



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE MINAS, METALÚRGIA Y GEOLOGÍA

**PROPUESTA DE OBRAS CIVILES PARA LA RECARGA HÍDRICA
NATURAL POR LLUVIA EN LA COMUNIDAD DE EL LAUREL,
GUANAJUATO, MÉXICO.**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

JOSÉ ARTURO ESPINOZA BONILLA

GUANAJUATO, GTO., MARZO DE 2019.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres

Por brindarme su apoyo incondicional en cada momento de mi vida, les agradezco por su paciencia y su infinito amor, pues a pesar de las adversidades y sobresaltos ustedes siempre han estado a mi lado. Les agradezco por el esfuerzo y sacrificio que han realizado día a día por brindarme la oportunidad de concluir esta etapa de mi vida. Gracias por su confianza, sus oraciones y sus consejos, gracias por todo. Los amo.

A mi hermano

Gracias por tu apoyo y tu compañía, soy un gran afortunado al tener como hermano a una persona tan valiosa, leal y cariñosa como tú, y muchas gracias, pues Guanajuato se tornó increíble con tu llegada, que la vida te llene de éxitos, te quiero con todo mi corazón.

A mis abuelos

A mi abuela Lucha y a mi abuelo Rodolfo por su eterno apoyo, por ser un pilar fundamental en mi vida. A mi abuela María, por protegerme y dar claridad a mi vida con sus oraciones y bendiciones, y a mi abuelo Gonzalo...Por enseñarme que esta vida se debe afrontar con una hermosa sonrisa en el rostro. Que estés disfrutando del mar abuelo, te amo y te extraño.

A mi tía Luz

Por ser una madre para mí, por tus consejos y tu inmenso cariño, gracias por cuidar y preocuparte tanto por mis abuelos y cada miembro de la familia, eres un ángel, tu corazón no cabe en este mundo. Te amo.

A mis tíos, primos y Santy

Gracias por sus consejos y sus palabras de aliento, aunque por circunstancias de la vida no los veo tan frecuentemente como yo quisiera, los llevo presentes en todo momento en mi corazón, son una gran familia.

A mis maestros

Por su conocimiento y dedicación, todos son parte de mi formación personal y académica. Al Ing. Juan José Martínez e Ing. Federico Vogel les agradezco por brindar en mí una importante motivación para concluir mi carrera profesional.

A mis amigos

A Maytee Corona por su compañía a lo largo esta importante etapa de mi vida, por las risas compartidas, sus consejos, su cariño diario, su enorme paciencia y por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles, a Rene Báez por su amistad y apoyo en el laboratorio de Petrología, pero, sobre todo, por mostrarme la actitud positiva y objetiva con que se deben de desafiar las adversidades en la vida.

A mi directora de Tesis

A la Dra. María Jesús Puy y Alquiza por su confianza y su paciencia, por apoyarme en concretar este proyecto y brindarme las herramientas para buscar el éxito profesional, admiro su búsqueda por la excelencia académica, es para mí un ejemplo a seguir, gracias por su inmensa ayuda, le mando un enorme abrazo.

A mis revisores de Tesis

A la Dra. Yanmei Li, al Dr. Raúl Miranda Avilés, al Dr. Gilberto Carreño Aguilera, al M. en G. Víctor Manuel Ortega Chávez y a la M. en C. Nelly Saraí Ramos, por sus valiosas contribuciones a enriquecer este trabajo de investigación, muchas gracias.

A Dios

Por cuidar de mi en cada momento y darme la claridad para tomar las mejores decisiones en mi vida, gracias por hacer todo esto posible.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Justificación	15
1.2 Objetivo General.....	17
1.3 Objetivos particulares	17
1.4 Antecedentes.....	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	21
2.1 Ubicación del área de estudio	21
2.2 Conceptos fundamentales de Geohidrología.....	22
2.3 Cuenca Lerma-Chapala y su hidrología superficial	32
2.4 Geología y Estratigrafía	33
2.5 Aspectos geohidrológicos que integran el acuífero de la cuenca Lerma-Chapala	35
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	36
3.1 ETAPA 1: Recopilación Bibliográfica	36
3.2 ETAPA 2: Visita a campo	36
3.3 ETAPA 3: Gabinete	37
3.3.1 Cálculo del Balance Hídrico	37
3.3.2 Variables para el cálculo del Balance Hídrico	39
3.3.3 Factores que determinan el potencial de recarga	43
3.3.3.1 Tipo de suelo.....	43
3.3.3.2 Uso del suelo	44
3.3.3.3 Pendiente	45
3.3.3.4 Cobertura vegetal.....	48
3.3.3.5 Tipo de roca	49
3.3.3.6 Determinación de potencial de recarga de las zonas evaluadas	50
3.3.4 Propuesta de obras civiles de recarga hídrica por lluvia	51
3.3.4.1 Tinas Ciegas	52
3.3.4.2 Zanja-Bordo para Retención de Humedad.....	54

3.3.4.3 Terrazas de Bancos Alternos	56
3.3.4.4 Terrazas de Base Angosta.....	58
3.3.4.5 Terraza Individual.....	60
3.3.5 Marco Legal.....	62
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	64
4.1 Descripción del área de estudio	64
4.1.1 Clima	64
4.1.2 Precipitación.....	67
4.1.3 Tipo de suelo.....	69
4.1.4 Cobertura vegetal y uso del suelo	71
4.1.5 Pendiente del terreno	73
4.1.6 Tipo de roca	75
4.1.7 Potencial de recarga hídrica de la Comunidad El Laurel.....	77
4.1.8 Balance hídrico en la Comunidad de El Laurel.....	80
4.2 Propuestas de obras civiles para recarga hídrica por lluvia en la Comunidad El Laurel	81
CONCLUSIÓN.....	87
REFERENCIAS	90
ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio (Imagen tomada a través de Google Earth Pro con coordenadas de vista 14 Q 264974.20 m E, 2331785.10 m N).	21
Figura 2. Fases del Ciclo Hidrológico (Sánchez, 2017).	23
Figura 3. Cuenca, subcuenca y microcuenca (Ordoñez, 2011)	24
Figura 4. Divisoria de Aguas (Ordoñez, 2011)	25
Figura 5. Métodos de orden de ríos (Ordoñez, 2011)	27
Figura 7. Conexión y aporte de agua entre ríos y acuíferos, dibujado por (Sánchez, 2017).....	31
Figura 8. Columna estratigráfica de la secuencia vulcanosedimentaria marina al norte de Guanajuato (Unidad La Esperanza). (Mengelle et al, 2013).	34
Figura 9. Clasificación para las formas de pendiente (FAO, 2009).....	47
Figura 10. Tinas ciegas (Fernández et al., 2009).....	54
Figura 11. Zanja-Bordo para Retención de Humedad (Fernández et al., 2009).....	56
Figura 12. Terrazas de Bancos Alternos (Fernández et al., 2009).....	58
Figura 13. Terrazas de Base Angosta (Fernández et al., 2009).	60
Figura 14. Terraza Individual (Fernández et al., 2009).	62
Figura 15. Mapa de clima para la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).....	66
Figura 16. Mapa de valores de precipitación anual para la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).	68
Figura 17. Mapa de Unidades de suelo para la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).	70
Figura 18. Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).	72
Figura 19. Mapa de Inclinación de la pendiente para las Comunidades de El Terrero y El Laurel (Ramos, 2018).....	74
Figura 20. Mapa de Geología de las Comunidades de El Terrero y El Laurel (Ramos, 2018).	76
Figura 21. Potencial de recarga hídrica para las Comunidades de El Terrero y El Laurel por el método Matus (Ramos, 2018).....	79
Figura 22. Diferencia de nivel AC	101
Figura 23. Distancia horizontal CB	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de infiltración para diferentes usos de la tierra, propuestos por (Schosinsky & Losilla, 2000).	42
Tabla 2. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según su textura (Matus et al., 2009).	44
Tabla 3. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso del suelo (Matus et al., 2009).	45
Tabla 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno (Matus et al., 2009).	46
Tabla 5. Conversión de unidades de porcentaje a grados (FAO, 2009).	46
Tabla 6. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno (Matus et al., 2009). Pendiente expresada en grados.	47
Tabla 7. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según su cobertura vegetal (Matus et al., 2009).	49
Tabla 8. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca (Matus et al., 2009).	50
Tabla 9. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto (Matus et al., 2009).....	51
Tabla 10. Ponderaciones obtenidas para la Comunidad de El Laurel para los factores que determinan el potencial de recarga hídrica según la metodología propuesta por Matus (2009).....	78
Tabla 12. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Zanja-Bordo para Retención de Humedad y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.	82
Tabla 13. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Terrazas de Bancos Alternos y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.	83
Tabla 14. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Terrazas de Base Angosta y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.	84
Tabla 15. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Terrazas Individuales y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.....	85
Tabla 16. Obras que se pueden implementar en la comunidad de El Laurel, una vez evaluados los parámetros de clima, precipitación, tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y tipo de roca.	86
Tabla 17. Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes (hemisferio norte). Fuente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006).....	99

