	6.0	15.9	66.5	203.9	264.2	270.0	234.1	127.0	35.2	14.8	1264.6
<b>P/T</b>	<b>%PI</b>		<b>OSC</b>		<b>CLIMA</b>								
100.8	2.6		4.2		Cb(w2)(w)ig								

**Tabla 11.** Datos de la estación 16032 Charapan. Fuente: Enriqueta García (2004)



El conocimiento de la evapotranspiración potencial de un lugar del que se tienen registros de precipitación, permite establecer su balance hídrico anual. El balance de hídrico puede calcularse para masas de agua de cualquier tamaño, pero la complejidad del cálculo depende fundamentalmente de la extensión del área de estudio (Heras, 1981). Para el cálculo del balance hídrico, se utilizó la ecuación simplificada del balance hídrico (Gugk, 1964, citado en (Heras, 1981)

$$P - ETP - Q = 0 \quad (20)$$

Donde:

P: Precipitación

ETP: Evapotranspiración potencial

Q: Escurrimiento e infiltración

Por lo que esta ecuación podría reescribirse de la manera siguiente:

$$P - ETP = Es + I \quad (21)$$

Donde:

P: Precipitación

ETP: Evapotranspiración potencial

Es: Escurrimiento

I: Infiltración

Se utilizó el método de Thornthwaite con la corrección por insolación y/o radiación para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). Este método requiere calcular un índice de calor mensual (i) a partir de las temperaturas medias diarias del aire, aplicando la siguiente formula:

$$i = \frac{t^{1.514}}{5} \quad (22)$$

Donde:

i: Índice de calor mensual



t: Temperaturas medias

Posteriormente se calcula el índice de calor anual (I), como la suma de los doce valores del índice de calor mensual para meses teóricos de 30 días y doce horas diarios de sol. A partir de estos datos se propone la siguiente formula:

$$ETP_{SC} = 1.6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a \quad (23)$$

Donde:

$ETP_{SC}$ : Evapotranspiración potencial mensual sin corregir en mm/día

T: Temperatura media mensual en °C

I: Índice de calor anual

a= Función compleja de I igual a:  $a = (675 \times 10^{-9} I^3) - (771 \times 10^{-7} I^2) + (1.792 \times 10^{-5} I) + 0.49239$

Los valores de ETP obtenidos deben de corregirse en función de la duración del mes y el número de horas de insolación teórica, variables en relación a la latitud en que se encuentra la estación meteorológica que ha suministrado los datos (Aparicio, 1992). Para realizar la corrección se utilizará la tabla 12 y se interpolará la latitud de cada mes para obtener el factor con el cual se obtendrá la ETP corregida (formula 24).

$$ETP_C = ETP_{SC} * K_a \quad (24)$$

Donde:

$ETP_C$ : Evapotranspiración potencial mensual corregida en mm/día

$ETP_{SC}$ : Evapotranspiración potencial mensual sin corregir en mm/día

Ka: constante que depende de la latitud y el mes del año



Latitud Grados	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.93	0.91
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.8	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7

**Tabla 12.** Valores de Ka para corrección de ETP

Una vez calculada la ETP corregida se procederá a involucrar la precipitación media y aplicar la siguiente expresión:

$$DH = P - ETP_C \quad (25)$$

Donde:

DH: Disponibilidad hídrica

P: Precipitación media mensual de n mes

$ETP_C$ : Evapotranspiración mensual corregida de n mes

En el cual si se compara la ecuación 21 con la 25, se parte de la hipótesis de que la disponibilidad hídrica es igual a la suma de la escorrentía y la infiltración incidente en la zona de estudio; por lo tanto si la precipitación es mayor a la ETP se asume que hay un superávit de agua, caso contrario si la ETP es mayor a la precipitación se estaría en un escenario de déficit hídrico (Ordoñez, 2011).



## 7.5 Clasificación taxonómica del suelo en la microcuenca de estudio.

La identificación del suelo en el área de estudio, podría tener una influencia preponderante en la toma de decisiones para elegir el sistema de captación de agua de lluvia, por lo que es pertinente tener los datos que indiquen las características necesarias para la selección del diseño SCALL.

Se tomará la información generada por Alcalá, Ortiz y Gutiérrez (2001), donde se realizó una clasificación taxonómica de los suelos de la Meseta Purépecha, evaluando el régimen de humedad del suelo de acuerdo con la relación precipitación/temperatura y se generó la información requerida de 14 suelos de la Meseta, con los sistemas de clasificación recientes y, posteriormente comparados con los resultados publicados por la DGG (1983).

Las características del perfil numero 4 (Tabla 13 y 14) situado en las coordenadas, latitud norte 19°38'19" y longitud oeste 102°15'09", localizado en el municipio de Charapan son las siguientes:

<b>Isoyetas de precipitación</b>	Entre 1200 y 1500 mm
<b>Precipitación (P)</b>	1265 mm
<b>Temperatura ambiental (T)</b>	15 C
<b>Relación P/T</b>	84.3
<b>Régimen de Humedad del suelo (RH)</b>	Údico

**Tabla 13.** Características del sitio de muestreo en relación con las Isoyetas y el régimen de humedad (Alcalá et. al., 2001)



Horizonte genético Perfil 4	Espesor cm	Textura %			Dap g/cm <sup>3</sup>	Rh %		pH	Mo %
		A	L	R		Secado	Húmedo		
A	0-6	55	40	5	1.2	22	26	6.2	6.7
A	6-29	31	62	7	1.1	21	25	5.6	4.9
2A1	29-49	23	70	8	1.2	29	39	6.1	5.5
2A2	49-70	29	62	9	<1.0	33	47	6.4	4.3

Horizonte genético Perfil 4	CIC Cmol/kg	SB	RF	Al	Fe	Al+1/2 Fe	VV	Alof
		%						
A	30	43	95	4.1	2.9	5.6	22	16
A	32	31	90	4.5	3.7	6.4	7	18
2A1	75	13	99	5.6	1.4	6.3	25	22
2A2	65	9	98	5.8	5.2	8.4	45	23

**Tabla 14.** Principales propiedades del suelo (Álcala, et. al., 2001) A= Arena. L=Limo. R=Arcilla. Dap=Densidad aparente. RH= retención de humedad a 1500 KPa. MO= Materia Orgánica. CIC=Capacidad de Intercambio Catiónico. SB= Saturación de Bases. RF= Retención de Fósforos. VV= Vidrio Volcánico. Al= Aluminio. Fe= Hierro. Alof= Alofano.

La clasificación de suelos resultante siguiendo los lineamientos de la Taxonomía de Suelos del departamento de agricultura de Agricultura de los Estados Unidos, es del Orden Andisol, Suborden Udand, gran grupo Hapludand y subgrupo Typic Hapludand. En relación a su retención de humedad y pertenecer al Suborden Udand, presentan una alta retención de humedad a 1500 KPa del 62%. Así mismo al subgrupo Typic son catalogados como suelos simples caracterizados por sus propiedades ándicas.

En la clasificación FAO-UNESCO (1970) el perfil es descrito como regosol dístico, sin embargo con la versión FAO-UNESCO-ISRIC (1988) se denominó con la subunidad Andosol úmbrico.



Desde la Clasificación de la WRB (1998) resultó el perfil 4 a nivel unidad en un Andosol vítrico, subunidad Andosol háplico. Y finalmente con respecto a la clasificación del INEGI basados en las cartas edafológicas DGG (1983) el perfil se cataloga como Andosol húmico.

Para fines de la investigación, es necesario asociar el resultado de las diferentes clasificaciones taxonómicas del suelo ya realizadas, en éstas el suelo Andosol es el común denominador y se tomará como base de referencia la clasificación WRB (1998),

### **7.5.1 Características físicas y químicas del suelo**

La productividad del suelo está determinada por el conjunto de sus características tanto físicas como químicas, que expresan la relación entre el suelo, el agua y las plantas que lo soportan (Gayosso & Alarcón, 1999).

El manejo integral de las plantaciones forestales demanda la búsqueda de métodos que incrementen la productividad para satisfacer a cabalidad las necesidades de la industria y lograr así un desarrollo sostenible del sector forestal. Un área de estudio deficiente aún es el desconocimiento de la fertilidad del suelo y, por consiguiente de su manejo, y de esta manera repercutir en una baja productividad de las plantaciones.

Por lo tanto, la relación suelo-planta es un área importante para el manejo silvícola, esta involucra la disponibilidad de nutrientes presentes en el suelo, teniendo en cuenta las demandas de la planta para realizar un metabolismo eficiente (Escobar, 2013).

Los parámetros analizados (Tabla 15) están definidos por los objetivos planteados en la presente investigación, por lo que las propiedades físicas y químicas resultantes se discutirá si repercutirán en el diseño del SCALL y en la selección de especie de la PFC.



Tanto el muestreo y el análisis de los parámetros requeridos se sustentaron en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Es necesario identificar los horizontes genéricos del perfil para poder obtener las muestras de suelo a analizar; de cada estrato se requiere extraer dos muestras para evitar algún error significativo en los parámetros además de etiquetar correctamente cada muestra.

Antes de caracterizar y realizar los parámetros, las muestras requieren secarse a temperatura ambiente y dividir cada muestra en dos partes, una con los agregados sin alterar y, la segunda se deberá disgregar completamente. La muestra disgregada es necesario tamizarla por una malla de 2 mm, se vuelven a guardar las muestras en bolsas que el etiquetado pertinente (Ayala, González, Alcalá, & Rosas, 2014).

Parámetro	Método/Prueba/Norma
Textura	As-09/ NOM-021-RECNAT-2000
Densidad Aparente	Método del cilindro
Humedad de campo	AS-05/ NOM-021-RECNAT-2000
pH	AS-02/ NOM-021-RECNAT-2000
Materia Orgánica	AS-07/ NOM-021-RECNAT-2000
Punto de marchitez permanente	En función de la textura
Capacidad de campo	En función de la textura
Agua disponible	En función de la textura

**Tabla 15.** Parámetros físicos y químicos de suelo a analizar

### 7.5.2 Ecuación universal de pérdida del suelo.

Proporciona un cálculo de la media de la pérdida anual de suelo de tierras arables bajo diversas condiciones de cultivo (Hudson, 1997). La aplicación de este método tiene por objeto dar a los agricultores y a los técnicos en conservación de suelos la



posibilidad de elegir combinaciones de usos de tierra, prácticas de cultivo y de conservación del suelo.

El riesgo de erosión o erosión potencial se define por el efecto combinado de los factores causales del fenómeno, la lluvia, escurrimiento, suelo y topografía; por lo que se sugiere utilizar la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (Wischmeier y Smith 1965, 1978; citado en (Montes, Uribe, & García, 2011))

$$E = R * K * LS * C * P \quad (26)$$

Donde:

E: Erosión del suelo (ton/ha año)

R: Erosividad de la lluvia (Mj/ha mm/hr)

K: Erosionabilidad del suelo

LS: Factor de manejo con relación a la pendiente y la longitud

C: Factor de vegetación

P: Factor de prácticas mecánicas.

La erosividad (R) se puede estimar utilizando la precipitación media anual calculada en el balance hídrico, para posteriormente seleccionar la región correspondiente del mapa generado por Cortés en 1991 (Imagen 16), y se aplicará la ecuación cuadrática a la región correspondiente (Tabla 16).

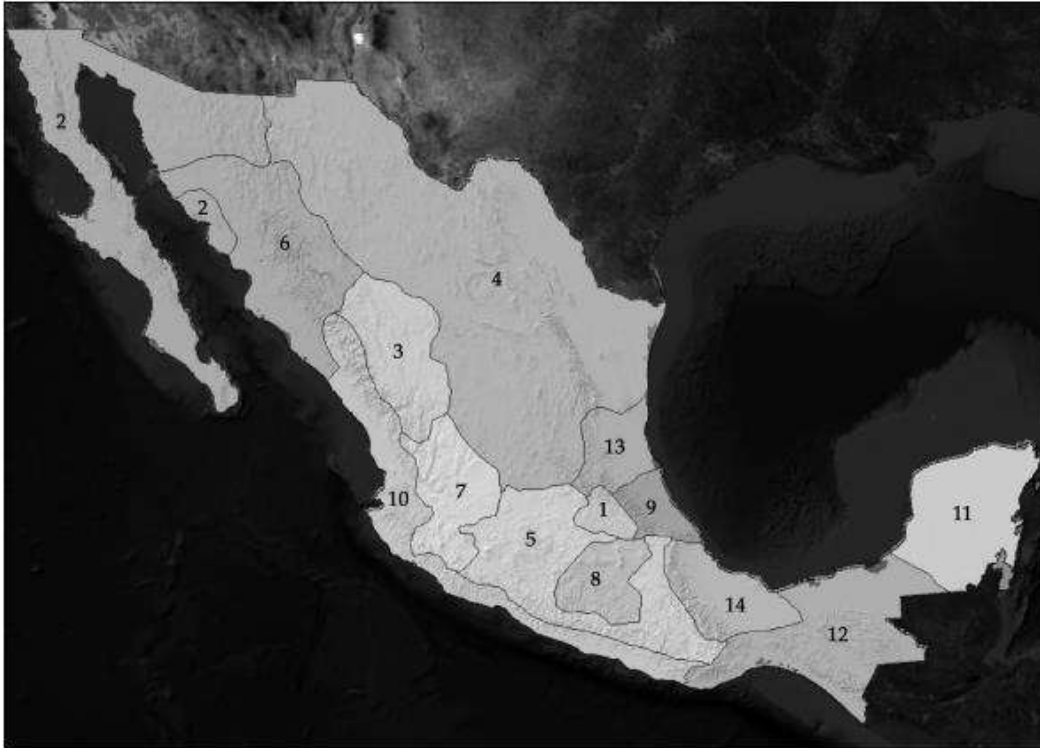


Figura 16. Regionalización nacional de factor R (Erosividad). Fuente Montes, Uribe y García, 2011

Región	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	$1.2078^*P + 0.002276^*P^2$	0.92
2	$3.4555^*P + 0.006470^*P^2$	0.93
3	$3.6752^*P - 0.001720^*P^2$	0.94
4	$2.8959^*P + 0.002983^*P^2$	0.92
5	$3.4880^*P - 0.000188^*P^2$	0.94
6	$6.6847^*P + 0.001680^*P^2$	0.90
7	$(-0.0334)^*P + 0.0061^*P^2$	0.98
8	$1.9967^*P + 0.003270^*P^2$	0.98
9	$7.0458^*P - 0.002096^*P^2$	0.97
10	$6.8938^*P + 0.000442^*P^2$	0.95
11	$3.7745^*P + 0.004540^*P^2$	0.98
12	$2.4619^*P + 0.006067^*P^2$	0.96
13	$10.7427^*P - 0.001008^*P^2$	0.97
14	$1.5005^*P + 0.002640^*P^2$	0.95

Tabla 16. Ecuaciones regionalizadas de factor R (Erosividad) para la República Mexicana.

La erosionabilidad (K), indica el grado de susceptibilidad del suelo a la erosión. Con datos de la textura del suelo y contenido de materia orgánica, es posible estimar la erosionabilidad (Tabla 17).



Textura	% de materia orgánica		
	0.0-0.5	0.5-2.0	2.0-4.0
Arena	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.01
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena migajosa	0.012	0.01	0.008
Arena fina migajosa	0.024	0.02	0.016
Arena fina muy migajosa	0.044	0.038	0.03
Migajón arenosa	0.027	0.024	0.019
Migajón arenosa fina	0.035	0.03	0.024
Migajón arenosa muy fina	0.047	0.041	0.033
Migajón	0.038	0.034	0.029
Migajón limoso	0.048	0.042	0.033
Limo	0.06	0.052	0.042
Migajón arcillo arenoso	0.027	0.025	0.021
Migajón arcilloso	0.028	0.025	0.021
Migajón arcillo limoso	0.037	0.032	0.026
Arcillo arenoso	0.014	0.013	0.012
Arcillo limoso	0.025	0.023	0.019
Arcilla	0.013-0.29		

**Tabla 17.** Valores de erosionabilidad de los suelos (K) estimado en función de la textura y el contenido de MO (Morgan, 1985).

La pendiente media del terreno se obtiene dividiendo la diferencia de elevaciones del punto más alto del terreno al más bajo, entre la longitud de estos puntos.

$$S = \frac{H_f - H_l}{L} * 100 \quad (27)$$

Donde:

S: pendiente media del terreno (%)

H<sub>f</sub>: Altura más alta del terreno (m)

H<sub>l</sub>: Altura más baja del terreno (m)

L: Longitud del terreno (m)

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



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

(28)

Donde:

LS: Factor de grado y longitud de la pendiente

$\lambda$ : Longitud de la pendiente

S: Pendiente media del terreno

m: Constante (0.5)

El factor de protección de la vegetación (C), refleja el efecto de la vegetación y las practicas del manejo en las tasas de erosión. Se trata del factor usado con más frecuencia para comparar el efecto relativo de diferentes opciones de manejo de un plan de conservación (Montes, Uribe y García, 2011). Dicho factor se tomará de la tabla 18.

Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarín	0.01
Bosque de cedro	0.01
Bosque de encino	0.10
Bosque de encino-pino	0.01
Bosque de galería	0.10
Bosque de cyamel	0.01
Bosque de pino	0.01
Bosque de pino-encino	0.01
Bosque de tascate	0.01
Bosque de mesofilo de montaña	0.01
Chaparral	0.65
Manglar	0.10
Matorral crasicaule	0.65
Matorral de coníferas	0.20
Matorral desértico microfilo	0.25
Matorral desértico rosetofo	0.25
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45
Matorral rosetofo costero	0.25
Matorral sarcocaulo	0.25
Matorral sarco-crasicaule	0.25
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25
Matorral submontano	0.35
Matorral subtropical	0.12
Mezquital	0.65
Palmar inducido	0.75
Palmar natural	0.75

Vegetación y/o uso de suelo	C
Pastizal gipsofilo	0.25
Pastizal halofilo	0.25
Pastizal inducido	0.02
Pastizal natural	0.07
Popal	0.85
Pradera de alta montaña	0.06
Sabana	0.54
Sabanoide	0.54
Selva alta perennifolia	0.45
Selva alta subperennifolia	0.45
Selva baja caducifolia	0.50
Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Selva mediana caducifolia	0.45
Selva mediana perennifolia	0.45
Selva mediana subcaducifolia	0.45
Tular	0.10
Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Vegetación de dunas costeras	0.85
Vegetación de galería	0.85
Vegetación halófila	0.85
Zona urbana	0.005
Cuerpos de agua	1.0
Agricultura en riego	0.55
Agricultura de temporal	0.75
Agricultura de humedad	0.25

Tabla 18. Factor de vegetación y/o uso de suelo (Montes, Uribe y García, 2011)



Como última alternativa de reducir la erosión de los suelos se tiene el uso de prácticas de conservación de suelos, denominado factor de prácticas mecánicas (P), el cual se seleccionará de la tabla 19.

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

**Tabla 19.** Factor P utilizando diversas prácticas de conservación del suelo y agua

## 7.6 Calidad de agua del componente de captación del SCALL

La calidad de agua se expresa con base a sus propiedades físicas, químicas y biológicas en asociación con el material mineral y orgánico disuelto o en suspensión. El concepto calidad de agua, generalmente se define de acuerdo el uso que se le dará al líquido, pudiendo ser agua potable, para riego, para producción hidroeléctrica, etc.

Teniendo en cuenta que el aprovechamiento forestal es una de las variables de la investigación, es importante señalar que las cuencas cubiertas por bosques producen aguas de muy buena calidad por la alta capacidad de infiltración de los suelos forestales, bajas tasas de escorrentía superficial y la baja erosión (Stadmüller, 1994). Los suelos forestales son excelentes filtros naturales para el agua (Tarrant, 1970, citado en Stadtmüller, 1994).

Debido a los objetivos de la investigación, se plantea revisar la calidad del agua de lluvia captada por la hoya piloto instalada en el predio en cuestión, asumiendo que existirá un proceso de escurrimiento y ésta arrastrará sedimentos y



materia orgánica por las condiciones de degradación del suelo que facilitan la erosión hídrica y eólica. Sin embargo, en México no existe normatividad que regule la calidad del agua de lluvia, y aunado a ello tampoco existe normativa aplicable para la calidad de agua que tiene como finalidad el desarrollo de PFC

Es importante señalar que el volumen captado es proporcionado por la temporada de lluvias del lugar donde se pretenda instalar el SCALL, y que su uso del agua es proyectado para la época de estiaje. Por lo cual es recomendado realizar muestreos de la calidad del líquido al momento de ser captado y posteriormente al estar almacenada para su ulterior uso (Pizarro et al., 2015).

En el ámbito forestal la calidad de recurso hídrico comienza a monitorearse en los viveros, los cuales deben de contar con abundante provisión de líquido de calidad. El agua con características deficientes puede contener sales, iones tóxicos, contaminantes o fitopatógenos. Gutiérrez et al. (2016), menciona que parámetros como el pH, conductividad eléctrica, concentración de bicarbonatos, calcio, boro, magnesio, sulfatos, sodio y cloro deben analizarse en el agua utilizada como riego para los viveros forestales.

Por lo tanto, en la presente investigación el alcance de este apartado se basará en las siguientes normas mexicanas: NOM-127-SSA1-1994 y la NOM-001-SEMARNAT-1996, y generando datos únicamente de referencia, para desarrollar futuras investigaciones con respecto a la calidad de agua de lluvia de hoyas de agua que puedan ser utilizadas para aprovechamiento forestal. Cabe señalar que parámetros como contenido de sedimentos, materia orgánica, pH, contenido de fósforo y de nitrógeno podrían ser datos útiles para el diseño del SCALL y también aportar información en el tipo de especie y condiciones del diseño de la plantación forestal comercial (Tablas 20, 21 y 22).



Parámetro	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala platino-cobalto
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Tabla 20. Parámetros físicos a evaluar de la NOM-127-SSA1-1994

Parámetro	Límite permisible
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5 a 8.5
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400.00

Tabla 21. Parámetros químicos a analizar, basados en la NOM-127-SSA -1994

Características
Temperatura
Conductividad eléctrica
Oxígeno disuelto
Acidez
Alcalinidad total (como CaCO <sub>3</sub> )
Sólidos totales
Sólidos suspendidos totales
Sólidos fijos totales

Tabla 22. Parámetros físicos y químicos adicionales a la NOM-127-SSA -1994 para analizar

Es importante señalar que el uso del agua captada por el SCALL será destinada para la PFC, por lo que la norma citada anteriormente es referida el agua utilizada para consumo humano, en ella se establecen los límites máximos



permisibles y el tratamiento al que debe someterse para su potabilización, debido a lo anterior se eligió de referencia ya que no existe una norma que reglamente el ámbito forestal. Los parámetros caracterizados de esta norma fueron solamente el de color, turbiedad, cloruros, dureza total, pH, sólidos disueltos totales, sulfatos, cloro residual, conductividad eléctrica, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura, acidez, alcalinidad, DQO, sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos fijos totales.

En relación con la NOM-001-SEMARNAT-1996 es considerada debido a que se instaló una hoyo piloto en la poligonal de estudio, el cual podría considerarse como un embalse artificial, los contaminantes que podrían llegar a dicho componente de almacenamiento del SCALL sería por el proceso de escorrentía, el cual podría arrastrar sedimentos y contaminantes de actividades agrícolas aledañas a la zona de estudio. En este caso los parámetros analizados fueron la temperatura, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total y fósforo total (Tabla 23).

<b>Límites máximos permisibles para contaminantes Básicos</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Embalses naturales y artificiales</b>	
	<b>Uso en riego agrícola</b>	
	<b>P.M</b>	<b>P.D</b>
<b>Miligramos por litro, excepto cuando se especifique</b>		
Temperatura °C	40	40
Grasas y aceites	15	25
Materia flotante	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2
Sólidos suspendidos totales	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	75	150
Nitrógeno Total	40	60
Fósforo total	20	30

**Tabla 23.** Parámetros de evaluación de la NOM-001-SEMARNAT-1996

P.M = promedio mensual, P:D= promedio diario

## 8. RESULTADOS.

### 8.1 Resultados de la situación del recurso hídrico en SFH

La muestra de la encuesta aplicada fue de 50 familias interceptadas en su domicilio, interrogando a un solo miembro de ésta, tomando en cuenta la mayoría de edad y el conocimiento de la información solicitada. Al basar la encuesta en tres de los cinco componentes que sustentan el Índice de prosperidad del agua (Sullivan et al., 2003), se obtuvieron los siguientes resultados conforme los objetivos establecidos en la presente investigación.

La fuente de abastecimiento dominante en la localidad es la red de agua potable con el 84% del total de la muestra, sin embargo es relevante señalar que paralelamente los SCALL tienen una incidencia importante en la población con un total de 37 familias que cuentan con estos sistemas como una fuente alterna de agua para satisfacer sus necesidades (Figura 17).

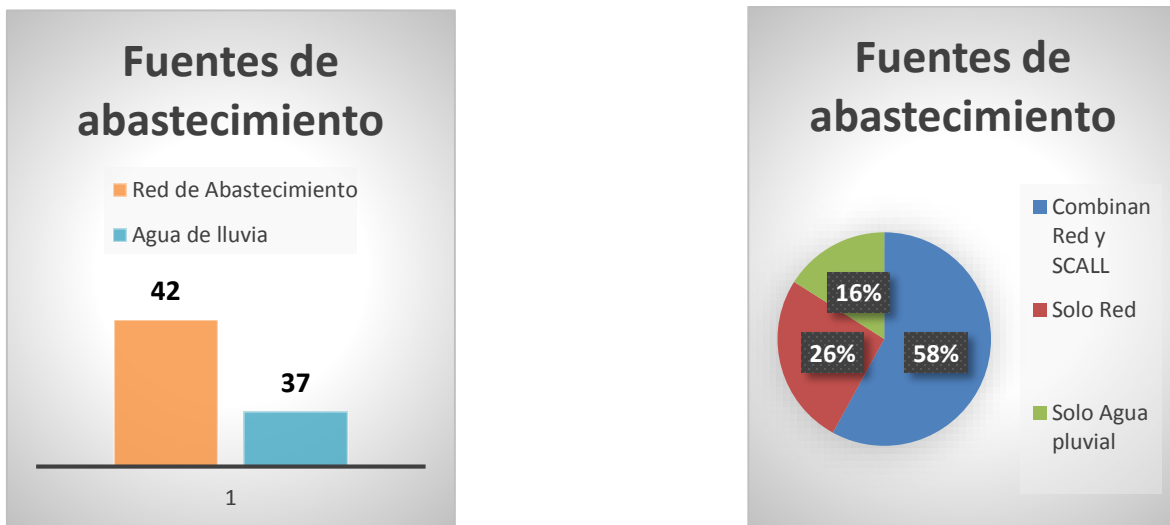


Figura 17. Fuentes de abastecimiento de agua para la localidad de San Felipe de los Herreros

Es importante señalar que de los 37 SCALL instalados 32 fueron financiados y construidos por la fundación Pro Mazahua en el año 2014, los cuales tenían la

finalidad de instalar el sistema para dotar de agua a un sistema de microtúneles, en el cual los dueños sembraron diferentes vegetales como cilantro, jitomate, rábanos y lechugas. A pesar de que la fundación capacitó a los propietarios de los SCALL para su mantenimiento, un 19% de los SCALL instalados funcionan parcialmente o ya no están operando (Figura 18). Los principales problemas de operatividad están relacionados con filtros saturados, los canales de conducción tapados o desarticulados y pequeñas grietas en la cisterna de ferrocemento.

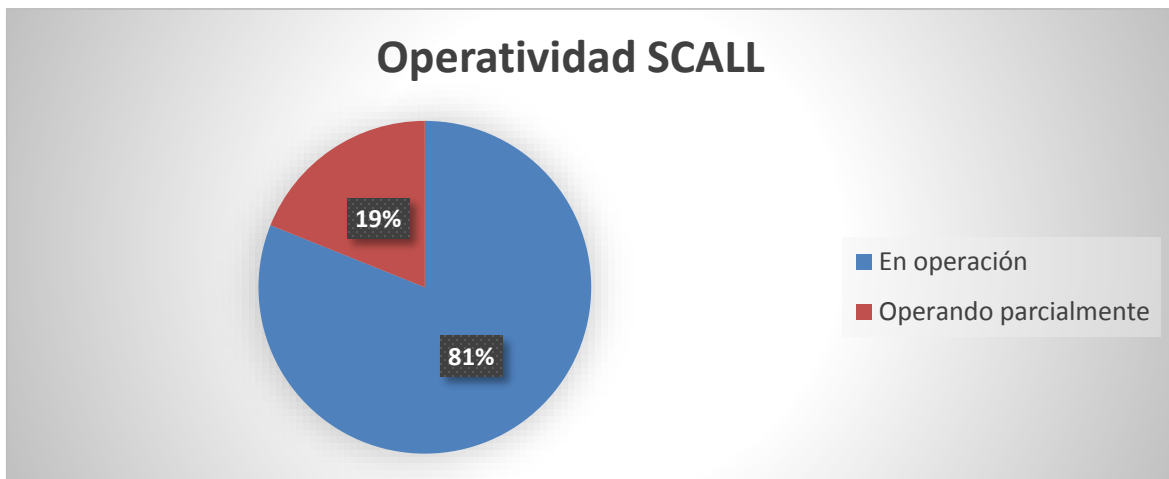
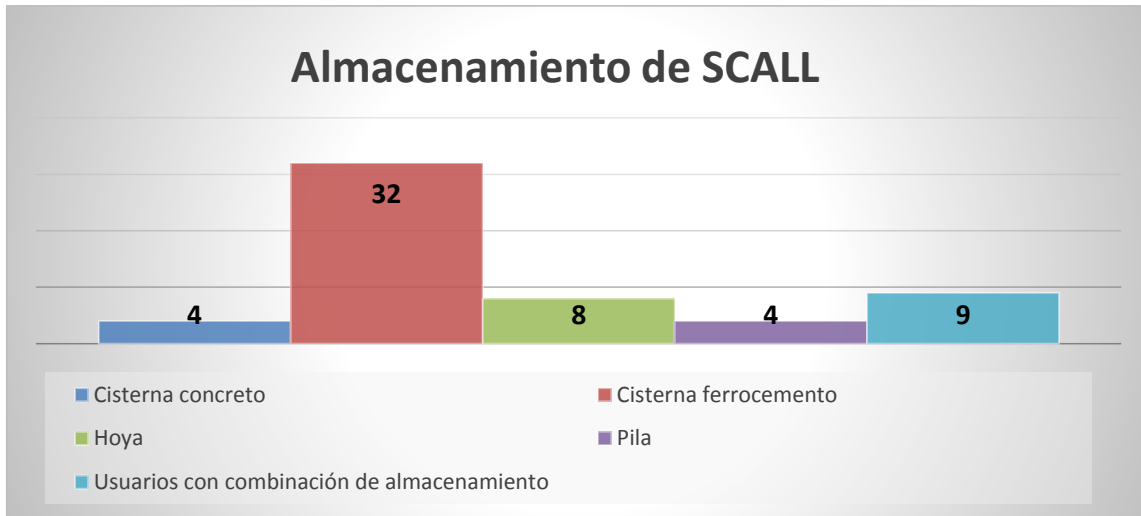


Figura 18. Operatividad de SCALL instalados en la localidad SFH

Los tipos de almacenamientos para los SCALL son de diferentes capacidades y materiales (Figura 19), resultando los fabricados de ferrocemento con una capacidad de 15 000 litros los cuales predominan en las familias encuestadas con un 64% del total de la muestra; otro dato significativo fue la captación de agua de lluvia a través de hoyas utilizando geomembrana de alta densidad y, por último, con un 8% se encuentra el almacenamiento en pilas y cisternas de concreto.



**Figura 19.** Tipos de almacenamiento de los SCALL en SFH

Los usos del agua en la localidad están regidos por las actividades humanas y, en segundo plano por las económicas, la agricultura de temporal es la actividad productiva con mayor porcentaje, sin embargo no requieren del uso de agua de la red que abastece a la localidad. En tanto el sistema de microtúneles con una presencia de 48% dependen directamente del agua que es captada por los sistemas SCALL, además los usuarios reportan que esta agua también es utilizada para las necesidades de limpieza y hasta consumo, cuando la red de agua existente tiene problemas de distribución.

El sector pecuario con un porcentaje de 48% de la muestra abastece de manera híbrida las necesidades de sus animales, siendo la fuente preferencial la red de agua existente y, en menor medida, el agua captada por las pilas que representa el 8% del tipo de almacenamiento (Figura 20).

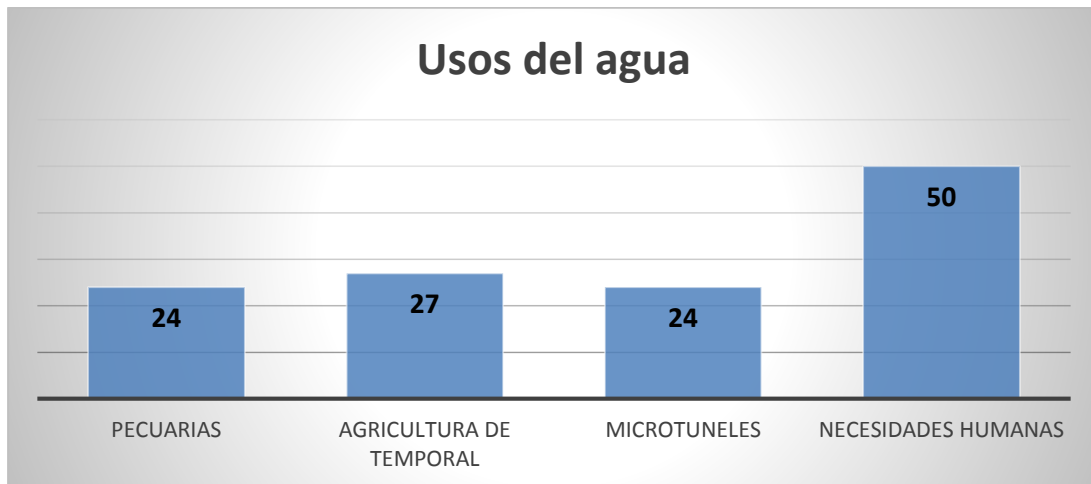


Figura 20. Usos del agua en SFH

Existe el desarrollo prematuro de huertas de aguacate en la localidad, en donde los propietarios buscan satisfacer la gran necesidad hídrica de las plantas a través de hoyas de captación; sin embargo aún estas plantaciones no logran un clímax de productividad. Otro rubro en el cual la localidad incursiona es en programas de índole forestal, tanto comerciales y de restauración de cuencas, en donde hasta la fecha aún son pocas las hectáreas con esta finalidad (Figura 21).

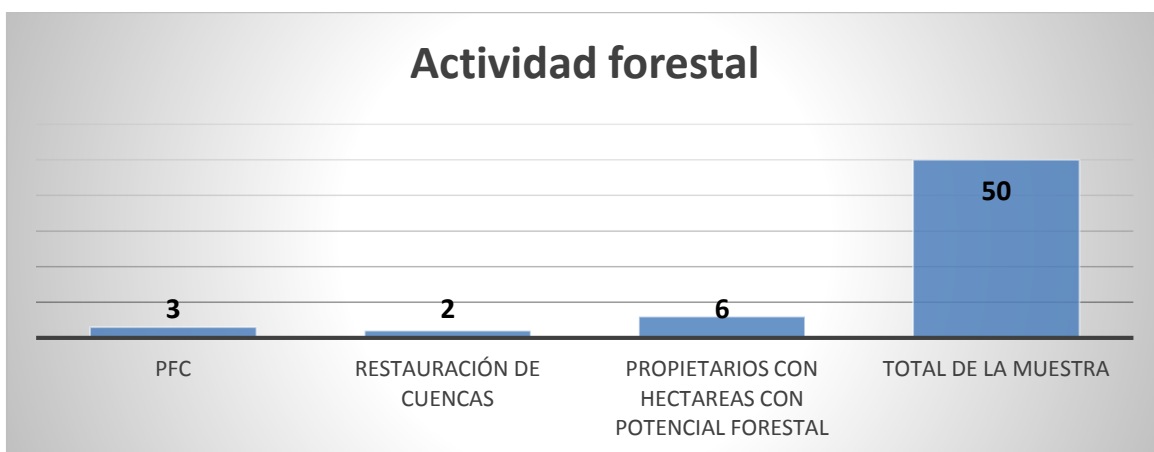


Figura 21. Actividad forestal en SFH



## 8.2 Resultados del estudio hidrológico

Los resultados sobre el estudio hidrológico se muestran en la siguiente Tabla 24, con estos datos se puede conocer las características generales de la microcuenca y que permiten conocer la dinámica hidrológica de la zona de estudio.