Tabla 18. Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes (hemisferio sur). Fuente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006)..... 100

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la Transmisividad de un estrato.....	30
Ecuación 2. Ecuación de la continuidad (Sokolov & Chapman, 1981).....	37
Ecuación 3. Formula del balance global (Schulz & García, 2015).	38
Ecuación 4. Expresión general de la evapotranspiración	40
Ecuación 5. Cálculo de la constante I	41
Ecuación 6. Cálculo de la constante i	41
Ecuación 7. Cálculo de la constante a	41
Ecuación 8. Cálculo de la Infiltración	42
Ecuación 9. Determinación de potencial de recarga de las zonas evaluadas	50
Ecuación 10. Cálculo de Porcentaje	102

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo proponer un conjunto de obras civiles para recarga hídrica por lluvia que sean viables para construir en la Comunidad de El Laurel, Guanajuato. Inicialmente fue necesario establecer el marco teórico que permitiera tener un concepto preciso y esquemático del ciclo hidrológico, del movimiento del agua subterránea y superficial, así como de la importancia del cálculo del balance hídrico para una cuenca hidrológica. Posteriormente mediante una visita a campo y búsqueda bibliográfica, se optó por la metodología propuesta por (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009) para establecer una ponderación a cada factor que condiciona la recarga hídrica, como son: el tipo y uso de suelo, la cobertura vegetal perenne, la pendiente del terreno, y el tipo de roca presente en el área de estudio, siendo los valores desde 1 para muy baja capacidad de recarga, hasta 5 para una alta capacidad de recarga.

Una vez determinados dichos factores, se realizó la descripción detallada de cinco obras técnicamente posibles para su construcción, especificando en cada una de ellas los valores de campo recomendados para cada uno de los factores de recarga hídrica. Posteriormente, del trabajo desarrollado por (Ramos, 2018) se retomó el cálculo del balance hídrico para la zona, determinado teóricamente mediante el registro de 12 estaciones meteorológicas cercanas a la comunidad, demostrando que sí se dispone de las condiciones para que exista recarga subterránea en El Laurel, utilizando también los mapas de la zona elaborados en ese mismo proyecto, los cuales fueron interpretados en el presente trabajo, considerando las ponderaciones establecidas según la metodología antes mencionada, y finalmente realizando tablas comparativas que permitieron observar los valores de los factores determinantes para la recarga hídrica presentes en la zona de estudio así como los valores óptimos recomendados para la implementación de cada obra, y con ello, ser capaz de proponer las obras civiles de recarga hídrica viables para su construcción en la Comunidad de El Laurel, Guanajuato.

ABSTRACT

This research work aimed to propose a set of civil works for rainwater recharge that are viable to build in the Community of El Laurel, Guanajuato. Initially, it was necessary to establish a theoretical framework that would allow us to have a clear and schematic concept of the hydrological cycle, the movement of ground and surface water, as well as the importance of calculating the water balance for a hydrological basin. Later, through a field visit and bibliographic search, the methodology proposed by (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009) was chosen to establish a weighting for each factor that conditions water recharge, such as the type and use of land, the perennial vegetation cover, the slope of the terrain, and the type of rock present in the study area, the values being from 1 for very low recharge capacity, up to 5 for a high recharge capacity. Once these factors were established, a detailed description was made of five technically possible works for their construction, specifying in each of them the recommended field values for each of the water recharge factors. Subsequently, from the work developed by (Ramos, 2018) resumed the calculation of the water balance for the area, determined theoretically by registering 12 weather stations close to the community, demonstrating that the conditions are available for underground recharge in El Laurel, maps of the area elaborated in that same project were also used, which were interpreted in the present work considering the weights established according to the aforementioned methodology, and finally, comparative tables were made that allowed us to observe the values of the factors determinants for the water recharge present in the study area, and the recommended optimal values for the implementation of each work, being able to propose the viable civil works of water recharge for its construction in the community of El Laurel, Guanajuato.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La hidrósfera representa un volumen de 1,386 millones de km³, de los cuales el 97.5% son agua salada y el restante 2.5% agua dulce, es decir, solo 35 millones de km³, sin embargo de este porcentaje de agua dulce, el ser humano solo tiene disponible el 70% para su consumo, pues el resto se encuentra en forma de nieve, hielo o glaciares, haciendo difícil su consumo, además, de este 70% de agua dulce que teóricamente tenemos disponible, solo una fracción se encuentran en aguas superficiales o subterráneas poco profundas, por lo contrario un gran porcentaje se encuentra demasiado profundo o alejado de las ciudades y comunidades, lo cual encarece o dificulta su utilización efectiva (Comisión Nacional del Agua, 2011). En México, de cada 100 litros de agua que llueven, el 73% regresa a la atmosfera mediante evapotranspiración, el 21% escurre por ríos y arroyos y únicamente el 6.2% logra infiltrarse en los mantos acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2011).

Datos proporcionados por la FAO (Food and Agriculture Organization, 2010), muestran que México ocupa el octavo lugar mundial con mayor extracción de agua en el mundo, con un volumen de 80.6 km³/año, cuyo principal uso es el agrícola con un 76.7%, seguido del abastecimiento público con el 14.1% y finalmente para uso industrial con el 9.20%.

Uno de los indicadores más importantes y más eficientes para medir el impacto de la actividad humana en el recurso hídrico es la denominada huella hídrica o water footprint, la cual consiste en sumar el agua que es utilizada por cada persona para sus actividades ordinarias y aquella necesaria para producir los bienes y servicios que consume, las variables que intervienen para el cálculo de dicha huella son: el nivel de consumo, el tipo de consumo, la calidad del consumo, el clima y la eficiencia con la que el agua es utilizada. El agua utilizada en estos cálculos contempla aquella extraída de acuíferos, lagos, ríos, arroyos y el agua de lluvia que alimenta los cultivos de temporal. Para el año 2011 el promedio anual de agua utilizada por cada ser humano fue de 1,240 m³/año, siendo la huella hídrica de México ligeramente superior al promedio anual con un consumo aproximado de 1,441 m³/año de agua por habitante.

El manejo de los recursos hídricos ha constituido una prioridad para el ser humano desde el principio de la civilización, por ejemplo, al construirse las primeras ciudades, las cuales se asentaron a las orillas de grandes ríos o en los deltas de estos, como es el caso de Paris (Sena), El Cairo (Nilo) o Londres (Támesis). Sin embargo, al darse la explosión demográfica en las grandes ciudades fue necesario el movimiento de los asentamientos a zonas áridas y semiáridas, factor que favoreció el desarrollo de métodos de captación y almacenamiento de agua de lluvia. (Ballén, 2006)

Ballen data algunas de las primeras estructuras de captación de agua alrededor del año 4,000 a.C, en el desierto de Negév en Israel y Jordania, y en el Sur de Yemen, en donde también se encuentra evidencia de estructuras milenarias para la captación de agua. Por otro lado, nos tenemos que remontar al año 3,000 a.C. para encontrar registro de la recarga de acuíferos como método de almacenamiento de agua, con la construcción de represas, tanques de percolación y tanques de almacenamiento en zonas áridas y semiáridas en la India.

A principios del siglo XX, el desarrollo de las grandes ciudades aumento la demanda de agua potable y sobre todo en las épocas de escases. Derivado de este desarrollo urbano se comienzan a suscitar algunos problemas como la dificultad de abastecer poblaciones dispersas, la contaminación de aguas superficiales a causa de la propia intervención humana y la limitación de recursos hídricos. A partir de los años 50's es cuando realmente se comienza a gestionar la disposición y el uso sustentable del agua. En esta época países como Estados Unidos o Australia comenzaron a desarrollar obras más complejas de captación y almacenamiento de agua superficial y recarga de acuíferos, que han demostrado ser eficientes hasta el día de hoy.

Un indicador importante del desarrollo hidráulico que tiene un país es su capacidad de almacenamiento de agua para su aprovechamiento en diversos usos y el control de avenidas para evitar inundaciones, dentro de este rubro México ocupa el lugar 19 a nivel mundial con una capacidad de almacenamiento per cápita de 1,189 m³/hab (CONAGUA, 2011).

El agua dulce es el recurso natural más importante para el ser humano y todos los seres vivos, el estudio de los métodos de captación de agua potable, su almacenamiento y su posterior manejo sustentable resultan fundamentales bajo cualquier circunstancia. El aumento en la demanda de agua potable que sufrimos hoy día debido a un acelerado crecimiento poblacional, aunado a la contaminación del agua por parte de la industria en general, el uso de solventes, aerosoles y productos químicos por parte del ser humano y finalmente su uso desmedido e irresponsable, ha ocasionado ya una compleja y alarmante huella hídrica. Lamentablemente este problema está lejos de terminar, pues la industrialización de las ciudades y la población mundial aumentan, creciendo por lo tanto la demanda y contaminación del agua. Esta problemática ya ha dejado de ser exclusiva de países en pobreza o en vías de desarrollo, para afectar directamente a países desarrollados.