<b>Geomorfología de la cuenca</b>			
<b>Clasificación por tamaño</b>	Microcuenca	<b>Orden de la cuenca</b>	4
<b>Tipo</b>	Arreica	<b>Densidad de corrientes</b>	1
<b>Área</b>	84.5 km <sup>2</sup>	<b>Densidad de drenaje</b>	2.44
<b>Longitud del cauce principal</b>	20.286 Km	<b>Pendiente del cauce principal</b>	11%
<b>Longitud del eje mayor de la cuenca</b>	14.622 Km	<b>Pendiente media de la cuenca</b>	
<b>Ancho del eje mayor de la cuenca</b>	10.394 Km	Aritmético	12.54%
<b>Coefficiente de Compacidad</b>	1.44	Geométrico	12.32%
<b>Relación de elongación</b>	0.7	<b>Elevación de la cuenca</b>	
<b>Grado de bifurcación</b>		1er criterio	2409.48 m
Rb1	3.32	2do criterio	2317.9 m
Rb2	4.16	3er criterio (Simsons)	2407.42 m
Rb3	6		

Tabla 24. Características geomorfológicas de la microcuenca



En lo que respecta al cálculo de la precipitación media, se puede apreciar una diferencia significativa entre los métodos, aritmético, polígonos de Thiessen e Isoyetas. Sin embargo, es importante señalar que el valor se rige por la metodología de cada uno de ellos, por ejemplo en el de polígonos de Thiessen, toma mayor peso en este caso la Estación base por el área de influencia resultante, siendo esto algo lógico al ser ésta la más cercana a la cuenca, y por tanto el resultado es muy similar a la media de la estación final (Tabla 25).

Método	Precipitación media (mm)
Aritmético	1919.4
Polígonos de Thiessen	1810.5
Isoyetas	2005.9

Tabla 25. Precipitaciones medias de la cuenca por los métodos planteados.

Un dato importante es que con la curva generada (Figura 22) se puede interpretar el tipo geológico presente en la cuenca en este caso, una cuenca sedimentaria en etapa de vejez. Sin embargo, en la parte final se puede observar características de una cuenca con un gran potencial erosivo, por su fase de juventud.

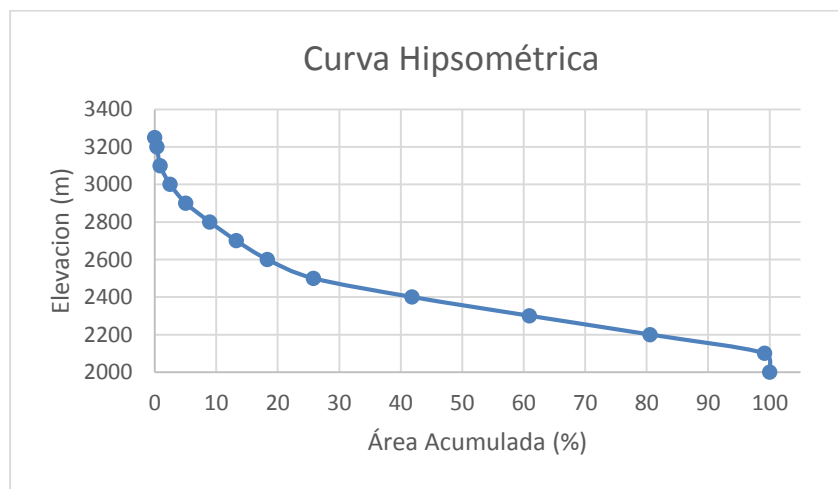


Figura 22. Curva hipsométrica.



Con los datos de temperatura media, se procedió a calcular la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite, aplicando la corrección de insolación y/o radiación aplicando las fórmula 22 para el índice de calor, la fórmula 23 para ETP sin corregir y la expresión matemática 24 para la ETP corregida (tabla 26).

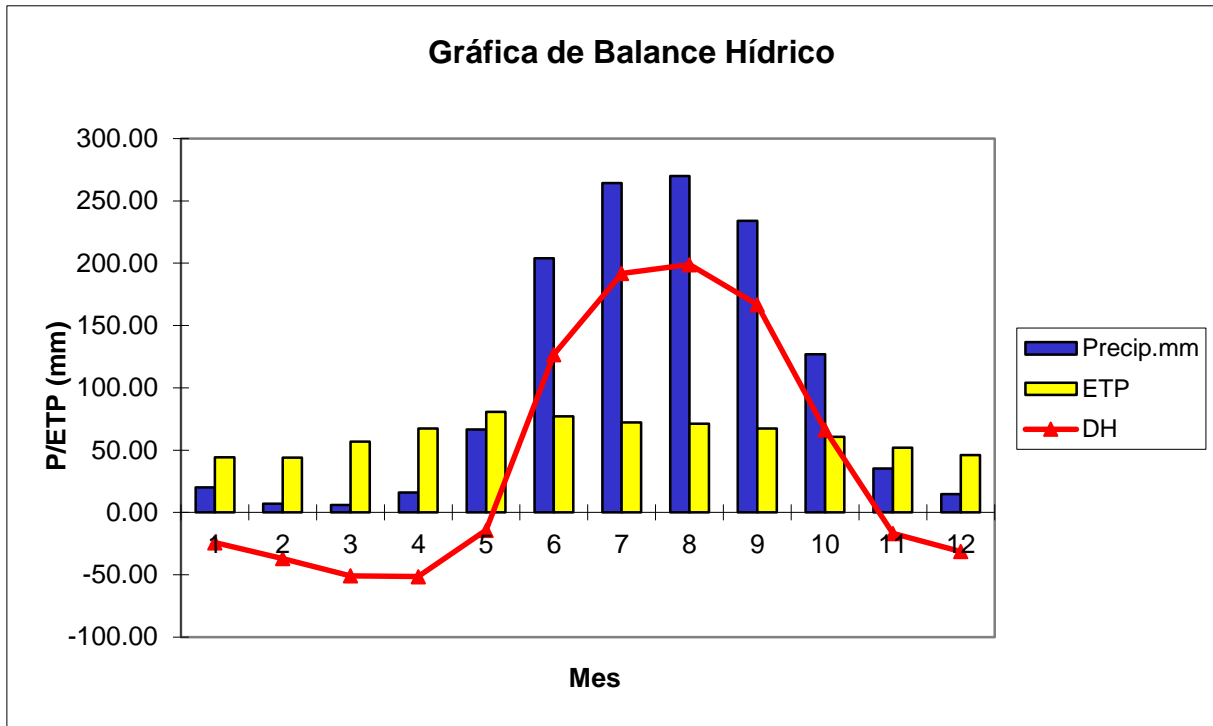
Mes	Índice de calor (ic)	ETP Sin corregir	ETP Corregida
Enero	2.99	4.65	44.30
Febrero	3.16	4.88	43.96
Marzo	3.67	5.52	56.87
Abril	4.40	6.42	67.34
Mayo	5.01	7.15	80.71
Junio	4.86	6.97	77.22
Julio	4.35	6.36	72.33
Agosto	4.40	6.42	71.14
Septiembre	4.55	6.60	67.32
Octubre	4.10	6.06	60.60
Noviembre	3.72	5.58	52
Diciembre	3.30	5.05	46.15
IC anual =	48.50	Total ETP SC 71.66	Total ETP C 739.96

Tabla 26. Calculo de ETP corregida

El balance hídrico de la zona de estudio, se conformó estableciendo la diferencia entre la precipitación mensual y la ETP corregida para conocer la disponibilidad hídrica mensual y los totales anuales de las variables (tabla 27).

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura (C°)	ETP (mm)	DH (mm)
Enero	20	10.3	44.30	-24.30
Febrero	7	10.7	43.96	-36.96
Marzo	6	11.8	56.87	-50.87
Abril	15.9	13.3	67.34	-51.44
Mayo	66.5	14.5	80.71	-14.21
Junio	203.9	14.2	77.22	126.68
Julio	264.2	13.2	72.33	191.87
Agosto	270	13.3	71.14	198.86
Septiembre	234.1	13.6	67.32	166.78
Octubre	127	12.7	60.60	66.40
Noviembre	35.2	11.9	52	-16.80
Diciembre	14.8	11	46.15	-31.35
<b>Total</b>	<b>1264.60</b>		<b>739.96</b>	<b>524.64</b>

Tabla 27. Balance hídrico de la zona de estudio



**Figura 23.** Balance hídrico de la zona de estudio

En la figura 23 se observa que en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre se presenta un déficit hídrico, debido a que la evapotranspiración potencial es mayor a los valores de precipitación media que presentan los meses mencionados. Sin embargo los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre la precipitación es mayor a la ETP. El valor de la precipitación media anual fue de 1264.60 mm, comparado con los 739.96 mm de la ETP la diferencia positiva deduce una disponibilidad hídrica total de 524.64 mm.

### 8.3 Resultados de los parámetros físicos y químicos del suelo.

El perfil de suelo se llevó a cabo en el sitio donde se pretende implementar la PFC el día 11 de junio del 2017, con una localización 19°36'56.66" N y 102°11'51.33" O. El sitio de excavación se realizó con una dimensión de 1.5 metros de ancho y 1.5 metros de largo, con una profundidad de 1 metro, utilizando herramientas manuales.

Se ejecutó un muestreo simple, con una profundidad de 1 metro requerida para caracterizar un perfil edafológico; sin embargo, es importante señalar que no

se realizará una clasificación del tipo de suelo de la zona de estudio, para ello se sustentará en la Carta edafológica generada por INEGI E13B29, en la cual la poligonal en estudio está situada en un suelo de tipo Andosol Mólico con características húmicas y una textura media ( $T_m+Th/2$ ), esta clasificación fue basada en la unidad de clasificación FAO/UNESCO 1970 modificada por Dirección de Estudios del territorio nacional (DETENAL).

Se levantaron 6 muestras en total incluida la repetición debido a que se pudieron identificar 3 horizontes genéricos, tomando en cuenta características de color, humedad y textura al tacto (ver figura 24 y 27). Para poder determinar la densidad aparente fue necesario aplicar el método de cilindro, debido al origen volcánico del suelo, este método consiste en introducir un cilindro metálico o de algún otro material en el suelo para posteriormente enrasarlo una vez extraído y determinar la masa de suelo que quedó en el interior del cilindro (Figura 25 y 26).



**Figura 24.** Perfil de suelo para obtención de muestras.



**Figura 25.** Extracción de muestras del perfil.



**Figura 26.** Método del cilindro para extraer muestra de Dap.



**Figura 27.** Perfil de suelo en SFH.

Las muestras obtenidas fueron de aproximadamente un kilogramo de material, a excepción de las muestras del cilindro las cuales son una masa de suelo de menor proporción de acuerdo al volumen del cilindro. Después del secado y el tamizado de las 6 muestras se obtuvieron los resultados publicados en la tabla 26 siguiendo el método correspondiente; los análisis se efectuaron en el laboratorio de



Edafología adscrito a la Facultad de Biología perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Horizonte	Espesor (cm)	Textura (%)			Dap (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad de campo %	pH 1:2.5	MO
		A	L	R				
Horizonte 1	0-38	54.4	28	17.6	1.12	16.2	6.28	3.261
Horizonte 1R	0-38	54.4	26	19.6	1.12	16.2	6.29	2.870
Horizonte 2	38-70	41	25.4	33.6	0.77	19.3	6.6	0.652
Horizonte 2R	38-70	54.4	28	17.6	0.79	19.3	6.31	3.000
Horizonte 3	70-94	41	25.4	33.6	0.61	27.72	6.33	4.435
Horizonte 3R	70-94	43	25.4	31.6	0.75	27.72	6.59	4.174

Horizonte	Clase textural	CC%	PMP%	AA%
Horizonte 1	Franco arenoso	18.1336	9.0668	9.0668
Horizonte 1R	Franco arenoso	19.0904	9.5452	9.5452
Horizonte 2	Franco arcilloso	28.7	14.35	14.35
Horizonte 2R	Franco arenoso	18.1336	9.0668	9.0668
Horizonte 3	Franco arcilloso	28.7	14.35	14.35
Horizonte 3R	Franco arcilloso	27.3272	13.6636	13.6636

**Tabla 28.** Resultado de las características físicas y químicas del suelo.

Donde A= arenas, L= limos, R= arcillas (Textura); Dap= densidad aparente; pH= potencial de hidrogeno; MO= materia orgánica; CC=capacidad de campo, PMP= punto de marchitez permanente y AA= agua disponible.

#### 8.4 Resultados de pérdida de suelo.

Se procedió a identificar las características del predio en donde se pretende diseñar el SCALL y PFC, para poder utilizar la ecuación general de pérdida de suelo.

El primer parámetro es el factor de erosividad de la lluvia, el cual es un elemento de tipo climático que indica el potencial erosivo de las precipitaciones. Tomando en cuenta el mapa de regionalización de erosividad (figura 16) se seleccionó la zona V y se procedió a utilizar la ecuación correspondiente de la tabla 16.



$$R = 3.4880P - 0.00088P^2$$

$$R = 3.4880(1264.60) - 0.00088(1264.60)^2$$

R=3003.61Mj/ha mm/hr

La erosionabilidad del suelo se obtuvo con los datos generados a partir del perfil de suelo realizado en la zona de estudio, el horizonte que se tomó en cuenta es el horizonte 1, con una clase textural franco arenosa, con un contenido de materia orgánica de 3.261, por lo que la erosionabilidad resultante es de 0.019 según la tabla 17. Este factor indica el grado de resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión.

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por las variables de longitud y grado de pendiente. Posteriormente se calculó la pendiente de la poligonal, el punto más alto tiene un registro de 2305 m.s.n.m. y el punto de menor valor 2257 m.s.n.m. y longitud de 319 metros, por lo que la pendiente resultante es de 15.04% aplicando la ecuación 27.

Si se conoce la pendiente y la longitud de la pendiente calculamos LS con la ecuación 28, dando como resultado 8.41.

Se puede calcular la erosión potencial con estos valores utilizando la ecuación 29.

$$E_p = K * R * LS \quad (29)$$

Dando como resultado una erosión potencial de 479.94 ton/ha/año, este dato se traduce que si no existiera cobertura del suelo y no se tienen prácticas de conservación del suelo y agua, se pierde una lámina de suelo de 47.94 mm considerando que 1mm de suelo es igual a 10ton/ha de suelo.



Si tomamos en cuenta la cobertura vegetal existente de tipo pastizal , se puede considerar como homogénea en la poligonal de estudio, con un valor de 0.20 según la tabla 16, el resultado de la pérdida por erosión del suelo sería de 95.98 ton/ha/año, aplicando la fórmula 26 sin tomar en cuenta el factor de prácticas mecánicas.

Por último se definieron dos escenarios, el primero con la práctica de terrazas individuales y terrazas de banco. El valor para poder utilizar la ecuación general de pérdida de suelo (Formula 26) se decidió tomar un valor de 0.80 para terrazas y 0.10 para terrazas de banco; utilizando la ecuación la pérdida de suelo es de 76.79 ton/ha/año para la práctica de terrazas individuales y 9.59 ton/ha/año para terrazas de banco.

## **8.5 Resultados de calidad de agua**

La recolección de agua de lluvia se realizó el día 24 de junio del 2017 de la hoyo piloto, la cual se situó en la excavación del perfil de suelo colocando una geomembrana de polietileno de alta densidad para poder captar y almacenar el agua de lluvia (Figura 28). Por lo tanto, tiene la misma localización que el perfil del suelo con las coordenadas 19°36'56.66" N y 102°11'51.33" O. El muestreo fue de tipo simple se almacenó y se conservaron las condiciones necesarias para su transporte y posterior análisis.

El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria perteneciente a la facultad de Ingeniería Civil adscrita a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo donde se obtuvieron los resultados de las tablas 29, 30, 31 y 32.



Parámetro	Límite Permissible*	Resultado	Método
Color	20 Pt-Co	75 FAU	NMX-AA-045-1981
Turbiedad	5.0 UTN	8 FAU	NMX-AA-038-SCFI-2001

**Tabla 29.** Resultado de los parámetros físicos de la NOM-127-SSA -1994

Parámetro	Límite Permissible*	Resultado	Método
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00	3.6868	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00	0	NMX-AA-072-SCFI-2001
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5 a 8.5	7.1	NMX-AA-008-SCFI-2011
Sólidos disueltos totales (mg/L)	1000.00	16.3	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=4</sup> )	400.00	7	NMX-AA-074-1981

**Tabla 30.** Resultados de los parámetros químicos de la NOM-127-SSA1-1994

\*Límite permisible según la NOM-127-SSA1-1994; expresado en mg/L excepto cuando se indique.

Parámetro	Resultado	Método
Temperatura (°C)	7.1	NMX-AA-007-SCFI-2013
Conductividad eléctrica (µS/cm)	35	NMX-AA-093-SCFI-2000
Oxígeno disuelto (mg/L)	3.38	NMX-012-SCFI-2001
Acidez (mg/L)	3	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad total (como CaCO <sub>3</sub> ) (mg/L)	10	NMX-AA-036-SCFI-2001
Sólidos totales (mg/L)	100	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	44	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos fijos totales (mg/L)	24	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos volátiles totales (mg/L)	76	NMX-AA-034-SCFI-2001

**Tabla 31.** Resultados de parámetros adicionales a la NOM-127-SSA1-1994

### Límites máximos permisibles para contaminantes Básicos

Parámetros Miligramos por litro, excepto cuando se especifique	Embalses naturales y artificiales	
	Uso en riego agrícola	
	Resultado	P.D
Temperatura °C	7.1	40
Grasas y aceites	ND	25
Materia flotante	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables (ml/l)	0	2
Sólidos suspendidos totales	44	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	95	150
Nitrógeno Total	11.9	60
Fósforo total	0	30

**Tabla 32.** Resultados de los parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-1996



**Figura 28.** Hoya piloto de captación.

## 8.6 Elementos de diseño del sistema de captación de agua de lluvia.

Mediante la metodología de Diseño Hidrológico del Terreno (DHT) y de los principios de Permacultura, se pretende establecer el diseño adecuado sin dejar de lado el concepto general que rige a los SCALL, los cuales contemplan componentes esenciales para el funcionamiento del sistema, enlistando el área de captación, tipo de almacenamiento, tratamiento de agua captada, elementos de filtrado, y componentes de distribución para el aprovechamiento del recurso (Figura 29).

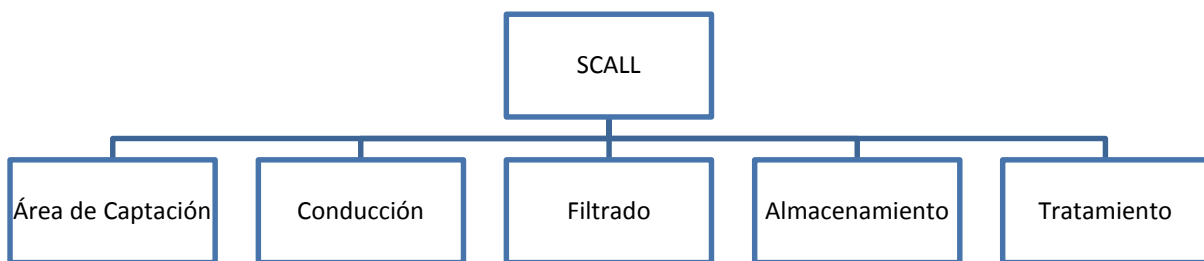


Figura 29. Componentes del SCALL.