En años recientes, la gran mayoría de naciones desarrolladas y en vías de desarrollo han comenzado a prestar atención al problema, preocupándose por la gestión, el acceso y la calidad de sus recursos hídricos implementando medidas localmente, sin embargo, a escala global las Naciones Unidas han propuesto 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible u ODS a cumplir entre el año 2020 y 2030 (Organización de las Naciones Unidas, 2015), en donde destaca el objetivo 6 cuyas metas son lograr el acceso universal y equitativo del agua potable a un precio accesible para todos, lograr el acceso de saneamiento e higiene equitativos para poner fin a la defecación al aire libre, mejorar la calidad del agua reduciendo el vertimiento de productos químicos o peligrosos, asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos en todos los niveles, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, lograr la cooperación internacional para la creación de programas referentes al agua y su gestión, y por último apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.

El estado de Guanajuato presenta un sobreexplotación de agua subterránea en 18 de sus 20 acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2016) y aunque en el

estado existe una cobertura de agua potable para su población del 97% , el 75.9% de la población vive en zonas urbanas con más de 2,500 habitantes, mientras el otro 24.1% de la población vive en zonas rurales con menos de 2,500 habitantes (Ramos, 2018), en donde muchas de estas comunidades dispersas y pequeños asentamientos rurales presentan enormes dificultades para tener acceso al agua potable, pues en muchos casos los habitantes de estos poblados necesitan caminar o transportarse grandes distancias para obtener un poco del recurso hídrico en aprovechamientos lejanos. Es por esto que resulta importante implementar obras hidráulicas poco costosas y de construcción sin maquinaria, para la captación de agua de lluvia y su posterior recarga a los acuíferos, para que, como se realizó en esta ocasión para la Comunidad de El Laurel en Guanajuato, se puedan remediar una gran cantidad de zonas de alto potencial de recarga a lo largo del país, sin la necesidad de grandes inversiones económicas o estructuras complejas que resulten complicadas de mantener, abasteciendo además de manera directa durante el proceso, la demanda de las comunidades que implementen las obras, tanto para su consumo como para el desarrollo agrícola mediante el aumento de la humedad en el suelo que algunas de estas obras favorece.

1.1 Justificación

Actualmente México presenta una gran demanda de recursos hídricos, para su uso público e industrial, un gran crecimiento poblacional, con escasa conciencia ambiental, sumado a una intensa explotación de agua subterránea, ha orillado a que nuestro país presente una sobreexplotación de agua subterránea en 105 de sus 654 acuíferos y el estado de Guanajuato en 18 de sus 20 acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2016). Las ciudades densamente pobladas se han visto obligadas a implementar obras hidráulicas complejas que les permitan extraer y manejar grandes volúmenes de agua para lograr abastecer la demanda de sus habitantes, sin embargo; las comunidades rurales ajenas a estas sofisticadas estructuras ingenieriles se han convertido por otro lado, en una opción viable para implementar obras superficiales de captación y recarga más simples, con las cuales se logra abastecer el consumo de sus habitantes, se favorece la infiltración subterránea necesaria para mantener el balance hídrico de los aprovechamientos

cercanos y se contribuye al desarrollo agrícola de la zona, gracias al aumento de la humedad en el suelo que muchas de estas obras propician, pudiendo disminuir así el alto porcentaje de agua potable que se destina al riego de cultivos.

De aquí parte el interés y surge la necesidad de contribuir a la recarga hídrica para la remediación de una pequeña porción del acuífero perteneciente a la subcuenca Silao-Romita en la zona de la Comunidad de El Laurel, localizada al noreste del municipio de Guanajuato, mediante la propuesta de una o más obras civiles para la captación de agua de lluvia y su posterior recarga natural completamente libre de cualquier intervención industrial que pudiera contaminar el agua durante su proceso de recarga, con la que además se favorecería la actividad agrícola de la zona, y se verían abastecidas las demandas para el consumo de la comunidad.

Debido a las abundantes reservas minerales localizadas en el subsuelo de la Ciudad de Guanajuato, se motivó décadas atrás al estudio exhaustivo de su topografía, su geología y su hidrología. Por lo que, para este estudio se cuenta ya con la hidrología superficial, la caracterización del acuífero receptor, se conocen también los datos de litología y aspectos geológicos e hidráulicos de los materiales que integran el acuífero, por lo que restaría mediante observación y trabajo de campo establecer la pendiente del terreno, el tipo y uso del suelo, la cobertura vegetal y el tipo de roca en el que se encuentra empotrada la comunidad, además gracias a una serie de estaciones climatológicas se conocen también los datos climáticos fundamentales para el cálculo del balance hídrico, el cual fue calculado exitosamente en otro trabajo (Ramos, 2018) y el cual es indispensable para conocer el funcionamiento de este y cualquier sistema hidrológico.

En la siguiente investigación se profundiza en la metodología propuesta por Matus Silva (2009) en la que se establece una ponderación para distintos factores que determinan el potencial de infiltración que tendremos en nuestra área de interés, se reconocerá si existe almacenamiento subterráneo a través del balance hídrico de la cuenca en la que se encuentra ubicada la comunidad, y finalmente se hará un análisis y descripción de las distintas obras civiles de recarga natural hídrica que han demostrado ser sencillas y eficientes, para que

una vez consideradas las características presentes en el terreno, se propongan las obras civiles de recarga más adecuadas para la Comunidad de El Laurel.

1.2 Objetivo General

Recopilar y analizar información relacionada con la geohidrología, geomorfología, edafología y climatología de la zona en la que se ubica la Comunidad de El Laurel, así como compilar información afín a la recarga hídrica y los métodos superficiales de captación de agua de lluvia para proponer obras viables de implementar en El Laurel, Guanajuato, y cuyos criterios de implementación puedan ser utilizados también en otras comunidades.

1.3 Objetivos particulares

- Recopilar información sobre nuestra área de estudio, el ciclo del agua y el funcionamiento de una cuenca.
- Conocer los factores que determinan el potencial de recarga hídrica de una cuenca según Matus (2009) y detallar su ponderación para la Comunidad de El Laurel.
- Describir las distintas obras de captación y recarga hídrica, que técnica y económicamente podrían llevarse a cabo en la comunidad, detallando las características de suelo, cobertura vegetal, pendiente de terreno y tipo de roca, que se adaptan mejor a cada obra.
- Mediante observación y ayuda de mapas de la zona, establecer el valor de los factores que determinan el potencial de recarga en la comunidad.
- Reconocer a través del balance hídrico del área de estudio si existen las características necesarias para el almacenamiento del agua subterránea.
- Realizar tablas comparativas entre las características del terreno de El Laurel y las condiciones óptimas sugeridas para la implementación viable de las obras.

1.4 Antecedentes

Uno de los organismos internacionales más ocupados por la gestión y manejo del agua y sus obras de recarga es La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) Institución que destina una importante cantidad de tiempo y recursos en el desarrollo de información y tecnología que permita tener un mejor manejo y control de los recursos hídricos. A nivel nacional la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con ayuda de sus dependencias locales es la encargada de esta tarea, administrando y regulando toda la infraestructura hídrica del país. Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha publicado una importante cantidad artículos y trabajos sobre obras de conservación y recuperación de suelo para el desarrollo de la ganadería y la agricultura, trabajo que de manera nacional compete a la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

Sobre la calidad del agua en nuestra área de estudio, en el trabajo de investigación titulado *Contaminación por nitratos en acuíferos del norte de México y del Estado de Guanajuato* (Martínez, Castellanos, Rivera, Núñez, & Faz, 2006) se estudia de manera detallada la contaminación de acuíferos en el estado de Guanajuato y de manera más específica a la contaminación del acuífero Lerma-Chapala a causa de la actividad antropogénica, en especial por las actividades agrícolas y ganaderas y los lixiviados que estos producen. Dentro de los distintos trabajos desarrollados a nivel nacional sobre las obras de captación y recarga hídrica natural por agua de lluvia, así como de obras que permitan la conservación y recuperación de suelos, destacan el *Catálogo de obras y Practicas de Conservación de Suelo y Agua Apoyadas con el Componente de Conservación y Uso Sustentable del Suelo y Agua (COUSSA) Del Programa Uso Sustentable de Recursos Naturales para la Producción Primaria* (Fernández, Martínez, & Ramírez, 2009), en este manual se describen los beneficios, y algunas de las características y dimensiones que deben tener dichas obras para su implementación, resulta útil este trabajo para nuestro proyecto pues además de proponer obras de recarga complejas, también se proponen una serie de infraestructuras que pueden ser construidas con mano

de obra sencilla y económica, destaca también el trabajo *Prácticas para la conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas* (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias., 2005) cuyas prácticas pueden ser fácilmente aplicadas a nuestra comunidad gracias a sus características climáticas. Hablando ya del cálculo del potencial de recarga hídrica presente en una zona, distintas investigaciones alrededor del mundo han desarrollado sus propias metodologías que nos permitan su estimación. De entre todas ellas, *La Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del Río Jucuapa, Nicaragua* (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009) presenta la metodología más viable para nuestro objetivo, considerando como factores condicionantes de potencial recarga, el tipo y uso de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y el tipo de roca, factores que pueden ser establecidos en nuestra área y cualquier otra, con una detallada exploración de campo, pudiendo complementar dicha exploración con mapas geológicos y topográficos.

El trabajo de investigación que proporciona un antecedente bibliográfico muy importante para nuestro objetivo es la Tesis de *Análisis Hidrogeológico para Identificar Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en los Manantiales de las Comunidades, El Terrero y El Laurel del municipio de Guanajuato* (Ramos, 2018). En dicho trabajo se realizó una profunda descripción de las comunidades de El Terrero y El laurel, proponiendo las zonas potenciales de recarga hídrica a través de la metodología de Matus, también se realizó el cálculo del balance hídrico para la zona a partir del análisis de los datos registrados por 12 estaciones meteorológicas cercanas a las comunidades, demostrando, asimismo, que si existe almacenamiento de agua subterránea en el área. Aunque en dicha Tesis se proponen dos obras de recarga hídrica para la comunidad de El Laurel, el presente trabajo de investigación busca ser un complemento a esta, profundizando en las características y parámetros necesarios por cada obra para garantizar su máximo aprovechamiento dentro de la comunidad de El Laurel, y a su vez dando un enfoque adicional a la investigación, al convertirse en un manual de los parámetros fundamentales

que se deberán de controlar al momento de considerar la implementación eficiente de una obra de recarga hídrica sencilla y de bajo costo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 Ubicación del área de estudio

La localidad El Laurel se encuentra situada en el Municipio de Guanajuato, Guanajuato, México en las coordenadas 14 Q 263696.00 m E, 2337231.00 m N siendo su altitud de 2350 m.s.n.m. (Figura 1). Ubicada dentro de la zona geohidrológica Silao-Romita, forma parte de la cuenca del Rio Lerma, limitando al norte y este por la sierra de Guanajuato, al sur por los cerros del Veinte y Arandas, y al poniente por una serie de lomas que lo separan de la zona geohidrológica del Valle de León.

La localidad está habitada por 96 personas de las cuales, 52 corresponden al género masculino y 44 al género femenino. Cuenta con 16 viviendas particulares habitadas. El porcentaje de analfabetismo entre los adultos es del 10.42% y el grado de escolaridad es de 4.20 años. La comunidad cuenta con dos escuelas; un jardín de niños y una escuela de nivel primaria. Cuenta con un grado de marginación muy alto. (Datos del censo, INEGI 2010).

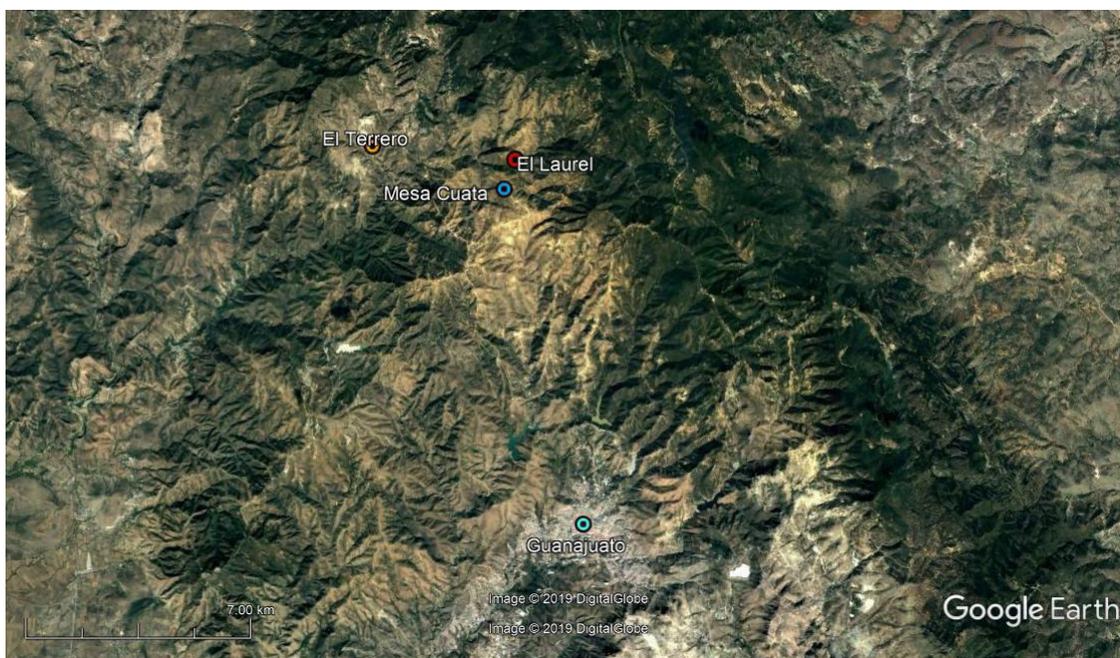


Figura 1. Localización del área de estudio (Imagen tomada a través de Google Earth Pro con coordenadas de vista 14 Q 264974.20 m E, 2331785.10 m N).

2.2 Conceptos fundamentales de Geohidrología

Mediante la consulta de bibliografía especializada, se definen los diferentes conceptos geohidrológicos que resultan fundamentales establecer para el presente trabajo de investigación, permitiendo tener una visión completa del ciclo dinámico del agua dentro de una cuenca y su relación superficial y subterránea.

Ciclo Hidrológico

El agua representa uno de los recursos naturales más dinámicos estando presente en estado líquido, sólido y gaseoso, al movimiento general del agua en la tierra, se le denomina Ciclo Hidrológico, ascendente por evaporación y descendente por las precipitaciones y la escorrentía superficial y subterránea (Sánchez, 2017). Dentro de las fases que componen el Ciclo Hidrológico el mismo autor propone las siguientes partiendo de la precipitación o caída de lluvia:

a) Evaporación

Una parte se evapora desde la superficie del suelo (“charcos”) o si ha quedado retenida sobre las hojas de los árboles. A este último fenómeno se le denomina “interceptación”, y en lluvias de corta duración sobre zonas de bosque puede devolver a la atmósfera una gran parte del agua precipitada sin haber tocado el suelo.

b) Infiltración

El agua infiltrada puede, a su vez, seguir alguno de estos caminos:

b1) Evaporación: Se evapora desde el suelo húmedo, sin relación con la posible vegetación.

b2) Transpiración: Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo, una pequeña parte es retenida para su crecimiento y la mayor parte es transpirada.

b3) Evapotranspiración: Fenómeno que se obtiene de la suma de la evaporación y la transpiración.

b4) Escorrentía subsuperficial: tras un corto recorrido lateral antes de llegar a la superficie freática acaba saliendo a la superficie

b5) Si no es evaporada ni atrapada por las raíces, la gravedad continuará llevándola hacia abajo, hasta la superficie freática; allí aún puede ser atrapada por las raíces de las plantas “freatofitas” las cuales son muy profundas, y que, a diferencia de otras plantas, buscan el agua del medio saturado.

b6) El agua restante da lugar a la escorrentía subterránea.

c) Escorrentía Superficial

Llamada así al agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, y la cual escurre superficialmente. A esta agua aun le pueden suceder varias cosas:

c1) Parte es evaporada desde la superficie de ríos, lagos y embalses también se evapora una pequeña parte.

c2) Otra parte puede quedar retenida como nieve o hielo o en lagos o embalses. (“Escorrentía superficial diferida”).

c3) Finalmente una parte importante es la escorrentía superficial rápida que sigue su camino hacia el mar.

Una vez que la infiltración subterránea alcanza la zona saturada, el agua permanecerá ahí hasta que sea descargada de manera natural por medio de un manantial, evapotranspiración, alimentando un cauce o por afluencia al mar, o bien, sea extraída artificialmente por pozos de bombeo o sondeos.