Dentro del concepto de DHT y en los principios de Permacultura, se utiliza la definición de la línea clave “Keyline” para el diseño del terreno con la finalidad de manejar los recursos de agua y suelo de manera sustentable, aprovechando de mejor manera al agua de lluvia incidente en el predio y por consiguiente mejorando las condiciones del suelo tanto en fertilidad, estructura, control de erosión y la capacidad de almacenamiento (Holmgren, 2014).

La escala de permanencia es un concepto desarrollado por P.A. Yeomans y sirve para determinar la escala de prioridades al momento de rediseñar la topografía de un terreno. Esta escala está conformada por los elementos que integran el sistema del paisaje del predio definiendo como prioridades los siguientes factores en orden de importancia para definir el diseño (Gras, 2010):



1. Clima
2. Topografía
3. Agua
4. Caminos
5. Arboles
6. Construcciones
7. Subdivisiones
8. Suelo

Bajo estos elementos se diseñará el SCALL para el aprovechamiento en la PFC, tomando en cuenta que el factor clima es un factor inalterable pero condicionante para el diseño; mas sin embargo a pequeña escala el factor de la topografía se puede modificar en base a los principios de Permacultura para captar y almacenar agua, incrementando la fertilidad del suelo, por lo que este factor será el de mayor peso para el diseño.

El DHT con el método de línea clave, depende de un plano de curvas de nivel del terreno, ya que con esta herramienta es posible definir áreas de captación de agua de lluvia, zonas de cultivo, ubicar zonas de almacenaje de agua, definir los caminos y finalmente orientar el surcado o las líneas del flujo por escurrimiento de las precipitaciones, para que éstas capten la mayor cantidad de agua y se distribuya adecuadamente en el suelo (Cortés & Ramírez, 2013).

#### **8.6.1. Área de captación.**

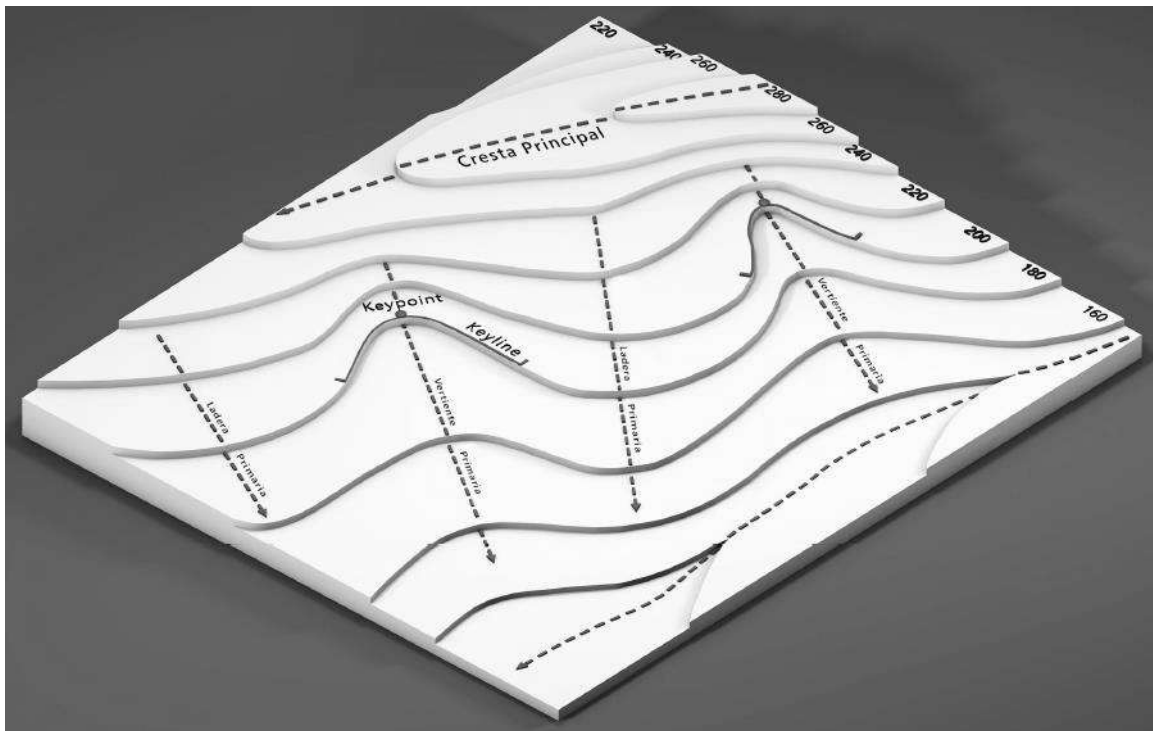
Se plantea establecer una hoya de captación aprovechando las condiciones topográficas del terreno, en un punto en el cual las pendientes converjan y se facilite de esta manera el almacenamiento del agua de lluvia que pudiese escurrir en el predio.

Es necesario disponer de cartografía que contenga las curvas de nivel del terreno, considerando una equidistancia entre curvas de un metro considerando la



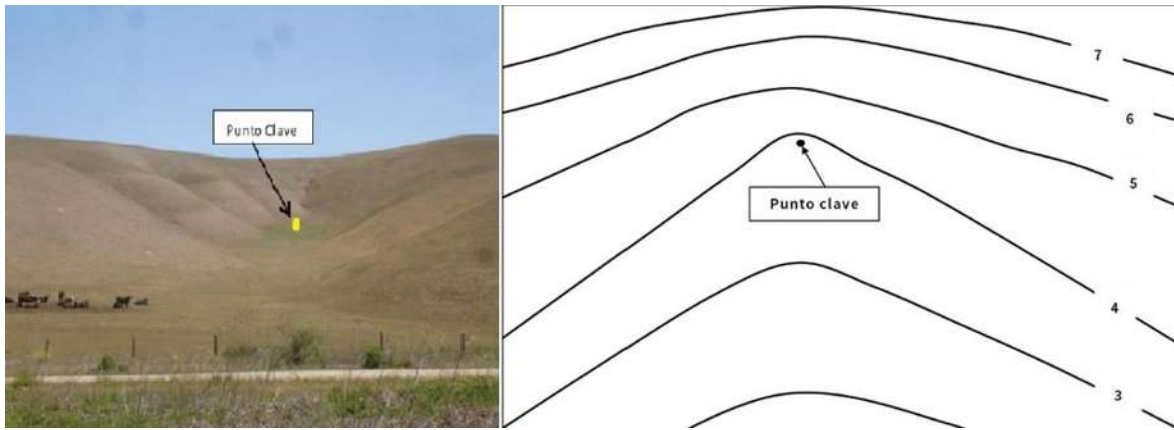
pendiente existente. Posteriormente es necesario identificar los valles que representan la parte del terreno por donde se concentraran los escurrimientos para conducirse a la parte más baja y las crestas primarias que son la parte alta del terreno por donde se transportaran los escurrimientos a los valles o zonas bajas del predio (Figura 30).

“Con el diseño hidrológico de terreno con el método de línea clave, este patrón natural de flujo de agua cambia; ahora el agua de lluvia tenderá a moverse hacia las partes altas del terreno, permaneciendo entonces más húmedas que en las condiciones naturales” (Cortés & Ramírez, 2013)



**Figura 30.** Identificación de los valles, crestas, línea clave y punto clave en base a las curvas de nivel del terreno. Fuente (Cortés & Ramírez, 2013)

Una vez identificada la dinámica hidrológica del terreno es necesario localizar el punto clave, y se identifica con un cambio abrupto de mayor a menor pendiente en la configuración del terreno, lo cual en un mapa topográfico se localiza donde las curvas de nivel cambian visiblemente la distancia entre sí (Figura 31).



**Figura 31.** Identificación de punto clave

Consecuentemente la curva de nivel que pasa por el punto clave, se denomina línea clave y es la base para desarrollar el DHT. La ubicación de estos dos elementos facilitará la ubicación espacial de la hoya de almacenamiento, y por ende el área de captación que abastecerá el volumen de dicho elemento.

El área de captación estará directamente relacionado con el volumen de agua de lluvia que demanda el proyecto. Además se identificó que la fuente primaria que abastecerá la hoya de almacenamiento serán los escurrimientos que se producen por la lluvia incidente que impacta en las partes altas del terreno (crestas).

El escurrimiento de agua de lluvia en un terreno está condicionado por el tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), intensidad, duración, cantidad y distribución de ésta, la pendiente, cobertura vegetal existente, el uso y las características químicas, físicas y biológicas del suelo (Pizarro et al., 2015).

Es posible estimar con un coeficiente de escurrimiento la cantidad de agua que puede ser captada por la zona destinada para este fin (Tabla 33).

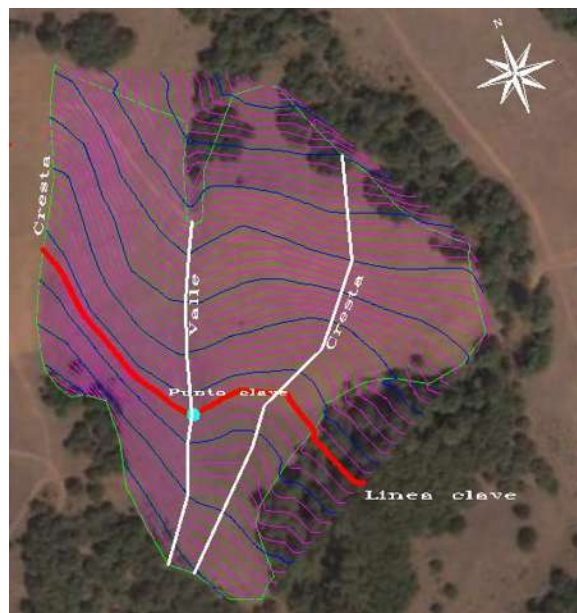
**Escurrecimientos de área de captación**

Precipitación Anual (mm)	Evaporación Anual Total (mm)	Suelos arenosos superficiales o limo arcilloso (%)	Suelos arenosos arcillosos (%)	Suelos arcillosos elásticos (%)	Suelos arcilloso inelásticos (%)
>1100		10 a 15	10 a 15	15 a 20	15 a 25
901 a 1100		10 a 12.5	10 a 15	12.5 a 20	15 a 20
501 a 900	<1300	7.5 a 10	7.5 a 15	7.5 a 15	10 a 20
501 a 900	1300 a 1500	5 a 7.5	6 a 12.5	6 a 10	10 a 15
401 a 500	1500 a 1800	2.5 a 5	6 a 10	2.5 a 5.7	7.5 a 12.5
250 a 400	<1800	0 a 2.5	0 a 5	0 a 2.5	2.5 a 7.5
250 a 400	>1800	0	0 a 2.5	0	2.5 a 5

**Tabla 33.** Escurremientos de áreas de captación para diferentes tipos de suelo (Doherty, 1988; citado en Gras, 2010).

**Resultados de área de captación.**

Una vez definido el punto clave del terreno, se eligió este dato como referencia espacial, aprovechando la altura para evitar el bombeo y por gravedad distribuir el líquido sobre el terreno (Figura 32).



**Figura 32.** Identificación de la línea clave, punto clave, valle y crestas del terreno.

Tomando en cuenta los resultados de las características físicas del suelo contenidas en la tabla 28, se determinó que el Horizonte 1 (H1) al ser el estrato superficial la textura incidente en el terreno es de tipo franco arenoso, por lo que le correspondería un porcentaje de escurrimiento de 15% con respecto a la información de la tabla 33.

El área total de captación que se delimitó tiene una extensión de 9488.25 m<sup>2</sup> (Figura 33), sin embargo es importante recalcar que los escurrimientos que se producen en la parte alta de la microcuenca tienen una aportación inevitable a la dinámica del terreno.

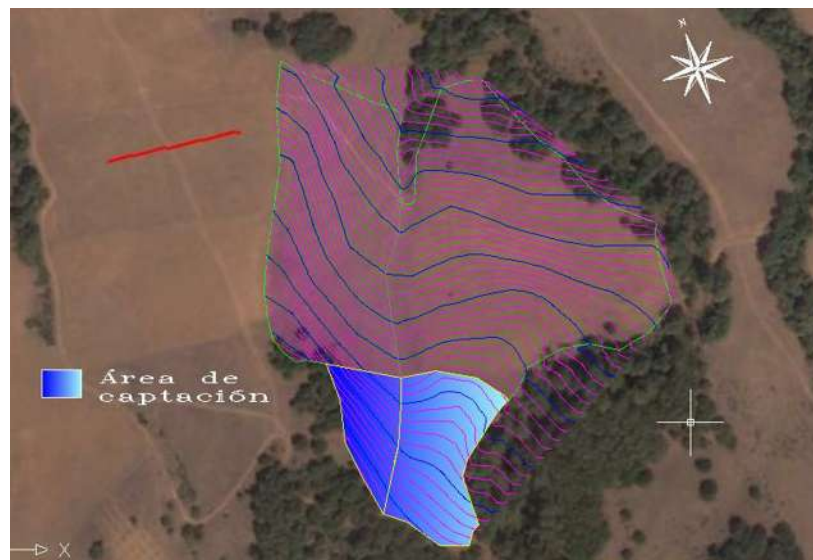


Figura 33. Área de captación.

### 8.6.2. Tipo de almacenamiento.

Corresponde al depósito donde se almacenará el agua y las dimensiones estarán condicionadas por el volumen de escorrentía aportado por el área de captación y la demanda de la PFC. El depósito o hoya de captación puede ser construida de diferentes materiales, los cuales serán elegidos por las condiciones de uso, aprovechamiento para el cual es proyectado el reservorio, el recurso económico,



tecnologías a implementar, dimensiones y características físicas del suelo; se pueden mencionar los siguientes materiales y tipos de cisterna:

- Estanque vertical de fibra de vidrio
- Estanque vertical de polietileno
- Estanque tipo australiano
- Hidroacumulador de PVC
- Excavación impermeabilizada con geomembrana
- Excavación impermeabilizada con concreto

La ubicación espacial es el resultado de los procesos de planeación, utilizando los principios de Permacultura y el DHT, utilizando de referencia las líneas clave y el punto clave del terreno (Gras, 2010).

### **Resultados tipo de almacenamiento.**

Se eligió para el diseño del SCALL una hoya de captación de agua, que por las características de infiltración del suelo Andosol, es necesario colocar en la base y los taludes una geomembrana HDPE de 1.5 mm de espesor para garantizar el almacenamiento de los escurrimientos del área de captación y evitar la lixiviación del volumen de agua al suelo.

Para determinar las dimensiones fue necesario realizar una modelación pluvial que incluya las variables de media de precipitación mensual, el coeficiente de escurrimiento, el área de captación y el consumo de la PFC.

Para estimar el volumen total del agua captada es necesario relacionar las variables anteriormente citadas y definir periodos semanales para poder definir las entradas de agua del sistema (Fórmula 30). Para la precipitación media mensual se tomarán los valores de la tabla 27, el área de captación es de 9488.25 m<sup>2</sup> y el coeficiente de escurrimiento está determinado por la textura del horizonte 1 del perfil

de suelo resultante, el cual es catalogado como franco arenoso y usando la tabla 33 se eligió un valor de 15% para la zona de captación de agua de lluvia.

$$V_{ac} = \frac{A * P_{mm} * C_e}{n} \quad (30)$$

Donde:

Vac: Volumen total de agua captada por semana (l)

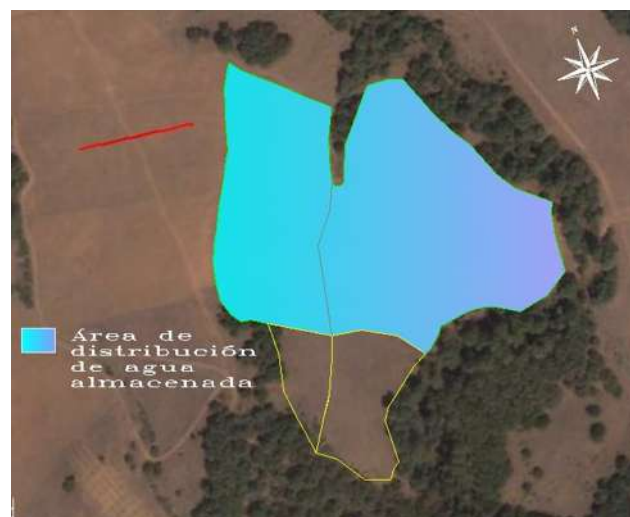
A: Área de captación (m<sup>2</sup>)

Pmm: Precipitación media mensual (mm)

Ce: Coeficiente de escurrimiento

n: Número de semanas en el mes de análisis

Será necesario para determinar el consumo de agua de la PFC, para lo cual se estableció el área neta en donde por gravedad se distribuirá el agua almacenada. En la zona de captación no se contempla el uso del volumen almacenado por encontrarse en la parte alta del terreno y sería necesario el bombeo para abastecer a los árboles plantados en esa región. Por lo que el número de plantas que se deben abastecer fue de 5509 distribuidas en una superficie de 42940.70 m<sup>2</sup> (Figura 34).



**Figura 34.** Distribución de agua almacenada por hoya de captación.



Tomando en cuenta el consumo diario y la frecuencia de riego, se ha establecido para la presente investigación un riego semanal de 5 litros para cada árbol, complementando la disponibilidad del recurso con las técnicas de conservación de suelo y agua se proponen terrazas individuales para cada árbol, el espaciamiento de tresbolillo entre cada planta y una plantación de contorno siguiendo las curvas de nivel.

Este riego se focalizará a partir del mes de octubre y hasta el mes de mayo, en donde se apreció una deficiencia en la disponibilidad hídrica de la zona con sustentó de la información generada por el balance hídrico efectuado, por lo que estos meses serían los que el SCALL abastecería a la PFC. Para conocer el consumo semanal de la plantación se empleará la siguiente fórmula:

$$Cs = Na * Ca \quad (31)$$

Donde:

Cs: Consumo semanal de la PFC (l)

Na: Numero de árboles

Ca: Consumo semanal destinado a cada árbol (l)

Para cuantificar el volumen de agua disponible al conocer el recurso que entra y es almacenado y posteriormente consumido por la PFC es aplicable la siguiente formula:

$$V_{hn} = V_{hn-1} + V_{acn} - C_{sn} \quad (32)$$

Donde:

V<sub>hn</sub>: Volumen de agua existente en la hoya de almacenamiento despues del riego de la PFC en determinada semana "n" (l)

V<sub>hn-1</sub>: Volumen de agua existente en la hoya de almacenamiento despues del riego de la PFC en la semana anterior "n-1" (l).

V<sub>acn</sub>: Volumen de agua captada por semana (l).



Csn: Consumo semanal de la PFC (l).

Se estimó un volumen máximo de almacenamiento de 550 000 litros para la siguiente modelación pluvial (Tabla 34).

MES	SEMANA	CAPTACIÓN AGUA (Vac) (Litros)	CONSUMO AGUA PFC (Cs) (Litros)	EXISTENCIA EN HOYA (Vhn) (Litros)
				0
Junio	1	72549	0	72,549
Junio	2	72549	0	145,099
Junio	3	72549	0	217,648
Junio	4	72549	0	290,198
Julio	1	94005	0	384,203
Julio	2	94005	0	478,208
Julio	3	94005	0	550,000
Julio	4	94005	0	550,000
Agosto	1	96068	0	550,000
Agosto	2	96068	0	550,000
Agosto	3	96068	0	550,000
Agosto	4	96068	0	550,000
Septiembre	1	83295	0	550,000
Septiembre	2	83295	0	550,000
Septiembre	3	83295	0	550,000
Septiembre	4	83295	0	550,000
Octubre	1	45188	27545	550,000
Octubre	2	45188	27545	550,000
Octubre	3	45188	27545	550,000
Octubre	4	45188	27545	550,000
Noviembre	1	12524	27545	534,979
Noviembre	2	12524	27545	519,959
Noviembre	3	12524	27545	504,938
Noviembre	4	12524	27545	489,918
Diciembre	1	5266	27545	467,639
Diciembre	2	5266	27545	445,360
Diciembre	3	5266	27545	423,081
Diciembre	4	5266	27545	400,802
Enero	1	7116	27545	380,373

Tabla 34. Modelación pluvial para SCALL considerando el consumo de la PFC.



MES	SEMANA	CAPTACIÓN AGUA (Vac) Litros	CONSUMO AGUA PFC (Cs) Litros	EXISTENCIA EN HOYA (Vhn) Litros
Enero	2	7116	27545	359,944
Enero	3	7116	27545	339,515
Enero	4	7116	27545	319,087
Febrero	1	2491	27545	294,032
Febrero	2	2491	27545	268,978
Febrero	3	2491	27545	243,924
Febrero	4	2491	27545	218,869
Marzo	1	2135	27545	193,459
Marzo	2	2135	27545	168,049
Marzo	3	2135	27545	142,639
Marzo	4	2135	27545	117,229
Abril	1	5657	27545	95,341
Abril	2	5657	27545	73,453
Abril	3	5657	27545	51,566
Abril	4	5657	27545	29,678
Mayo	1	23661	27545	25,794
Mayo	2	23661	27545	21,911
Mayo	3	23661	27545	18,027
Mayo	4	23661	27545	14,143

**Tabla 34.** Modelación pluvial para SCALL considerando el consumo de la PFC (Continuación).

La geometría de la hoya de captación estará determinada por el volumen máximo de almacenamiento del diseño SCALL, que en este caso es de 550 000 litros, para lo cual se propuso un volumen trapezoidal con taludes en las paredes perpendiculares al flujo de escorrentía de 2:1 y en el sentido del flujo con una relación 3:1.

El área rectangular de la base tiene 5 metros de ancho (sentido de la escorrentía) y 14 metros de largo (contra sentido de la escorrentía) con una profundidad de 2.5 metros, por lo que los taludes quedarían definidos en sentido del flujo en 5:2.5 metros y en contrasentido del flujo la relación del talud sería metros 7.5:2.5; en este sentido el área superior tiene 15 metros de ancho y 29 metros de largo (Figura 35). Aplicando la fórmula 33 la capacidad de almacenamiento de la hoya de captación es de 566.249 m<sup>3</sup> o 566 259 litros con lo cual se cumple el volumen de diseño propuesto en la modelación pluvial.

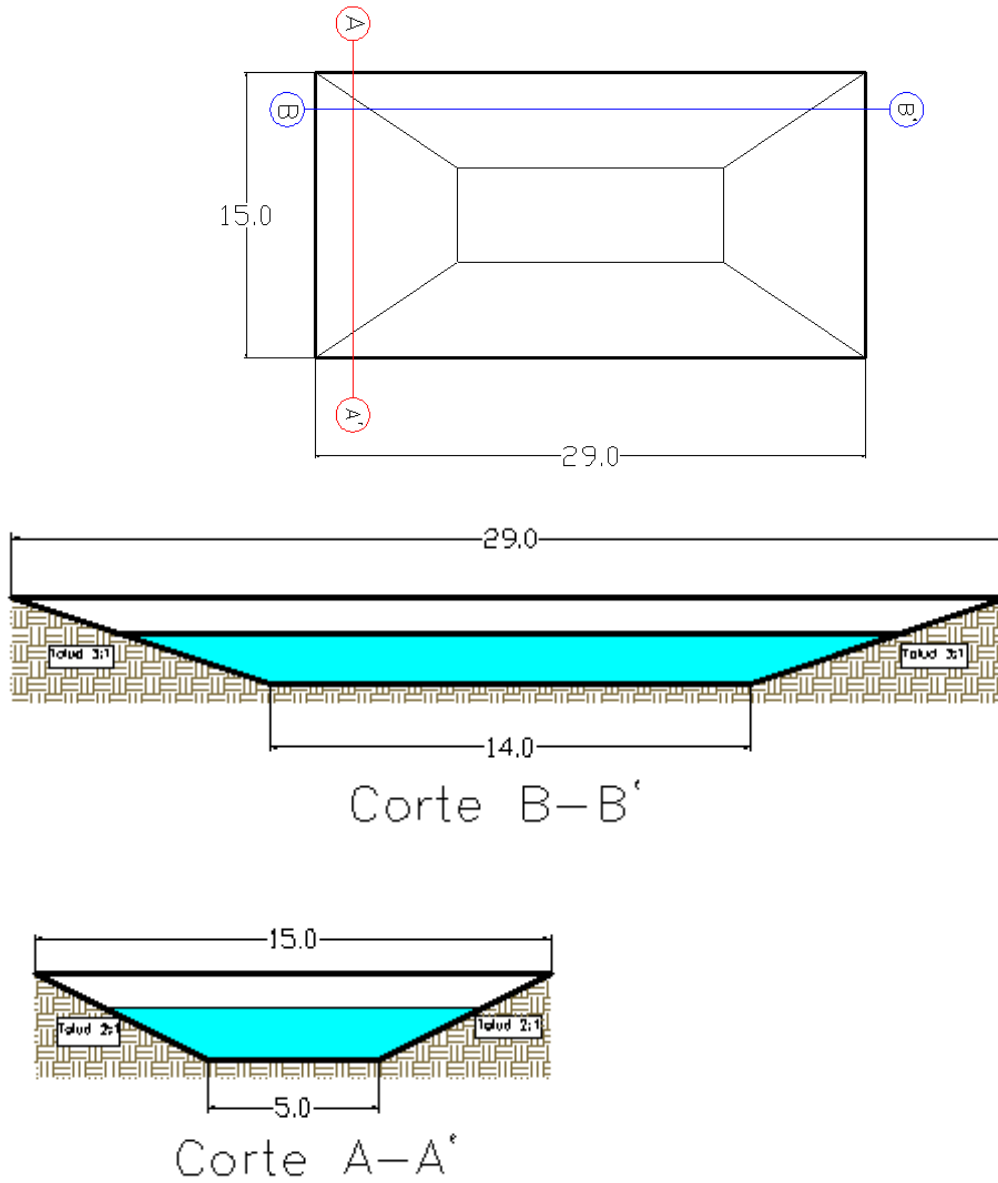


Figura 35. Dimensionamiento de Hoya de captación.

$$Vh = \frac{h}{3} (A_{s1} + A_{s2} + \sqrt{A_{s1} * A_{s2}}) \quad (33)$$



Donde:

$V_h$ : Volumen de la hoya de almacenamiento ( $m^3$ )

$A_{s1}$ : Área de la base inferior ( $m^2$ )

$A_{s2}$ : Área de la base superior ( $m^2$ )

$h$ : Altura de la hoya (m).

Después de configurar la geometría de la hoya de captación, es necesario colocar un contrapeso en el bordo que se encuentra aguas abajo en relación a la pendiente por lo que se colocara un talud 3:1 y además se colocara la tubería para poder utilizar el agua almacenada (Figura 36)

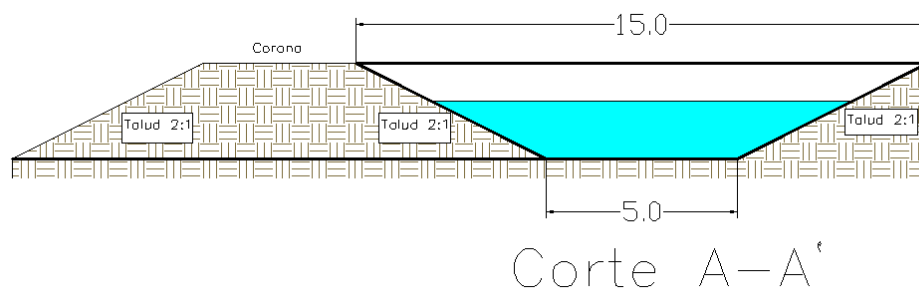


Figura 36. Bordo en contrapeso de la hoya de captación.

“La idea de instalar un tubo de salida para extraer el agua desde la profundidad de la hoya fue promovida y utilizada por P.A. Yeomans, quien demostró las enormes ventajas y posibilidades de este tipo de instalación” (Gras, 2010), las cuales se enlistan a continuación:

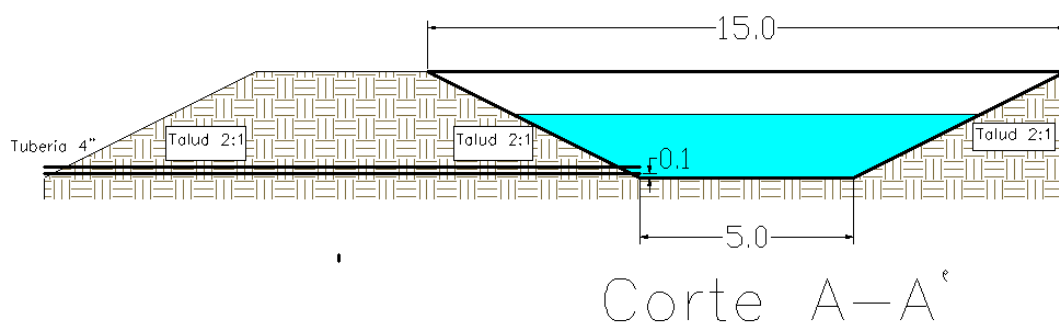
- Abastecimiento de agua para el uso corriente o ladera abajo
- Como tubo de succión para bombeo.
- Desfogue de la hoya para reparaciones, localización de fugas y la remoción de los sedimentos acumulados en la base.



- Sirven de control de los flujos extremos del área de captación cuando puedan llenar la hoya.
- En caso de incendio, se puede verter el volumen de agua ladera abajo para mitigar el incidente.

La instalación de este tubo requiere de atención durante la construcción de los taludes. Para evitar problemas de anegamiento y erosiones es conveniente colocar un tubo con una longitud de 3 o 4 metros para que éste descargue sobre el canal de riego, por debajo del camino que da acceso a la válvula de control. Para disminuir el efecto por golpes de ariete es necesario colocar placas de 50x50 cms, colocadas a una distancia de un metro para sujetar el tubo y disminuir el movimiento al momento de desfogar el líquido.

El diámetro de la tubería será de 4" hierro fundido, a una cota de elevación de 10 cm a partir de la base de la hoya, tomando en cuenta que el valor calculado de potencial de erosión utilizando terrazas individuales como técnica de conservación es de 76.79 ton/ha/año, lo que se traduce en 7.6 mm de lámina de sedimentos que puedan depositarse en el fondo de la hoya en un año (Figura 37). El escurrimiento sobre el terreno no solo conducirá al agua precipitable, además transportará materia orgánica y partículas de suelo, los cuales podrán ser arrastradas al interior de la hoya de captación.



**Figura 37.** Tubería de salida para abastecer PFC.



### **8.6.3. Filtrado, distribución y tratamiento.**

La conducción del agua de la zona de captación a la hoya de almacenamiento, no necesita de obras adicionales debido a que se aprovecha la pendiente del terreno para que el escurrimiento transite de manera natural sobre la superficie.

Tampoco es necesario el tratamiento del agua almacenada en la hoya de captación, debido a que no existe norma oficial que limite los parámetros requeridos a la calidad de agua que se requiere para abastecer la PFC. A pesar de esta condición se realizó un análisis de parámetros normados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-127-SSA1-1994, que pudieran servir de referencia para consideraciones posteriores.

Con respecto a la filtración, se utilizará una malla metálica con una abertura 0.50 mm colocada en el inicio de la tubería, con la finalidad de retener partículas orgánicas e inorgánicas presentes en el almacenamiento. Se deberá realizar una inspección anual para limpieza y revisión de la malla.

### **8.6.4. Diseño final SCALL.**

Definidos todos los componentes del SCALL se incorporaron a la planta topográfica con las siguientes características (Figura 38):

Área de captación: 9488.25 m<sup>2</sup>

Volumen de almacenamiento de hoya: 566 259 litros.

Volumen de diseño de hoya: 550 000 litros.

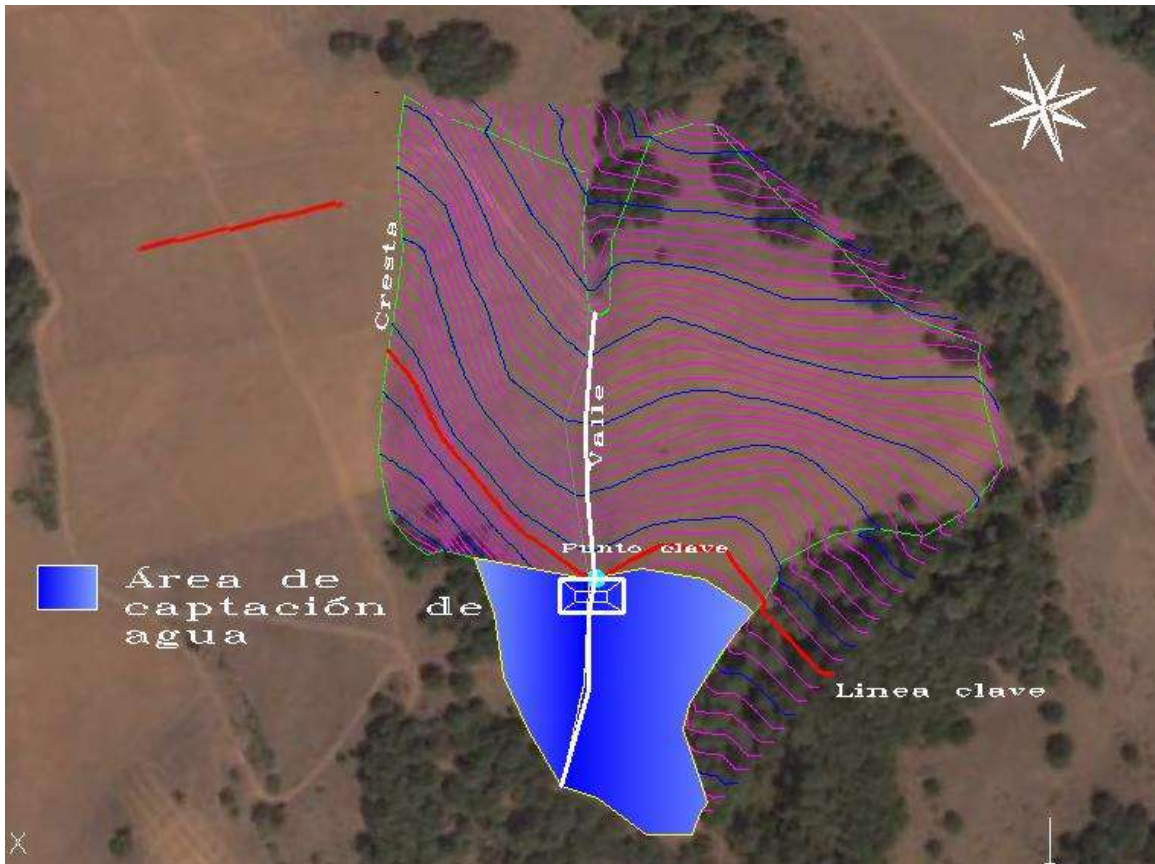
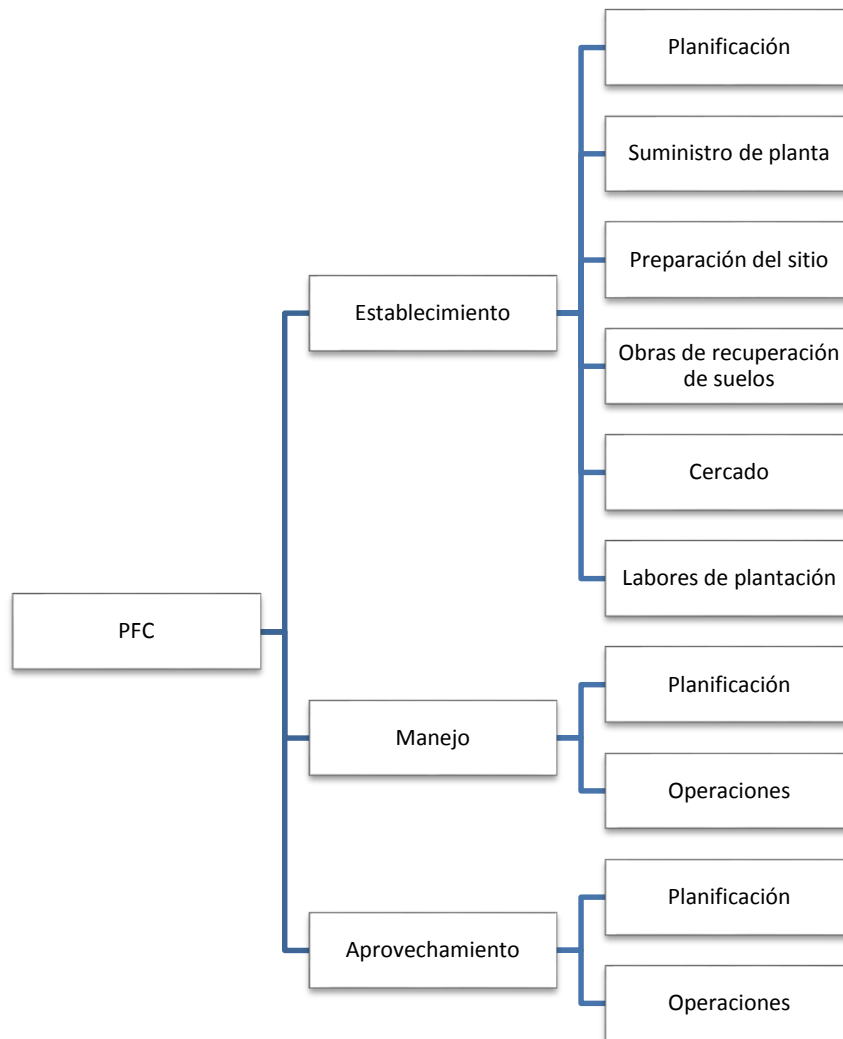


Figura 38. Diseño del SCALL



## 8.7 Elementos de diseño de la PFC.

El diseño de la PFC se basa de manera general en una serie de elementos que se definen en tres etapas, el establecimiento, manejo y aprovechamiento forestal (Figura 39).