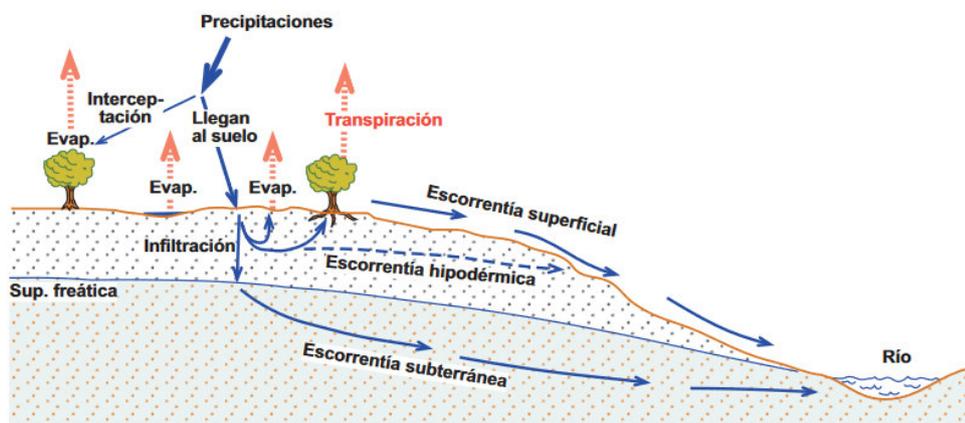


Figura 2. Fases del Ciclo Hidrológico (Sánchez, 2017).

Cuenca

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 2006). Se considera a una cuenca como un sistema integrado por varias subcuencas o microcuencas (Ordoñez, 2011).

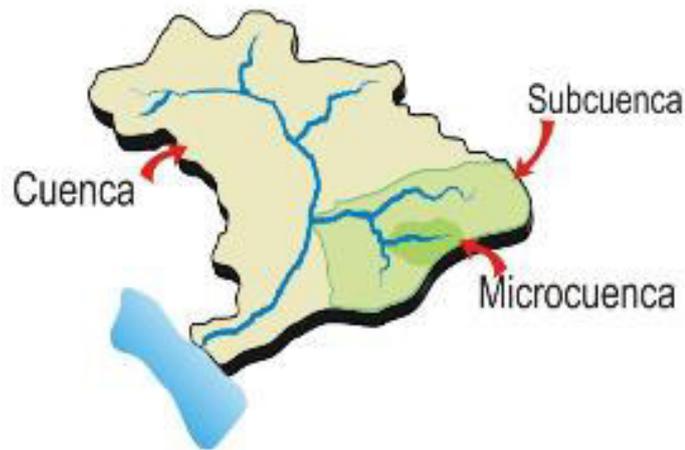


Figura 3. Cuenca, subcuenca y microcuenca (Ordoñez, 2011)

A continuación, se describen conceptos fundamentales de cuencas definidos por (Ordoñez, 2011). Comenzando por los términos de cuenca hidrológica y cuenca hidrográfica, los cuales generan cierta confusión al identificarlos, una cuenca hidrográfica, se refiere a la definición geográfica de la misma, es el contorno o límite de esta que drena agua en un punto en común, por el contrario, una cuenca hidrológica se suele entender como una unidad para la gestión que se realiza dentro de la cuenca hidrográfica.

Una cuenca está compuesta generalmente de tres partes (Ordoñez, 2011), la primera de ellas es la cuenca alta, la cual corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas, seguida de la cuenca media, que es el lugar donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido, y finalmente la cuenca baja o zonas transicionales, que es la parte de la cuenca en donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales. Considerando el movimiento

que tendrá el agua sobre la cuenca podemos delimitar tres zonas que componen una cuenca (Ordoñez, 2011)., la primera de ellas será la zona de cabecera, cuya zona es donde nacen las corrientes hidrológicas, por ende, se localizan en las partes más altas de la cuenca. Generalmente la rodean y tiene la función de captar el agua, conforme continuemos el descenso de las partes más altas de la cuenca, entraremos en la llamada zona de captación y transporte, que es la porción de la cuenca que en principio se encarga de captar la mayor parte del agua que entra al sistema, así como de transportar el agua proveniente de la zona de cabecera, por último consideraremos la zona de emisión, la cual estará caracterizada por ser la zona que emite hacia una corriente más caudalosa el agua proveniente de las otras dos zonas funcionales.

Dentro de un sistema de cuenca tendremos que divisar una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica, la denominada divisoria de aguas o “parteaguas”. Una divisoria de aguas marca el límite entre cuenca hidrográficas y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos (Ordoñez, 2011). Por lo tanto, al evaluar una cuenca tendremos que considerar como límite de influencia el parteaguas de la cuenca.

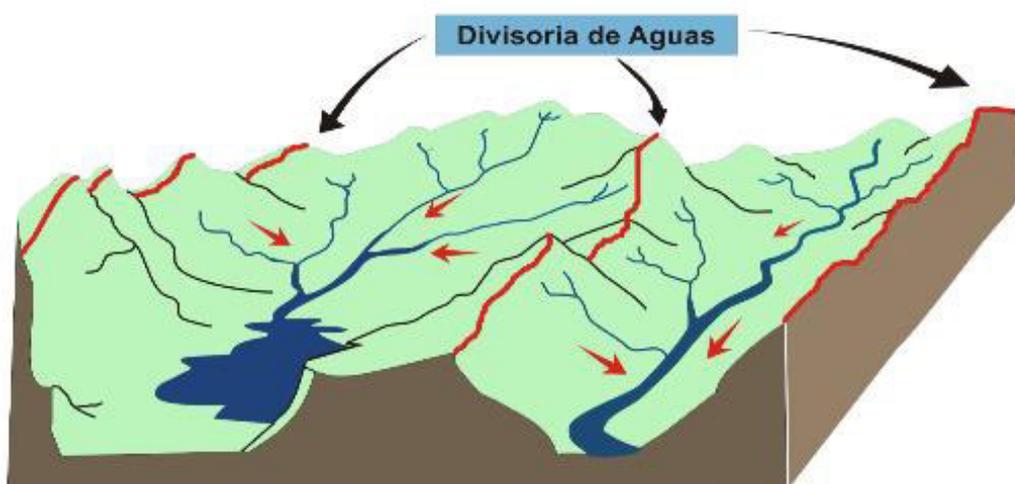


Figura 4. Divisoria de Aguas (Ordoñez, 2011)

Toda cuenca deberá de contar con un río principal, el cual suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud. La mayoría de las cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura. Además de este río principal, una cuenca presentara además otros dos tipos de ríos, el río afluente, que corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que desemboca en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia, y el río efluente, contrario de un afluente es decir, una derivación (natural o artificial) que se desprende fuera de la corriente principal de un río mayor a través de otro menor (Ordoñez, 2011).

Considerando la evacuación del agua de la cuenca, existen fundamentalmente tres tipos de cuencas (Ordoñez, 2011): endorreicas, exorreicas y arreicas: Dentro de una cuenca endorreica el punto de salida del agua está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago, en una cuenca exorreica, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar, y por último en una cuenca arreica, las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje. Los parámetros relativos a la red de drenaje describen la forma en que están conectados los canales en una cuenca determinada, y esto influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación. El primero de ellos y muy determinante será el orden de cuenca, conocer este dato nos permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal. Aunque existen varios criterios de jerarquización dos de los más utilizado es el Método de Horton (1945), el cual se realiza a través de las siguientes premisas:

- a) Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.
- b) Los cauces de segundo orden se forman en la unión de dos cauces de primer orden y, en general, los cauces de orden n se forman cuando dos cauces de orden $n-1$ se unen.
- c) Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.

d) El orden de la cuenca es el mismo del su cauce principal a la salida.

El Método de Strahler (1952), que es muy parecido al de Horton, con la diferencia de que en el esquema de Strahler, un mismo río puede tener segmentos de distinto orden a lo largo de su curso, en función de los afluentes que llegan en cada tramo. El orden no se incrementa cuando a un segmento de un determinado orden confluye uno de orden menor, cabe aclarar que el sistema de Strahler es usado universalmente en el presente.

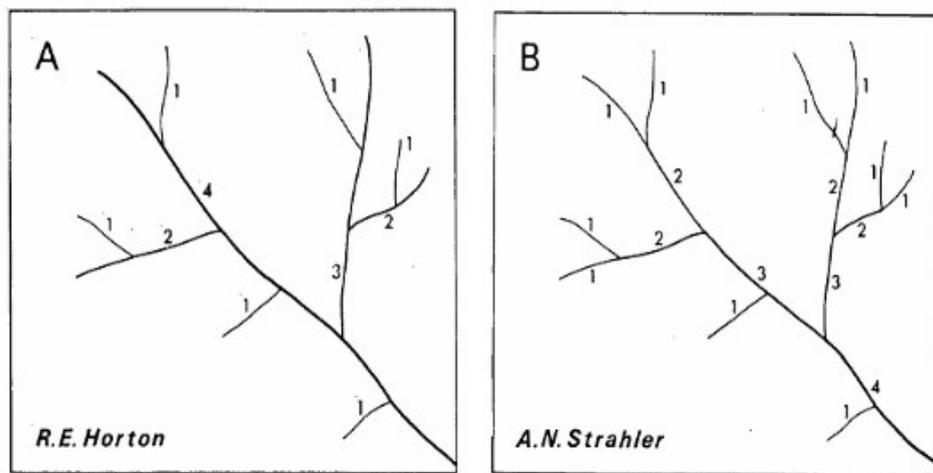


Figura 5. Métodos de orden de ríos (Ordoñez, 2011)

El segundo parámetro relativo a la red de drenaje serán los patrones de drenaje, que son las trayectorias o al arreglo que guardan entre sí, los cauces de las corrientes naturales dentro de una cuenca (Ordoñez, 2011).