**Figura 39.** Diagrama de las etapas a desarrollar para implementar PFC

El alcance de esta investigación se focalizó en la primera etapa, por lo que en el suministro de la planta se pretende elegir la especie que tenga una probabilidad alta para su desarrollo, tomando en cuenta las características físicas y químicas del suelo, condiciones climatológicas, topografía, ubicación geográfica del predio y de los objetivos de la cosecha y manejo que se planteen para la plantación.



El otro elemento de diseño a considerar son las obras de recuperación y preparación de suelos, este tipo de obra son métodos de intervención o tratamientos físicos-mecánicos, que permiten mantener o recuperar las características del suelo, alcanzando su mayor capacidad de producción, sin que se provoque su deterioro físico, químico o biológico (Martínez , 2013). Las obras de preparación del suelo, se realizan para mejorar la estructura del suelo para obtener una mayor retención e infiltración del agua y el establecimiento de las raíces de las plantas.

Y por último se definió el número de plantas a establecer por hectárea, el espaciamiento y ordenamiento que tendrá el bosque, lo anterior dependerá del potencial reproductivo del sitio y del objetivo de la plantación a generar.

Actividades como la limpieza de terreno, manejo de desechos, control de malezas, fertilización, calidad transporte y manipulación de plantas, cercado, manejo de rebrotes, se tienen que realizar durante la etapa de implementación, sin embargo solo se tomaran las actividades citadas de selección de especie, las obras de recuperación y preparación del suelo y la densidad de árboles y el ordenamiento espacial de la plantación debido a la relación directa con el diseño del SCALL y a las metodologías empleadas para su implementación (DHT y Permacultura), en el cual las variables de precipitación, topografía, características de suelo tienen injerencia directa en la planificación de la PFC y del SCALL.

### **Selección de especie para la PFC.**

Esta actividad resulta clave para el éxito futuro de la plantación, por lo que en la definición de especies a establecer, se debe considerar árboles ya presentes en el área, de origen conocido o que hayan demostrado su adaptación satisfactoria a los requerimientos del predio (Martínez, 2013).

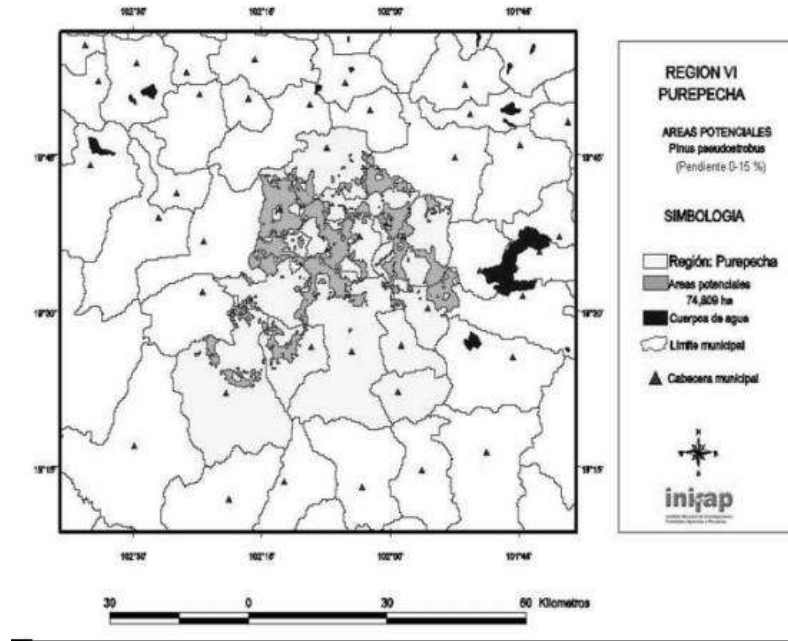
Con la finalidad de establecer las PFC como una alternativa para la disminución de la presión sobre bosques naturales, crear alternativas de desarrollo sustentable, recuperación de suelos degradados, disminuir las tasas de erosión y



asegurar el recurso maderable para la industria, se han efectuado investigaciones para determinar áreas potenciales para el establecimiento de las PFC, tomando en cuenta factores como la precipitación, temperatura, suelo, altitud, uso y tipo de suelo y pendiente.

Analizando las áreas potenciales establecidas por CONAFOR en el año 2014 para las PFC (Anexo 1) y seleccionado la especie de árbol de acuerdo a las condiciones del predio y requerimientos de la planta se optó por seleccionar el *Pinus pseudostrobus Lindl.* Para esta especie se establecieron áreas potenciales en el estado de Michoacán en relación a las pendientes y se concluyó que con una pendiente de 0-15% se estimaron 234,766 ha y 99,760 ha con una pendiente de 15-30% de áreas potenciales para la implementación de PFC en todo el estado (Muñoz, Sáenz, García, Hernández, & Anguiano, 2011). En este mismo sentido pero acotado a la región de la Meseta Purépecha, y utilizando cuatro especies diferentes incluida el *Pinus pseudostrobus Lindl* (Figura 40), se determinaron un total de 74,809 ha con pendientes de 0-15% y 37,056 ha en pendientes de 15-30% para plantaciones forestales manuales (Muñoz, Saenz, García, Coria, & Muñoz, 2015).

El *Pinus pseudostrobus Lindl* es una especie nativa al igual que el *Pinus Michoacana*, por lo que es necesario priorizar estas especies en la implementación de PFC en la Meseta Purépecha. Las características que requieren el *Pinus pseudostrobus Lindl* se pueden apreciar en las siguientes tablas 35 y 36.



**Figura 40.** Áreas potenciales para PFC con pendientes de 0-15% en la Sierra Purépecha del Estado de Michoacán (Muñoz, Saenz, García, Coria, & Muñoz, 2015).

<b>Requerimientos del <i>Pinus pseudostrobus Lindl</i></b>		<b>Condiciones del sitio</b>
Altitud (m.s.n.m)	2200-2800	2280-2320
Precipitación anual (mm)	900-1500	1264
Temperatura media anual (°C)	12--19	12.54°C
Tipo de suelo	Andosol	Andosol

**Tabla 35.** Requerimientos ambientales del *Pinus pseudostrobus Lindl* y datos disponibles del sitio en estudio (Muñoz, Sáenz, García, Hernández, & Anguiano, 2011 : Muñoz, Saenz, García, Coria, & Muñoz, 2015).

<b>Características físicas del suelo requeridas</b>		<b>Condiciones de sitio</b>
Profundidad (m)	Profundos de 1 a 3 m	1-2 m
Textura	Migajón-arenosa, arenosa-arcillosa	Franco-arenoso, Franco-arcillosos
Drenaje	Bien drenados	Bien drenado

<b>Características químicas del suelo requeridas</b>		<b>Condiciones de sitio</b>
pH	De 5.5 a 7	6.28-6.6
Materia orgánica	Con una capa de humus de 10 a 30 cm	No existe
Fertilidad	Alto contenido de nitrógeno	No disponible
Otros	Suelos con material volcánico, en sitios con bajos contenidos de P	No disponible

**Tabla 36.** Características físicas y químicas requeridas del *Pinus pseudostrobus Lindl* y datos disponibles del sitio en estudio. (Eguiluz, 1978, citado en Muñoz, Sáenz, García, Hernández, & Anguiano, 2011).



Los usos del *Pinus pseudostrobus Lindl* son variados, es buen productor de resina, la madera es de buena calidad se usa en aserrío, triplay, chapa, cajas de empaque, molduras en la construcción, muebles finos, artesanías, ebanistería y pulpa para papel. Es una especie recomendable para PFC, además de uso ornamental en campos deportivos y parques, debido a su follaje semicolgante desprende un aroma agradable a resina.

El *Pinus pseudostrobus Lindl* es una especie de gran importancia económica para la región de la Meseta Purépecha, debido a su distribución amplia, crecimiento rápido en sitios de buena calidad , rectitud de fuste y calidad en la madera (Castellanos, Sáenz, Linding, Sánchez, Lobbit y Montero, 2013).

Las plantas tienden a responder de forma morfológica y fisiológica a las condiciones ambientales en las que se desarrollan, modificando la velocidad de crecimiento, la producción de estructuras secundarias y la cantidad de pigmentos (Cambrón, España, Sanchez, Sáenz, Vargas y Herrerías, 2011). Las situaciones de déficit hídrico son muy frecuentes en la vida de las plantas, siendo la disponibilidad de agua el primer factor limitante del crecimiento vegetal; dicho estrés hídrico depende de la disponibilidad de agua , la temperatura y de otros factores físicos de la atmósfera y del suelo; en suelos degradados el problema se acentúa y puede llegar a presentar condiciones de sequía por la pérdida de materia orgánica y estructura, lo que reduce la capacidad de retención de agua en el suelo (Gómez, Linding, & Val, 2015).

Para poder diseñar el SCALL y conocer la demanda de la PFC, es necesario estimar el consumo de agua del *Pinus pseudostrobus Lindl*, en este caso se utilizará el consumo del *Pinus taeda*, el cual reporta 5 litros de agua al día, cabe señalar que la información referente a la especie elegida aún se desconoce, por lo que se optó por utilizar una especie que requiriera condiciones ambientales similares al *Pinus pseudostrobus Lindl*.

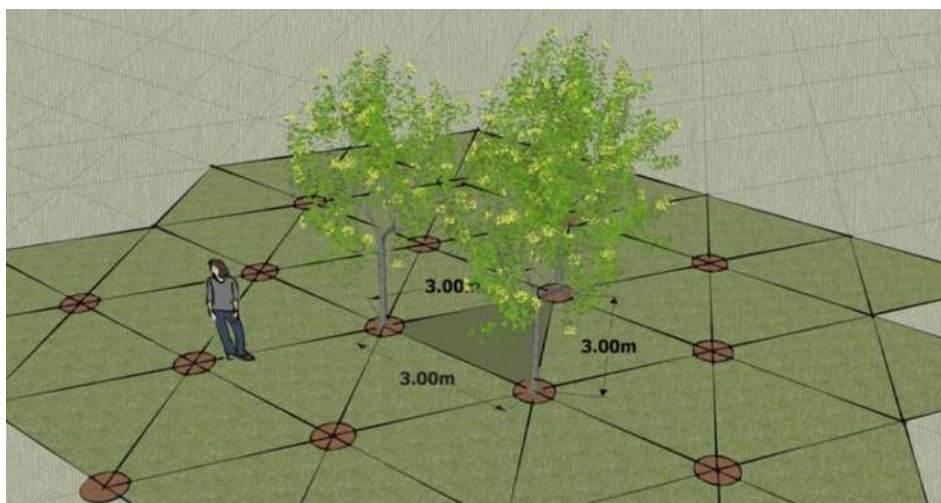


Es importante señalar como antecedente indirecto que el *Pinus pseudostrobus Lindl*, en el estado de Nuevo León es la especie más empleada en reforestación en suelos degradados o áreas incendiadas, sin embargo se han registrado tasas bajas de supervivencia, siendo la sequía la principal causa de mortandad en los árboles, y se hace distinción de dos fases de consumo de agua, por una parte en la etapa de vivero, y posteriormente cuando la plantación se ha efectuado, sugiriendo un riego a saturación con una frecuencia no mayor de 9 días (Sigala, González, & Jiménez, 2015).

### **Ordenamiento, espaciamiento y tipo de plantación forestal.**

La densidad de plantación más comúnmente utilizada van entre 450 a 1600 plantas/ha dependiendo del tipo de plantación y del espaciamiento entre árboles, sin embargo el promedio en PFC no sobrepasa 1250 plantas/ha (Martínez, 2013).

El trazado elegido fue colocar las cepas sobre curvas de nivel para reducir la erosión ocasionada por la precipitación y la pendiente incidente del predio, se seleccionó un arreglo o espaciamiento de tresbolillo en el cual se asignó una distancia de 3 metros entre cada planta colocadas en los vértices de un triángulo equilátero, guardando la misma distancia entre plantas y filas (Figura 41).



**Figura 41.** Espaciamiento tresbolillo, para la PFC



La siguiente fórmula determina el número de plantas por superficie que se pretende establecer a través del espaciamiento tresbolillo

$$n = \frac{Su}{(d^2) \cos 30} \quad (34)$$

Donde:

n: número de plantas

d: Distancia entre plantas (m)

Su: Superficie del predio (m<sup>2</sup>)

Proponiendo una distancia de tres metros entre cada planta y considerando una superficie libre para la plantación de 52428 m<sup>2</sup>, el número total de árboles con espaciamiento tresbolillo fue de 6727 árboles, con una densidad por hectárea de 1294 plantas (Figura 42)

### **Preparación y recuperación de suelo para la implementación de la PFC.**

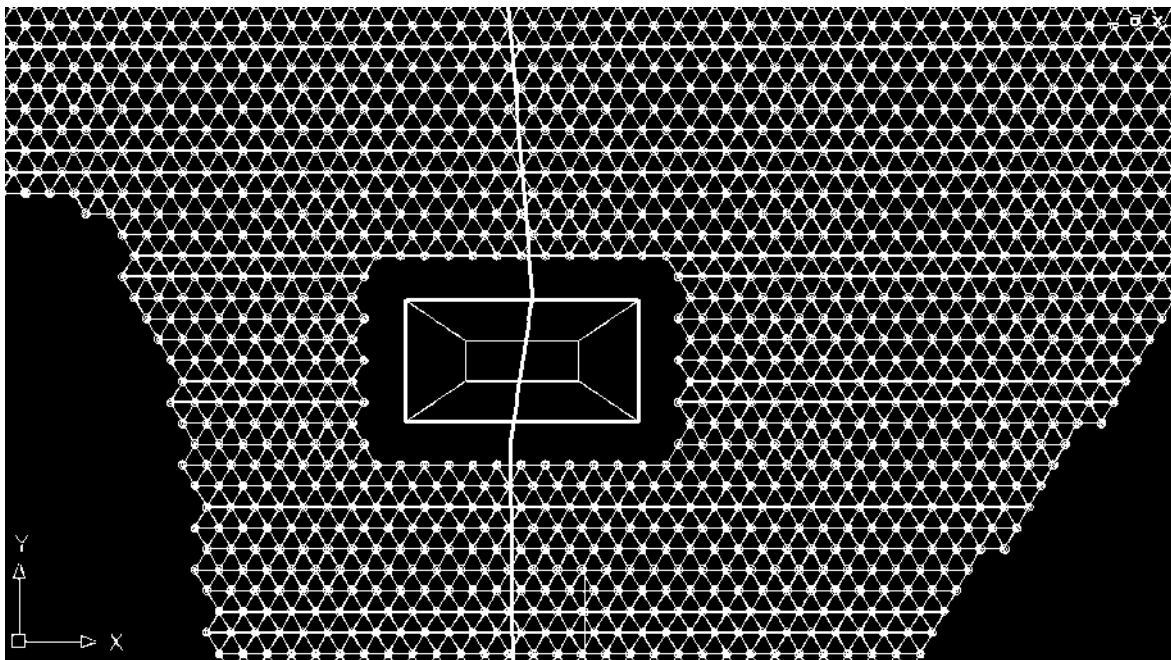
En base a los principios de Permacultura y tomando en cuenta las variables técnicas, económicas, erosión, contenido de humedad en el suelo y pendiente; es necesario aplicar técnicas o prácticas que contribuyen a conservar las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo, para mantener su capacidad reproductiva y además reducir fenómenos de erosión hídrica y eólica que incidan en la zona (Honduras, 2011).

En general, es deseable que la preparación del suelo se efectúe siguiendo las curvas de nivel, independientemente de la técnica que se utilice, esto con la finalidad de un mejor aprovechamiento de agua para la plantación, mayor tiempo de retención y menor pérdida de suelo (Martínez, 2013).

Las terrazas individuales son pequeñas plataformas redondas, semicirculares o cuadradas que tienen como diámetro valores de 1 a 2 metros,

empleadas para la plantación de árboles frutales y maderables, trazadas en un arreglo tresbolillo utilizadas regularmente en terrenos con pendientes de 12 a 60%, está debe de tener una leve inclinación en contra la pendiente con la finalidad de conservar humedad a través de la acumulación e infiltración de agua, además de que al emplear un espaciamiento tresbolillo la escorrentía en la ladera disminuye (Bustamante, 2005).

Las terrazas propuestas serán de forma circular con un diámetro de 1 m, seguirán las curvas de nivel con un espaciamiento de tresbolillo, se revisaron los conceptos asociados a esta técnica para su ejecución los cuales contemplan: la altura, precipitación, textura, profundidad, fertilidad y acidez del suelo, capacidad de infiltración, drenaje de agua, pedregosidad y la pendiente; considerando que es adecuada a las condiciones del predio (Figura 42).



**Figura 42.** Espaciamiento tresbolillo para planta y terrazas individuales.



## 9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Los SCALL surgen como una alternativa viable para satisfacer la demanda de las poblaciones rurales que no cuentan con el suministro de agua de manera tradicional. En este sentido aplicando la encuesta basada en el IPA se encontró que el 74% de la muestra cuenta con este tipo de sistemas, lo que se traduce en una alta aceptabilidad de esta ecotecnología, lo cual es el primer indicador para replicar y aumentar los usos de los SCALL para satisfacer sectores productivos como los referentes al aprovechamiento forestal.

Esta conclusión es reforzada por el argumento de Ortiz, Masera y Fuentes (2014), los cuales afirman que para introducir una ecotecnología a un contexto específico es necesario generar mecanismos de aceptación que tomen en cuenta la localidad, la cultura y las formas de vivir de los usuarios. Por otro lado, Isla Urbana determinó el grado de adopción de sus sistemas implementados y se basaron en el propuesto por Smith y Mink (2012) en el cual estudiaron zonas urbana, rurales y periurbanas, en el que se identificaron las fuentes de financiamiento, obteniendo como resultado un 70% de adopción de los sistemas instalados y entre el 85 y 93% de los sistemas implementado contaron con la participación de los usuarios.

El balance hídrico de la zona permitió establecer una disponibilidad de agua de 524.64 mm anuales, basado en la diferencia de la precipitación media anual de 1264.60 mm y 739.96 mm de ETP media anual; además se identificó los meses donde la ETP es mayor a la precipitación, lo que representa una baja disponibilidad del recurso agua, por lo que en el ámbito de la planificación del SCALL estos datos son esenciales para el diseño óptimo del sistema, ya que está directamente relacionado con el dimensionamiento del componente almacenamiento y posteriormente con el consumo, la distribución espacial y periodo de meses en la que este volumen almacenado se utilizará.

Lo cual se relaciona con lo que afirma Heras (1988) donde el balance hídrico puede calcularse para masas de agua de cualquier tamaño, pero la complejidad del



cálculo depende fundamentalmente de la extensión del área estudiada y los datos existentes para realizar el balance; debido a esta afirmación se realizó un estudio hidrológico condicionado por la información disponible de las estaciones cercanas a la poligonal en estudio, donde se determinó las características morfológicas de la microcuenca donde se localiza el terreno; por lo que fue necesario realizar el balance hídrico de la zona tomando en cuenta las medias anuales de precipitación y ETP de una estación base que reflejará las condiciones predominantes del sitio analizado.

La clasificación del suelo Andosol en la zona de estudio, se traduce en una dinámica donde la infiltración prevalece ante el escurrimiento debido a las características físicas propias del suelo, donde la textura franco arenosa de los horizontes analizados y los valores bajos de densidad aparente característicos de este tipo de suelo son los indicadores que establecen esta relación agua-suelo. Para el diseño del SCALL el reconocimiento de ésta dinámica es importante, ya que se puede estimar el porcentaje de aprovechamiento del agua que escurre sobre la poligonal, que en este caso es de 15% y se estableció en base la clase textural de los horizontes superficiales determinados por Gras (2010) en la que afirma que un suelo con textura franco arenosa con una precipitación media anual mayor a 1100 mm, el área de captación presentará un porcentaje de aprovechamiento entre el rango 10-15%.

Para el diseño del componente almacenamiento del SCALL, al identificar una incidencia alta de infiltración fue necesario proponer una hoyo de captación, con una geomembrana que recubra la base y los taludes con la finalidad de garantizar el almacenamiento del líquido. Pizarro et al. (2015), señala que es importante reconocer que el tipo de suelo tiene una relación directa con las etapas de construcción del área de acumulación, que contempla el movimiento de tierra, excavación, compactación y diseño de taludes. Además, Gras (2010) afirma que es preferible construir cisternas en suelos con texturas arcillosas que al someterse a una compactación adquieren propiedades de estabilidad e impermeabilidad sin la necesidad de utilizar materiales impermeables que almacenen agua.



Por otro lado Pizarro et al. (2015) mencionan que en suelos con textura franca arenosa en donde podría presentarse excesiva infiltración, es necesario utilizar materiales sintéticos que le confieran al área de almacenaje la retención del volumen.

Bajo el criterio de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), se estimó un potencial de erosión en el terreno de estudio de 95.98 ton/ha/año, lo que se traduce en una lámina de suelo de 9.59 mm, lo cual determinó el azolve esperado en la hoya de captación y, por ende la cota de elevación de la tubería de distribución del líquido almacenado. En relación a la erosión potencial del terreno, Cisneros et al. (2012) mencionan que no existe un acuerdo en el estado del arte para proponer una tolerancia de pérdida de suelo, sin embargo los valores fluctúan entre 4 a 20 ton/ha/año (Kirby y Morgan, 1994, citado en Cisneros et al., 2012).

Asi mismo otros autores proponen valores de 2 a 10 ton/ha/año (Troeh et al., 1991, citado en en Cisneros et al., 2012) o de 1 a 2 ton/ha/año (Walter & Stutzel, 2009, citado en Cisneros et al., 2012). Estos valores se utilizan como guia de planificación en la conservación de suelos y posteriormente como índice de evaluación después de aplicar los usos y manejo de suelos con las tecnicas de conservación seleccionadas, es evidente que en la presente investigación se requiere seleccionar la opcion económica y técnicamente factible para reducir la pérdida de suelo en la poligonal.

Las terrazas individuales propuestas en el diseño de la PFC tienen la finalidad de reducir la erosión hídrica superficial y, por ende beneficiar el funcionamiento del SCALL al disminuir la lámina de azolve que se acumulará en la base de la hoya, además de mejorar la fertilidad del suelo y retener la humedad para el beneficio de las plantas.

Los métodos del DHT y los principios de Permacultura permitieron ubicar espacialmente los componentes del SCALL, optimizando los recursos del agua y el suelo. El punto clave definió la posición de la hoya de captación en base a la



topografía de la poligonal y la altimetría posicionó la línea clave, lo cual permitió el análisis de los escurrimientos que abastecerán el componente de almacenamiento. Ésta localización permitirá abastecer a 5509 árboles aprovechando la gravedad para la distribución del agua sobre el terreno. Además el área de captación estará situada en la parte alta del terreno, aprovechando el movimiento del agua sobre las crestas que convergen en el valle y abasteciendo sin la necesidad de obras de conducción a la hoya de captación.

Por lo tanto, se comprueba la primera hipótesis donde se establece que la planeación estratégica de los SCALL para uso de aprovechamiento forestal es viable en SFH, en donde la aceptabilidad de estos sistemas por los habitantes de la localidad influye directamente en la reproducción de este tipo de alternativas para aprovechamiento sustentable de los recursos agua y suelo. Si se considera que la planeación contribuye a la reducción de costos en la implementación de SCALL, esto hace asequible que los propietarios que requieran invertir su capital en PFC destinen parte al diseño del SCALL, lo que garantizaría mayor posibilidad de éxito en la supervivencia del árbol al disponer de agua para su desarrollo en temporada de estiaje, en este sentido Sigala, González y Jiménez (2015) mencionan que las bajas tasas de supervivencia del *Pinus Pseudostrobus Lindl*, se deben principalmente a la sequía presentada en las zonas de plantación en los primeros años de desarrollo.

Además se comprueba la segunda hipótesis donde se plantea que la identificación de las características físicas del suelo favorecerá el diseño del SCALL para la implementación de las PFC, debido a que una vez conocida la dinámica del agua en el suelo, los componentes del SCALL (Área de captación, almacenamiento y filtrado) tienen una relación directa con la infiltración y escurrimiento del agua sobre el terreno, lo cual es determinante para proponer dimensiones, materiales y componentes del SCALL. Al respecto, la FAO (2002) conceptualiza que los SCALL están conformados por dos áreas, la primera denominada área de captación, la cual recolecta a través de la escorrentía el agua superficial que es almacenada en la obra correspondiente y la segunda como área de almacenamiento que es la



---

superficie impermeable que garantiza la acumulación del líquido para posteriormente ser aprovechada en el área de cultivo.



## 10. RECOMENDACIONES.

En relación a la legislación aplicable a los SCALL, es necesario dar un seguimiento a las modificaciones, actualizaciones y creaciones de leyes que puedan incidir en la implementación de estos sistemas, ya que se identificó en esta investigación que las aristas legales en torno al tema aún se encuentran en una etapa de desarrollo, aunque la tendencia hasta el momento es positiva y no restrictiva, el manejo adecuado del recurso agua demanda que el diseñador de los SCALL se mantenga actualizado en los tópicos referentes a los sistemas. En este sentido, Ortiz, Masera y Fuentes (2014) mencionan la ausencia de una normatividad que regule o determine las características de los SCALL, pero recalcan los esfuerzos institucionales de CIDECALLI-CP para establecer una normatividad general que unifique procesos para los diseñadores y certifique al personal que siga ésta metodología propuesta.

Por otro lado, es necesario identificar los impactos ambientales relacionados a la implementación de los SCALL para cuantificar los efectos positivos y negativos del entorno donde se edifiquen. A nivel estatal la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático (SEMARNACC) en las acciones de desmantelar las huertas ilegales de aguacate en la región de la Meseta Purépecha, tipificó como trampas mortales para la fauna las hoyas de agua situadas en estas propiedades, argumentando además la falta de permisos emitidos por CONAGUA para la instalación de este tipo de infraestructura.

Es relevante analizar si las PFC requieren para su desarrollo ciertas características deseables con respecto a la calidad de agua, teniendo en cuenta que el almacenamiento es una etapa crítica dentro del funcionamiento de los SCALL, debido al tiempo que durará almacenada el agua captada para posteriormente utilizarla en la temporada de estiaje. Así mismo, se debe considerar en el agua almacenada el contenido de materia orgánica y de otros elementos como fertilizantes, transportados por el propio escurrimiento superficial y de las interacciones bióticas del ecosistema, aunado a la exposición directa de la radiación solar sobre la superficie libre del agua que podría cambiar las propiedades físicas y



químicas del agua almacenada y, por ende beneficiar o perjudicar el desarrollo de la PFC. Por lo que se sugiere realizar evaluaciones en diferentes periodos de tiempo de la calidad del agua almacenada.

La información referente al consumo de agua del *Pinus pseudostrobus Lindl* en la etapa de plantación y seguimiento en los primeros años es nula, por ello es necesario implementar métodos que puedan estimar el volumen demandado, a nivel individual y a escala de rodal, que permitan dimensionar los componentes de almacenaje de los SCALL. Además, de analizar el impacto de las PFC en los cursos de agua, tanto en cantidad como en calidad, permitiendo planificar el uso adecuado del uso de suelo para tener rendimientos óptimos en el aprovechamiento forestal.

Por otro lado, es importante analizar y discutir la aportación y disminución del recurso agua en el ciclo hidrológico de la cuenca en donde se implementen los SCALL, ya que es evidente que en una pequeña escala la interrupción de infiltración natural en suelos es necesaria, para el almacenamiento de agua en hoyas y la disminución del volumen de escurrimiento conducida al propio sistema de almacenaje modificará la dinámica del agua en el suelo y por ende los volúmenes del balance hídrico de la zona. Sin embargo, las prácticas de conservación de suelo y agua que se diseñen en el terreno para el aprovechamiento forestal podrían mejorar significativamente la disponibilidad de agua en el suelo, favoreciendo la tasa de infiltración y, por ende disminuyendo la escorrentía superficial.

Se sugiere establecer sitios potenciales para establecer PFC en relación al grado de degradación del suelo, que permitan vincular directamente esta degradación con la dinámica del agua en el suelo, para identificar qué componente prevalece en la zona (escurrimiento o infiltración), además de evaluar las características físicas, químicas, biológicas y de fertilidad del suelo. Al respecto CONAFOR (2015), a través de sus mapas generados, definen los sitios potenciales para la implementación de PFC, basados únicamente en el análisis de vegetación y uso de suelo, sin tomar en cuenta si existe un grado de degradación del suelo.



Se propone realizar evaluaciones de los SCALL instalados, para definir el buen funcionamiento a mediano y largo plazo, ya que según Vignau (2009) el éxito de operación de este tipo de sistemas depende directamente de la participación de la comunidad durante la planeación y operación de los proyectos.



## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Adler, I., Carmona, G., & Bojalil, J. A. (2008). *Manual de captación de agua de lluvia para centros urbanos*. México: PNUMA.
- Aguilar, A., López, M., Nuñez, E., & Khalil, G. (2003). *Encalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana*. *Revista Terra*, 21(3), 417-426.
- Alcalá, M., Ortiz, C., & Gutiérrez, M. (2001). *Clasificación de los suelos de la Meseta Purépecha*, Michoacán. *Revista Terra*. 17(3), 228-239.
- Anaya, M. (1998). *Temas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en America Latina y El Caribe. Manual técnico*. México: Agencia de cooperación técnica IICA-México.
- Anaya, M. (2011). *Captación de agua de lluvia: solución caída del cielo*. México, D.F: Colegio de Posgraduados-Mundi Prensa.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamento de hidrología de superficie*. México: LIMUSA.
- Ávila, P. (1996). *Escasez de agua en una región indígena: el caso de la Meseta Purépecha*. México: Colegio de Michoacán.
- Ayala, J., González, J., Alcalá, M., & Rosas, S. (2014). *Manual para el curso de edafología, laboratorio y campo*. Morelia, Michoacan: UMSNH.
- Baizabal, M. E. (2006). *Metodología en gestión y evaluación económica de sistemas de captación y potabilización de aguas pluviales; aplicación a comunidades rurales del norte del estado de Morelos. (Tesis de maestría)*. Universidad Autónoma de México. D.F. México.



- Ballén, J. A., Galarza, M. A., & Ortiz, R. O. (2006). Historia de los sistemas de captación de agua de lluvia. *Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua*. Colombia: Joao Pessoa.
- Benitez, J. A. (2013). *Modelo multi-criterio para la toma de decisiones en el uso de agua de lluvia: el caso de los pobladores de Angostillo, Paso de ovejas, Veracruz, México. (Tesis de maestría)*. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Veracruz, México.
- Bustamante, B. (2005). *Tecnología y metodologías validas para mejorar la seguridad alimentaria en las zonas secas de Honduras. Serie manejo de suelos y agua*. Tegucigalpa, Honduras.
- Caballero, A., & Montes, J. (1997). *Agricultura sostenible. Un acercamiento a la permacultura*. México: Servicios educativos y de investigación social.
- Cabrera, C. (2003). *Plantaciones Forestales: oportunidades para el desarrollo sustentable*. Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales Y Ambientales IARNA-URL.
- Cervantes, E. O., Hernández, D. S., Córdova, M. A., Vázquez, S., & Hernández, L. (2014). *Sistemas de Captación de agua de lluvia en Cherán, Michoacán*. Congreso IMTA 2014, Victor Jvier Bourguett Ortiz y Ariosto Aguilar Chávez Editores. Jiutepec, Morelos., 24-32.
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A. & Bergesio, L. *Erosión Hídrica. Principios y técnicas de manejo*. UniRío editora- Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba, Argentina
- Comisión Nacional Forestal CONAFOR. (2001). *Programa Estratégico Forestal para México 2025. Informe Final Versión 2.1*. México. Recuperado de [http://era-mx.org/biblio/PEF\\_2025.pdf](http://era-mx.org/biblio/PEF_2025.pdf).



Comisión Nacional Forestal CONAFOR. (2015). *Plantaciones Forestales Comerciales*. México. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/>

CONAGUA. (2014). *Estadísticas del agua en México*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EA M2014.pdf>

(Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 2016). Obtenido de <http://appweb.cndh.org.mx/biblioteca/archivos/pdfs/lib-Constitucion-EUM-21aed.pdf>

Cortés, H., & Ramírez, J. (2013). *Diseño hidrológico del terreno (sistema keyline), en parcelas agrícolas con precipitación limitada*. Jiutepec, Morelos, México: IMTA.

De Camino, R. (1995). *Impactos Ambientales y socioeconómicos de las plantaciones forestales. Una visión desde la práctica*. Costa Rica.

Díaz, E., & Gómez Tagle, A. (2012). *Intercepción pluvial en distintos ecosistemas de la cuenca hidrográfica de Cointzio, Michoacán. Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán*. México.: INIFAP-UNAM-CIGA.

Domínguez, A. (2009). *Ollas de agua, jagüeyes, Cajas de agua o aljibes*. Colegio de postgraduados-SAGARPA. México. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Ollas%20de%20agua.pdf>

Eguiluz, T. (1978). *Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género Pinus en México*. Texcoco, Estado de México, México: Tesis .



- Elizondo, A. (2006). *El mercado de la madera en México. Informes en productos mexicanos de madera certificada. Dirección general de investigación en política y economía ambiental. Instituto general de economía*. Obtenido de [www.ine.gob.mx/dgipea/bosq\\_madera.html](http://www.ine.gob.mx/dgipea/bosq_madera.html)
- Ern, L. K., Mokhtar, M., Mohd, H. M., Abdul, H. A., & Badusah, J. (2016). *Rainwater harvesting as an alternative water resource in Malasya: potential, policies and development*. *Journal of Cleaner Production*(126), 218-222.
- Escobar, L. (2013). *Relación de parámetros de fertilidad del suelo con el índice del sitio determinado para plantaciones forestales de melina (Gmelina arbórea) ceiba (Pachira quinata) en Zambrano-Bolivar (Colombia)*. Tesis de Maestría. Bogota, Colombia.
- FAO. (2002). *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, experiencias en América Latina*. Chile.
- FAO, (1990). *Manejo de suelos en regiones semiaridas*. Chile: Casas, R. R.
- Faustino, J., & Jiménez, F. (2000). *Manejo de Cuencas. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Área de cuencas y sistemas agroforestales*. Costa Rica.
- Fuentes, J. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque Nacional Pico de Tancítaro. Instituto Nacional de Ecología. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y conservación de ecosistemas*. México.
- Galindo, E., Palerm, J., Tovar, J. L., & Rodarte, R. (2008). *Tecnología hidráulica y acciones comunitarias para la captación de agua de lluvia en jagüeyes*. *Boletín del archivo histórico del agua*, 13, 21-31.



- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Ciudad de México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Gayosso, J., & Alarcón, D. (1999). *Guía de conservación de suelos*. Valdivia Chile: Universidad Austral de Chile.
- Gómez, M., Lindig, R., & Val, E. (2015). *Efecto de la sequía en la relación simbiótica entre Pinus pseudostrobus y Pisolithus tinctorius*. Botanical Sciences, 93(4).
- Gras, E. (2010). *Cosecha de agua y tierra. Diseño con Permacultura*. México: Ediciones COAS (Consejeros en Agricultura Regenerativa y Permacultura. Brasil-Colombia-México).
- Guerra, J., Arbelo, C., Armas, C., Rodríguez, A., & Mora, J. (2003). *Erosión Diferencial de Andosoles y aridosoles en dos zonas climáticas en la isla de Tenerife*. Edafología, 10(2), 229-237.
- Gutiérrez, J., Olvera, M., Rodríguez, D., Aldrete, A., Cibrian, D., & Rodríguez, C. y. (2016). *Diagnóstico de la calidad del agua en los viveros forestales de México*. Nova Scientia, 123-139.
- Heras, R. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico, guía internacional de investigación y métodos*. Paris: Instituto de hidrología/UNESCO.
- Hernández, A., & Torres, J. (2005). *Rentabilidad de una plantación forestal para generar servicios ambientales en el parque nacional nevado de Toluca, Estado de México*. México. Recuperado de [http://dicifo.chapingo.mx/posgrado/articulos/2005/hernandez\\_herrera\\_adrian\\_2005.pdf](http://dicifo.chapingo.mx/posgrado/articulos/2005/hernandez_herrera_adrian_2005.pdf).
- Herrera, L. A. (2010). *Estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia*. México: Instituto Politécnico Nacional.