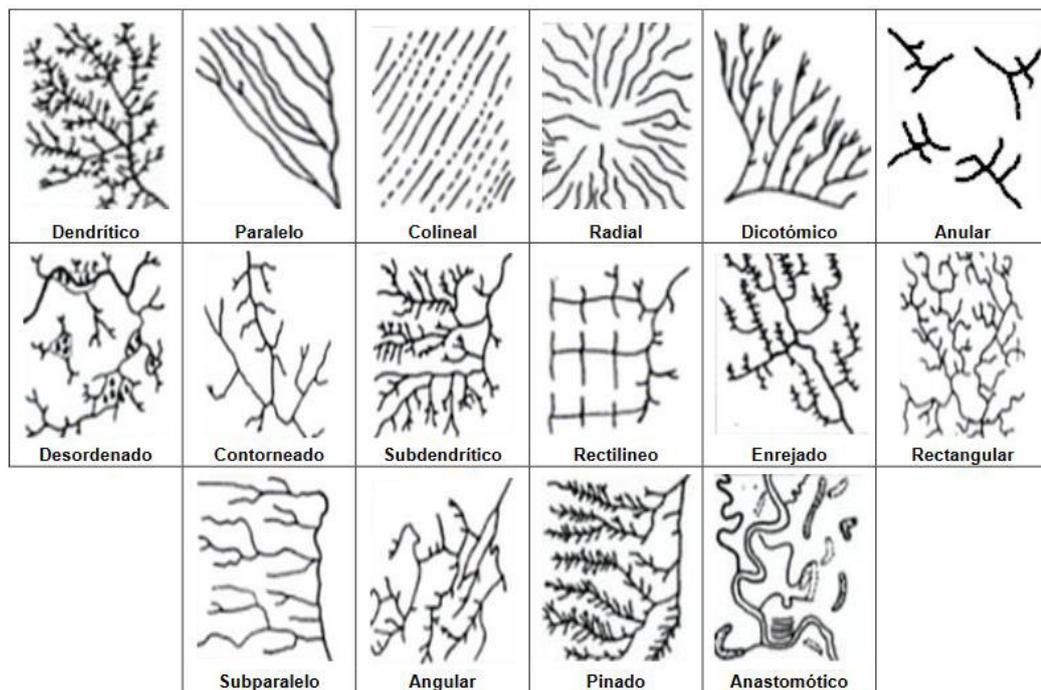


Figura 6. Patrones de drenaje (Pérez, 2015)

Agua subterránea

A toda el agua que se encuentra en forma natural por debajo de la superficie terrestre se llama agua subsuperficial, independientemente de que se encuentre en la zona saturada o en la no saturada. Sin embargo, solo el agua que se encuentra en la zona saturada, es decir por debajo del nivel freático, se le llamara agua subterránea (Price, 2003). Líneas atrás se observó como de los distintos caminos que podía seguir la escorrentía uno de los últimos era la infiltración subterránea, sin embargo, no se detallaron los distintos factores que condicionan esta recarga subterránea, es por eso por lo que a continuación se especifican estos parámetros hidráulicos y otros conceptos propios de las aguas subterráneas y su movimiento.

Para comprender el movimiento del agua subterránea es necesario continuar nuestro recorrido desde el punto en el que inicia la infiltración de la escorrentía en el suelo, ahí observamos que de la lluvia que cae, por factores como la cobertura vegetal o el uso del suelo, buena parte es evaporada, sin embargo otra logra infiltrarse en las zonas más superficiales del suelo, a esta zona surcada por raíces y vacíos en el suelo por acción de insectos y animales la

llamaremos cinturón de humedad del suelo (Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005), una vez que el agua de aquí no es evaporada y continua su percolación hacia abajo, llegara a la denominada franja capilar (Tarbuck et al, 2005), en la cual el agua subterránea es mantenida por la tensión superficial en pequeños conductos comprendidos entre los granos del suelo o de sedimento, estas dos zonas juntas se encuentran dentro del área denominada zona de aireación o no saturada (Tarbuck et al, 2005). La base o capa inferior de dicha zona y el agua contenida en ella se encuentran limitadas por el denominado nivel freático, por lo tanto, la zona ubicada por debajo del nivel freático se llamará la zona de saturación (Tarbuck et al, 2005), zona donde todos los espacios libres del sedimento y la roca están completamente llenos de agua, finalmente el agua situada en el interior de la zona de saturación se denomina agua subterránea.

El tipo de materiales que se tenga subsuperficialmente, determinara en gran medida la capacidad de movimiento y velocidad que tenga esta agua subterránea. Hay dos factores fundamentales que condicionan este movimiento hídrico, la porosidad del material y su permeabilidad. La porosidad de una roca determina la cantidad de agua subterránea que puede almacenarse, y se define como el porcentaje del volumen total de roca o sedimento formado por poros (Tarbuck et al, 2005). Es posible hablar de dos tipos de porosidad, la porosidad primaria es aquella que resulta al originarse la formación geológica, y la porosidad secundaria, que será cualquier abertura que se produzca en la roca posteriormente. Debido a que la porosidad por sí sola no puede medir la capacidad de un material para suministrar agua subterránea (Pues una roca podría tener mucha porosidad, pero si estos poros fueran muy pequeños, o tuvieran una disposición muy desfavorable, impedirían así el flujo de agua a través de ella, lo que la convertiría en una roca con porosidad eficaz baja), surge el segundo factor, la permeabilidad o conductividad hidráulica (k) (Sánchez, 2017), la cual es la capacidad de un material para transmitir un fluido (Tarbuck et al, 2005).

Después de determinar el camino que sigue el agua subterránea, nos preguntamos si puede existir almacenamiento subterráneo de ese volumen infiltrado de agua, pues un acuífero trata precisamente del volumen subterráneo

de roca y arena que contiene agua (Ordoñez, 2011), y en la cual esta se puede mover con facilidad (Tarbuck et al, 2005). Mediante el cálculo del balance hídrico, seremos capaces de determinar el volumen de almacenamiento de agua subterránea en un acuífero, mediante la diferencia de volumen de entrada de agua a una cuenca y su volumen de salida. Según la composición litológica que tengan estas estructuras geológicas, pueden ser clasificado en tres tipos más, además de acuíferos:

Acuicludo: Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella, algunos materiales que forman este tipo de estructuras son los limos y las arcillas (Sánchez, 2017).

Acuitardo: Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero que el agua circula a través de ella con dificultad, algunos materiales que forman este tipo de estructuras son las arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderada (Sánchez, 2017).

Acuífugo: Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella, algunos materiales que forman este tipo de estructuras son los granitos o esquistos inalterados y no fracturados (Sánchez, 2017)

Finalmente, como último parámetro hidráulico a considerar dentro de un sistema geológico de almacenamiento de agua subterránea será la transmisividad de la roca, cuyo parámetro nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica, la cual es una combinación de la conductividad hidráulica y del espesor del estrato saturado (Sánchez, 2017). El cálculo de la transmisividad se hará mediante la siguiente fórmula:

$$\textit{Transmisividad} = \textit{Conductividad hidráulica} * \textit{Espesor}$$

Ecuación 1. Cálculo de la Transmisividad de un estrato

Relaciones entre el agua superficial y subterránea en una cuenca

En la descripción de las fases del ciclo hidrológico se mencionó como la escorrentía dentro de una cuenca, además de aportar agua a ríos y arroyos, puede también aportar agua a un acuífero si las condiciones de infiltración lo permiten, sin embargo, puede resultar que no solo sea un río u arroyo el que aporte agua, en muchos casos el flujo y aporte es de acuíferos a ríos, por ejemplo. Los tipos de conexiones entre agua subterránea y superficial son las siguientes (Cruickshank, 1992):

a) Manantiales

Cuando el nivel piezométrico del acuífero sube sobre el nivel del terreno, el agua tiende a aflorar y alimentar cuerpos de agua superficiales. Una manifestación de esto son los manantiales. Los aislados (ojos de agua) se dan por lo general en acuíferos semiconfinados, por fisuras o partes débiles de la capa confinante (Cruickshank, 1992).

b) Cauce influente o río perdedor

El río podrá aportar agua al acuífero de dos maneras, la primera si el lecho del río se encuentra en contacto con el nivel freático, y la segunda sucede cuando el nivel freático se encuentra debajo del lecho del río y la escorrentía subterránea aporta agua al acuífero.

c) Cauce efluente o ganador

Este fenómeno sucederá cuando el nivel freático este por encima del lecho del río, aportando así agua del acuífero al río. Será en estos casos que hablaremos de un río de régimen perenne, el cual podrá llevar flujo de agua aun en tiempo de secas.

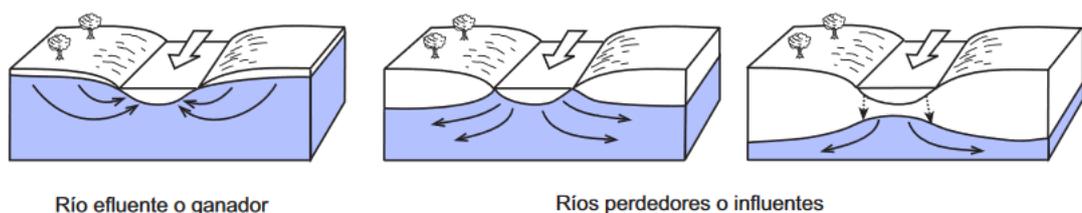


Figura 7. Conexión y aporte de agua entre ríos y acuíferos, dibujado por (Sánchez, 2017)

2.3 Cuenca Lerma-Chapala y su hidrología superficial

La Comunidad de El Laurel se encuentra sobre la zona geohidrológica Silao-Romita, la cual a su vez forma parte de la Cuenca hidrológica Río Lerma-Chapala, cuya región hidrológica es la número 12 y se encuentra ubicada en el centro del país. Esta zona hidrológica está comprendida en parte de los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro, con una superficie total de 51,887 km² (Diario Oficial de la Federación, 2006). El área de influencia de esta cuenca se localiza en la porción suroeste del estado de Guanajuato, la cual cubre una superficie de 983.2 km² aproximadamente, por lo que representa el 3.2% de la superficie estatal. Las corrientes superficiales en la zona integran un drenaje de tipo dendrítico, constituido por el río Lerma, el cual es el principal colector de la cuenca y de régimen perenne (INEGI, 1998).

El río Lerma nace en la laguna de Chignahuapan o primera laguna del Lerma, al sureste de la ciudad de Toluca y termina en el Lago de Chapala, cuerpo de agua compartido por los estados de Jalisco y Michoacán; la longitud del río sobrepasa los 700 km. (Diario Oficial de la Federación, 2006). A lo largo de su recorrido desde la laguna de Chignahuapan hasta el lago de Chapala, se integrarán al cauce principal tributarios como los ríos La Gavia, Jaltepec, Laja, Silao-Guanajuato, Turbio, Angulo y Duero.

En la parte norte de la cuenca Lerma-Chapala la topografía es montañosa, destacan los cerros El Gallo y El Metate, y alcanzan una altura de 2,000 m.s.n.m.; la parte sur está constituida por lomeríos con pendientes moderadas (INEGI, 1998).

La zona de Silao-Romita, se localiza en la porción centro-occidental del estado, limita al norte y este por la sierra de Guanajuato, al sur por los cerros del Veinte y Arandas, y al poniente por lomeríos que la separan de la zona geohidrológica de valle de León. Su extensión es de 2,465 km², abarca cierta parte de los municipios de Silao, Romita, Irapuato y Guanajuato. El área pertenece a la cuenca hidrológica del río Lerma y localmente está drenada por los ríos La Llave, Silao y Guanajuato, los cuales confluyen a corta distancia, aguas arriba de la ciudad de Irapuato (INEGI, 1998).

2.4 Geología y Estratigrafía

La parte norte de la zona geohidrológica Silao-Romita está ocupada por la sierra de Guanajuato, la estratigrafía general de la Sierra se describe como consistente de dos conjuntos litológicos claramente diferenciables, a los que se ha propuesto denominar como: 1) Complejo Basal y, 2) Rocas Terciarias (Orozco, 2014), de manera local las rocas que afloran en la comunidad de El Laurel corresponden al Complejo Basal. Este grupo de rocas consiste en dos secuencias alóctonas; una es de afiliación volcano-plutónica y la otra volcano-sedimentaria. Las edades radiométricas determinadas para estas rocas abarcan desde el Jurásico tardío hasta el Terciario más temprano; entre las sedimentarias, de origen marino, metamorfoseadas e intensamente deformadas por acortamiento de la corteza, aparecen afloramientos aislados de cuerpos intrusivos, de composiciones y edades diversas (Orozco, 2014) Estos cuerpos intrusivos y conglomerados rojos continentales de edad Terciario Inferior y rocas volcánicas de tipo riolítico, representadas por tobas e ignimbritas, de color verde, gris y rosado, han dado lugar a estructuras muy complejas, debido a estos drásticos fenómenos intrusivos que depositaron enormes yacimientos minerales y que han provocado importantes movimientos tectónicos en el área (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1998).

La Comunidad El Laurel se encuentra ubicada en la parte norte de la denominada Cuenca de La Esperanza, en las faldas de la Sierra de Guanajuato. La Unidad Esperanza, la cual forma parte del Complejo Basal (Orozco, 2014) se puede dividir en dos unidades de acuerdo con el tipo de vulcanismo (Mengelle, Canet, Prol, González, & Camprubí, 2013): la inferior, de composición andesítica, con un espesor de 1800 m, y la superior, caracterizada por el vulcanismo dacítico-riolítico, con 1000 m de espesor. La unidad está representada por una alternancia de rocas volcánicas submarinas (volcanoclásticas y lavas andesíticas a dacíticas-riolíticas) y sedimentarias (calizas arcillosas, areniscas conglomeráticas y lutitas negras) (Mengelle, Canet, Prol, González, & Camprubí, 2013).

Las rocas que afloran al norte y en las inmediaciones de la Ciudad de Guanajuato, constituyen una porción de la sección superior de la Secuencia Vulcanosedimentaria Mesozoica de Guanajuato (SVMG), ya que suprayacen

estratigráficamente a la Formación Arperos. La SVMG se originó en un ambiente de cuenca de tras-arco (marginal) en la que se emplazaron basaltos de piso oceánico (Cuenca de Arperos), los cuales fueron cubiertos por series detríticas pelágicas con intercalación de rocas piroclásticas y de lavas andesíticas a dacíticas-riolíticas hacia la cima (Unidad Esperanza). Las rocas volcánicas de composición dacítica-riolítica, con intrusiones subvolcánicas graníticas asociadas, probablemente estén relacionadas con calderas submarinas que en sus etapas finales de formación pudieron haber desarrollado sistemas hidrotermales submarinos generadores de mineralizaciones VMS. Se estima que, incluyendo las series ofiolíticas (base de la cuenca de tras-arco), la SVMG podría alcanzar un espesor superior a los 4000 m (Mengelle et al, 2013).