- Hofstede, R., Lips, J., & Sevink, J. (1998). *Geografía, Ecología y Forestación de la Sierra Alta del Ecuador*. Ecuador: Editorial Abya Yala.
- Holmgren, D. (2014). *Permaculture. Principles & Pathways Beyond Sustainability*. Australia: PEFC.
- Honduras, P. p. (2011). *Guía sobre practicas de conservación de suelos*. La Lima, Cortés, Honduras: Centro de comunicación Agrícola FHIA.
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía (Boletín de suelos de la FAO-68)*. Bedford, Reino Unido: Silsoe Associates Ampthill.
- IMTA. (2016). *Conocimiento y tecnología para la gestión sustentable del agua. Informe anual IMTA 2015*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. (2000). *Mapa digital de uso de suelo de la República Mexicana. Escala 1:1,000,000*. Aguascalientes, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Charapan, Michoacán de Ocampo*. Obtenido de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/16/16021.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía Edafología, escala 1:250 000, serie III*. Aguascalientes, México. Obtenido de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod\\_se](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod_se)
- IUSS Grupo de trabajo WRB, (2014). *Base referencial Mundial del Recurso del Suelo 2014. Actualización 2015. Sistema Internacional de Clasificación de*



suelos para el nombramiento de suelos y crear leyendas para mapas de suelos. Roma: Informes Sobre Recursos Mundiales de Suelo No. 106. .

Jofré, P., Büchner, C., Ipinza, R., Bahamondez, C., Barros, S., García, P., & Cabrera, J. (2013). *Estado del arte la plantaciones forestales y el agua*. Instituto forestal Sede los Rios. Chile. ISBN N° 978-956-318-088-6.

Jordan, A. (2005). *Manual de Edafología*. Universidad de Sevilla. España.

Kinkade-Levario, H. (2007). *Design for water, rainwater harvesting, stormwater catchment and alternate water reuse*. Canadá: New Society Publishers.

León, J. M. ( 2012). *Control de incendios forestales con sistemas de captación del agua de lluvia. (Tesis de maestría)*. Colegio de Postgraduados. Institución de enseñanza en investigación en ciencias agrícolas, campus Montecillo. México.

Ley Ambiental para el Desarrollo Sustentable del estado de Michoacán de Ocampo, (2013). *Periódico Oficial del estado de Michoacán, cuarta sección, tomo CLVI, Número 46*. México. Obtenido de [http://transparencia.congresomich.gob.mx/media/documentos/trabajo\\_legislativo/LEY\\_AMBIENTAL\\_PARA\\_EL\\_DESARROLLO\\_SUSTENTABLE\\_DEL\\_ESTADO\\_DE\\_MICHOAC%C3%81N\\_DE\\_OCAMPO.pdf](http://transparencia.congresomich.gob.mx/media/documentos/trabajo_legislativo/LEY_AMBIENTAL_PARA_EL_DESARROLLO_SUSTENTABLE_DEL_ESTADO_DE_MICHOAC%C3%81N_DE_OCAMPO.pdf)

Ley de Aguas del Distrito Federal, (2011). *Diario Oficial de la Federación*. México Obtenido de <http://aldf.gob.mx/archivo-b7c838765aeaf3012b093d51124869b0.pdf>

Ley de Aguas Nacionales, (2016). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México Obtenido de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16\\_240316.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf)

Ley de Desarrollo Forestal Sustentable del estado de Michoacán de Ocampo, (2007). *Periódico Oficial del estado de Michoacán, cuarta sección, tomo*



CLVI, Número 46. México. Obtenido de  
<http://www.educacion.michoacan.gob.mx/wp-content/uploads/2016/08/LEY-DE-DESARROLLO-FORESTAL-SUSTENTABLE-DEL-ESTADO-DE-MICHOACA%C2%A6%C3%BCN-DE-OCAMPO.pdf>

Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal, (2011). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México. Obtenido de <http://www.aldf.gob.mx/archivo-93b86804b3febb07025a27f0dd46de6b.pdf>

Ley del Agua y Gestión de Cuencas para el estado de Michoacán de Ocampo, (2007). *Periódico Oficial del estado de Michoacán, segunda sección, tomo CXLII*. Número. 11. México. Obtenido de [http://transparencia.congresomich.gob.mx/media/documentos/trabajo\\_legislativo/LEY\\_DEL\\_AGUA\\_Y\\_GESTI%C3%93N\\_DE\\_CUENCAS\\_PARA\\_EL\\_ESTADO\\_DE\\_MICHOAC%C3%81N.pdf](http://transparencia.congresomich.gob.mx/media/documentos/trabajo_legislativo/LEY_DEL_AGUA_Y_GESTI%C3%93N_DE_CUENCAS_PARA_EL_ESTADO_DE_MICHOAC%C3%81N.pdf)

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, (2015). *Diario Oficial de la Federación*. México. Obtenido de [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3264/1/ley\\_general\\_de\\_desarrollo\\_forestal\\_sustentable.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3264/1/ley_general_de_desarrollo_forestal_sustentable.pdf)

Maidment, D. (1992). *Handbook of Hydrology*. New York: Mc Graw Hill.

Martínez, B. (2013). *Guía básica de buenas practicas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios*. Santiago, Chile: Corporación Nacional Forestal CONAF.

Martínez, R., Azpíroz, H., Rodríguez, J. L., Cetina, V., & Gutiérrez, M. (2006). *Importancia de las plantaciones forestales de Eucalyptus*. *Ra Ximhai*, 2(003), 815-846.



- Montes, M., Uribe, E., & García, E. (2011). *Mapa Nacional de erosión potencial. Tecnología y Ciencias del Agua*, 5-17.
- Muñoz, J., Saenz, T., García, J., Coria, V., & Muñoz, Y. (2015). *Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de pino en la sierra Purhépecha, Michoacán*. *Foresta Veracruzana*, 35-42.
- Muñoz, J., Sáenz, T., García, J., Hernández, E., & Anguiano, J. (2011). *Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de Pinus pseudostrobus Lindl, y Pinus greggii Engelm en Michoacán*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* , 29-44.
- Navarro, E. (2016). *Índice sobre prosperidad de agua en la comunidad de Tumbisca, Michoacán. (Tesis de licenciatura)*. Universidad Autónoma de México. México.
- Neris, J., Fuentes, J., Dorta, M. C., Jiménez, & Tejedor, M. (2009). *Influencia del cambio de uso en la tasa de infiltración de Andisoles (Tenerife, I. Canarias)*. Tema 4, relaciones agua-suelo-vegetación.
- Organización Mundial de la Salud OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. 1er Apéndice, 3ra Edición Obtenido de [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_full\\_lowres.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf)
- Ordoñez, J. (2011). *Balance hídrico superficial*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ortiz, J., Masera, O. & Fuentes, Alfredo. (2014). *La ecotecnología en México*. Guadalajara, Jalisco, México. Imagina comunicaciones.
- Programa Hídrico Nacional 2014-2018(PHN) PHN (2014). Comisión Nacional del Agua. México Obtenido de <http://files.conagua.gob.mx/transparencia/PNH2014-2018.pdf>



Programa Hídrico de Visión 2030 del estado de Michoacán de Ocampo (PHV2030EMICH) PHVEMICH. (2009). *Serie: Planeación Hidráulica en México, Componente: Planeación regional y estatal*. México: CONAGUA.

Pizarro, R., Abarza, A., Calderón, R., Tapia, J., & García P. y Córdova, M. (2015). *Manual de diseño y construcción de sistemas de aguas de lluvias en zonas rurales de Chile*. Talca, Chile: UNESCO Documentos técnicos del PHI-LAC.

Programa Nacional para Captación de Agua de lluvia y Ecotecnias en zonas rurales PROCAPTAR. (2016). *Lineamientos técnicos: sistemas de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda*. Comisión Nacional del Agua. México. Obtenido de [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152776/LINEAMIENTOS\\_CAPTACION\\_PLUVIAL.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152776/LINEAMIENTOS_CAPTACION_PLUVIAL.pdf)

Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario, Pesquero y Alimentario 2013-2014 (2013). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia/Documents/2015/MANUALES%20Y%20>

Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2014-2018.(2013). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Obtenido de <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/Documents/PROMARNAT%202013-2018.pdf>

Quantin, P., & Geissert, D. (1988). *Características químicas y mineralógicas de un Andosol y de un suelo ferralítico de Xalapa, Veracruz*. Xalapa, Veracruz: INIREB.

Rivas, S., Oballos, J., Ochoa, G., & Santiago, J. (Junio de 2005). *Ensayo metodológico de evaluación de tierras para la captación de agua en dos micocuencas del Río Santo Domingo, Mérida, Venezuela*. INCI, 30(6).



- Rivera, A. R. (2013). *Evaluación técnica y social que determinan el desarrollo de plantaciones comerciales maderables en Catemaco y Hueyapan, Ver. Veracruz.*
- Rivera, P., Oropeza, J., Martínez, M., Mejía, E., Tapia, L., & Ventura, E. (2012). *El proceso Lluvia-escurrimiento-erosión en laderas y microcuencas instrumentadas.* *Tecnologías y ciencias del agua*, 3(4).
- Rivero, M. E., Gómez, L., & Barrios, J. N. (2010). *Sistemas de Captación y almacenamiento de agua de lluvia en vivienda y comunidad rural, Pátzcuaro, Michoacán.* Obtenido de <https://www.imta.gob.mx/historico/images/noticias/notas-tecnicas/sistemas-captacion-agua-lluvia.pdf>
- Rojas, M. N., Gallardo, J. R., & Martínez, A. (Junio de 2012). *Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia.* *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 15(1).
- Roukonen, M. (1994). *Evaluación Técnica de las plantaciones forestales en el estado de Veracruz. Estudio técnico No. 8 en Estudios Técnicos Forestales Realizados en Veracruz en el Marco del Acuerdo México-Finlandia.* México.
- Sámano, G. (2015). *Viabilidad de los sistemas de captación de agua de lluvia en comunidades rurales. (Tesis de licenciatura).* Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. México.
- Secretaría de Desarrollo Social SEDESOL. (2011). *Atlas de Peligros Naturales de Charapan, Michoacán.* Consultoría, Imagen, Diseño y Servicios CIDI. México. Obtenido de [http://www.normateca.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/2612/Atlas\\_Estados/16021\\_CHARAPAN/0\\_ATLAS\\_CHARAPAN\\_VERSION\\_FINAL.pdf](http://www.normateca.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/2612/Atlas_Estados/16021_CHARAPAN/0_ATLAS_CHARAPAN_VERSION_FINAL.pdf)



- Secretaría de Desarrollo Social SEDESOL. (2014). *Unidad de Microrregiones. Cédulas de Información Municipal (SCIM)*. Municipios: ZAP Rural. Obtenido de <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=zap&ent=16&mun=021>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2005). *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005*. México. p.348. Obtenido de [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/04\\_indicadores/i](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/04_indicadores/i)
- Sigala, J., González, M., & Jiménez, J. (2015). *Análisis de supervivencia para una reforestación con Pinus pseudostrobus Lindl. en el sur de Nuevo León*. Ciencia UANL, 61-66.
- Smith, R., Mink, T. (2012). *Study on the rates of adoption of rainwater harvesting systems in Mexico D.F. The effect of various co-participation methods on System adoption rates*. México. Isla Urbana.
- Stadmüller, T. (1994). *Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Una revisión bibliográfica*. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza CATIE/COSUDE.
- Sullivan, C., Meigh, J., & Giacomello, A. (2003). *The Water Poverty Index: Development and application at the community scale*. Natural Resources Forum, 189-199.
- Thomas, R. B., Kirisits, M. J., Lye, D. J., & Kinney, K. A. (2014). *Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices*. Journal of Cleaner of Production(75), 166-173.



---

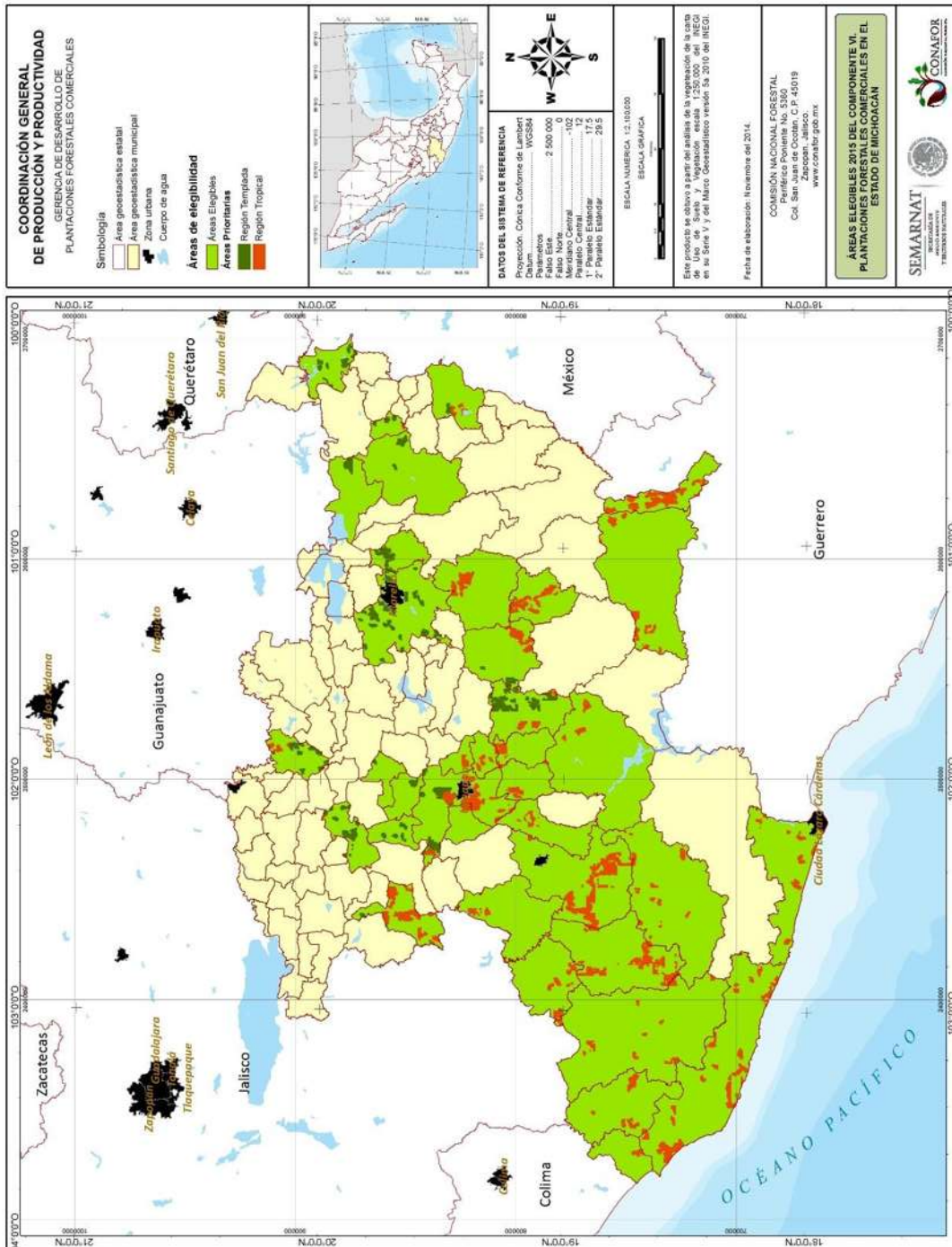
Valencia, J. C. (2015). *Desarrollo de la región hidrológica del Balsas mediante la modificación de su veda*. Tecnología y ciencias del agua, VI(1), 81-97.

Vignau, E. (2009). Tecnología y conservación. *Alternativas para las comunidades del Corredor Biológico Mesoamericano*. México. Corredor Biológico Mesoamericano México. Serie diálogos (4), 14.



### 13. ANEXOS.

#### 13.1 Anexo 1. Áreas elegibles 2015 del componente VI. Plantaciones forestales comerciales en el estado de Michoacán





## 13.2 Anexo 2. Encuesta para evaluar la situación hídrica de SFH

### Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

#### Encuesta estructurada aplicada en San Felipe de los Herreros, Municipio de Charapan, Mich.

Nombre de la familia o encuestado (opcional) \_\_\_\_\_

Tamaño aproximado de la propiedad \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Encuestador \_\_\_\_\_

#### Componente Acceso

1. ¿Cuál es la fuente donde obtiene el agua y cuánto le cuesta?

2. ¿Con que frecuencia cuenta con el agua?

3. ¿Cuenta con algún medio de almacenamiento? Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

¿Cuál es la capacidad? \_\_\_\_\_

¿De qué material está fabricado el recipiente? \_\_\_\_\_

¿El recipiente está bajo, sobre o más arriba del suelo? \_\_\_\_\_

¿Qué tal le ha funcionado el almacenamiento de agua? \_\_\_\_\_

4. ¿Tiene alguna opción alterna de abastecimiento de agua?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ ¿Cuál? \_\_\_\_\_

5. ¿Han tenido conflictos por la disponibilidad de agua?



Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

¿Cuáles?

¿Con que frecuencia?

6. ¿Existe alguna organización que regule el uso del agua en la localidad (Faena, comité, grupo)?

Si \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ ¿Ustedes pertenecen a ella? \_\_\_\_\_

¿Qué tipos de actividades realizan?

Componente uso

6. ¿Cuenta con algún tipo de riego agrícola? Si \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

Superficie (ha) \_\_\_\_\_

7. ¿Tiene ganado o animales de crianza? Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ ¿De qué tipo y cuantos?

Bovino \_\_\_\_\_ Porcino \_\_\_\_\_ Ovino \_\_\_\_\_ Avícola \_\_\_\_\_

Otros \_\_\_\_\_

8. ¿Cuántas personas viven en su hogar?

9. ¿Hacen algún otro uso del agua que no sea en casa, agrícola o ganadero?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

¿Cuál(es) y cuánta agua utilizan aproximadamente?

Componente ambiental.



10. ¿Ha perdido cultivos en los últimos ciclos agrícolas?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

Frecuencia \_\_\_\_\_ Causa \_\_\_\_\_

11. ¿Ha tenido la necesidad de cambiar alguna zona boscosa para actividades agrícolas?

12. ¿Obtiene madera y resina de los bosques de la localidad?

Sí \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_

Frecuencia \_\_\_\_\_ Cantidad \_\_\_\_\_