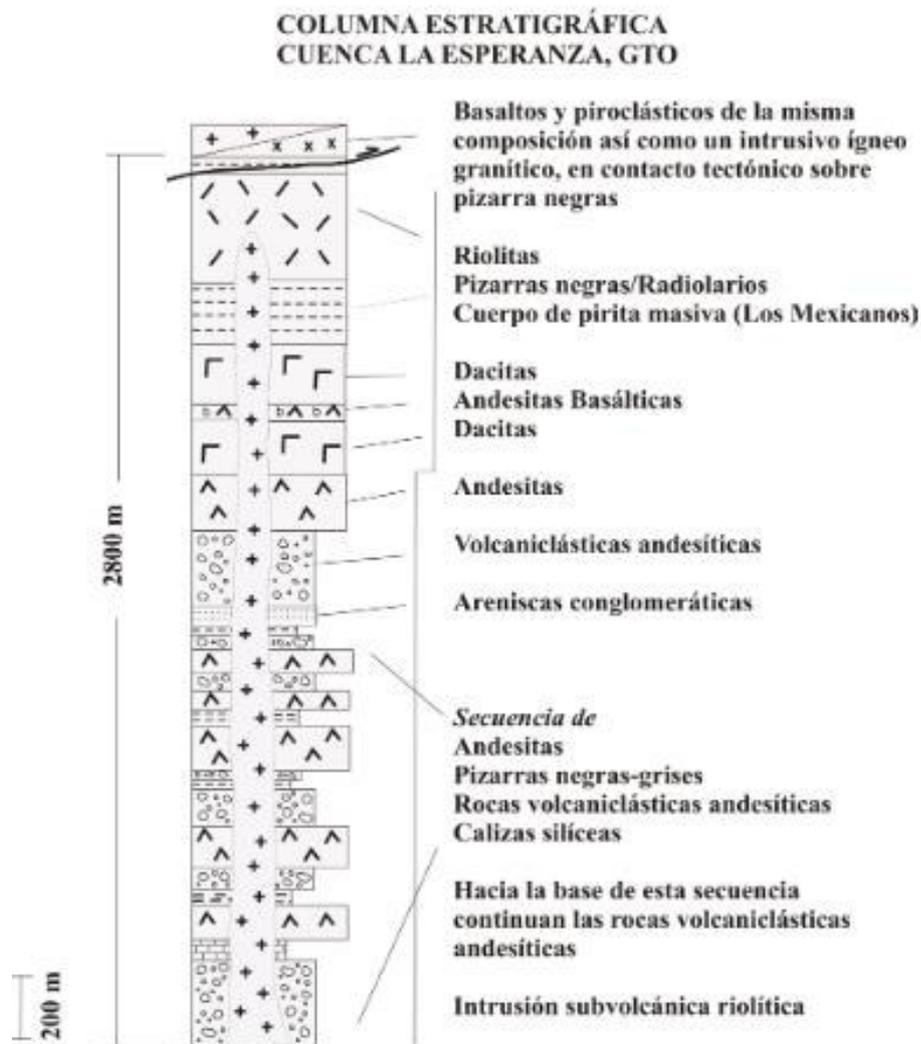


Figura 8. Columna estratigráfica de la secuencia vulcanosedimentaria marina al norte de Guanajuato (Unidad La Esperanza). (Mengelle et al, 2013).

2.5 Aspectos geohidrológicos que integran el acuífero de la cuenca Lerma-Chapala

Los principales acuíferos en explotación de la zona geohidrológica Silao-Romita son granulares formados por gravas, arenas y arcillas de gran espesor y de buena permeabilidad hacia la porción suroccidental (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1998).

En la porción nororiental, en los sedimentos granulares predomina el componente arcilloso, por lo cual disminuye notablemente la permeabilidad.

Al norte de Silao, existen acuíferos de rocas riolíticas, que se encuentran en explotación moderada, para el abastecimiento de agua potable en la cabecera municipal. Acuíferos riolíticos y basálticos también se pueden localizar en el borde sur de la zona, donde ya se explotan en el acuífero de la Muralla que abastece de agua potable a la ciudad de León.

Los caudales específicos cambian mucho en la zona debido a la diversidad de acuíferos que se explotan, los caudales son granulares, con alto contenido de arcilla en la porción oriental del área 0.15 lps. En la zona de Romita, los acuíferos también son granulares en su composición, predominan gravas y arena, por lo cual son bastante más permeables, produciendo caudales específicos de 2 lps (INEGI, 1998).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

La metodología de investigación consiste en tres etapas: Recopilación bibliográfica, visita a campo y trabajo de gabinete.

3.1 ETAPA 1: Recopilación Bibliográfica

Se recopiló bibliografía que contuviera información geográfica y geológica del área de estudio, así como información afín a la recarga hídrica y a las obras civiles de captación de agua de lluvia. Se buscaron mapas de la zona que pudieran aportar información determinante para la infiltración hídrica, como geología, tipo y uso de suelo, cobertura vegetal y pendiente del terreno. Una vez obtenida esa información se propuso buscar y establecer una metodología para estimar el potencial de recarga hídrica, misma que fuera concurrente con las características de campo con que se cuenta, siendo seleccionada así la metodología de Matus (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

3.2 ETAPA 2: Visita a campo

Se efectuó una observación detallada de la Comunidad de El Laurel, con la finalidad de estudiar de manera integral los diversos parámetros que condicionan el potencial de recarga hídrica al subsuelo. Dichos parámetros fueron los establecidos durante la etapa de recopilación bibliográfica los cuales son: tipo de roca, tipo y uso del suelo, pendientes del terreno, cobertura vegetal, y, además, fallas y fracturas. Aunque la mayoría de estos parámetros fueron establecidos mediante la ayuda de mapas del lugar, se optó por complementar y enriquecer las descripciones mediante la observación detallada en el propio terreno. Para el cálculo del balance hídrico se intentaron medir las variables necesarias para su estimación, sin embargo, debido a la dificultad para disponer de ciertos equipos de medición se optó por retomar el balance hídrico teórico calculado en otro trabajo para la misma zona de estudio, cuya metodología de cálculo fue detallada más adelante durante la etapa de gabinete.

3.3 ETAPA 3: Gabinete

En esta etapa se describe la metodología llevada a cabo por (Ramos Reyes, 2018) para determinar el balance hídrico para la zona de El Laurel y El Terrero mediante el análisis de datos proporcionados por 12 estaciones meteorológicas ubicadas estratégicamente cerca del área de estudio. Se establecieron y definieron cada uno los factores que condicionan el potencial de recarga hídrica según el método Matus, así como sus ponderaciones. También en esta etapa se describen un conjunto de cinco obras civiles que ayuden a la captación de agua de lluvia y a la recarga hídrica para la Comunidad de El Laurel, descartando de un catálogo de obras mayor, aquellas que resultan inviables desde un principio por su alto costo de construcción y mantenimiento, o porque nuestra área de estudio no cumple con las características climáticas o geomorfológicas mínimas requeridas para su implementación, finalmente en esta etapa se revisa la Normativa Oficial Mexicana respecto a la implementación de obras de recarga hídrica y manejo de agua.

3.3.1 Cálculo del Balance Hídrico

El estudio del balance hídrico en análisis hidrológicos está fundamentado en la aplicación del principio de conservación de masas propuesto por Antoine Lavoisier, también conocido como Ecuación de la continuidad.

$$I - E = +/- \Delta V$$

Donde:

I: Ingresos

E: Egresos

ΔV : Variación del almacenamiento

Ecuación 2. Ecuación de la continuidad (Sokolov & Chapman, 1981)

Esta establece que, "Para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada" (Sokolov & Chapman, 1981).

La necesidad de calcular el balance hídrico para solucionar distintos problemas teóricos y prácticos de geohidrología, radica en que nos permite realizar una evaluación cuantitativa de los recursos disponibles de agua en determinada área (Sokolov & Chapman, 1981) y en determinado tiempo, así como las modificaciones que esta disponibilidad pueda sufrir por influencia de distintas actividades humanas o eventos naturales; Llevar este control, por consecuencia, permitirá tener un mejor manejo y distribución de agua. Por lo tanto, esto hace del balance hídrico uno de los datos cruciales y más importantes en este trabajo de investigación, siendo el responsable de confirmar la existencia de un régimen de infiltración en nuestra área de estudio.

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona, cuenca natural o masa de agua, indicará los valores relativos de entrada y salida de flujo al sistema, así como la variación del volumen de agua almacenada en la zona en un periodo de tiempo ya establecido, es importante señalar que cuando la unidad de tiempo es muy grande deberemos considerar que las variaciones en el volumen almacenado de agua son despreciables y, en ese caso, las entradas serán iguales a las salidas (Schulz & García, 2015).

Las variables para el cálculo del balance hídrico son: Precipitación (P); Escurrimiento fluvial (Es); Evapotranspiración (ET) e Infiltración eficaz (Ie). (Schulz & García, 2015).

Por tanto, la fórmula del balance global se puede expresar como:

$$P = Es + ET + Ie$$

o bien

$$P - Es - ET - Ie = 0$$

Ecuación 3. Formula del balance global (Schulz & García, 2015).

Siendo el cálculo del balance hídrico aplicable a diversas unidades, desde pequeños embalses o lagos, hasta sistemas mucho más complejos como una cuenca.

3.3.2 Variables para el cálculo del Balance Hídrico

Debido a la dificultad de poder medir de manera directa las distintas variables que componen el balance hídrico de nuestra área de estudio, como son precipitación, evapotranspiración, infiltración y escurrimiento, se optó por retomar el balance hídrico calculado por (Ramos, 2018) en la zona de El Terrero y El Laurel. A continuación, se definirán las variables que componen el balance hídrico, así como la metodología que fue llevada a cabo en dicho trabajo para su estimación, el valor del balance hídrico será establecido en la etapa de resultados.

Precipitación

Se trata del agua de lluvia, y será por lo general la única fuente de humedad que tendrá nuestro suelo (Sokolov & Chapman, 1981), este dato es importante pues el volumen de agua que nos interesa infiltrar será aportado completamente por la precipitación que presente nuestra área de incidencia.

Para su cálculo en el área de estudio, se recopiló y analizó el registro de precipitación de doce estaciones meteorológicas localizadas dentro o muy cerca del área de estudio, cuyas series comprendían entre 32 y 66 años de registro. Lo primero que se realizó fue promediar los datos mensuales para todos los años de registro, una vez obtenidos los promedios mensuales de precipitación, se procedió a calcular el promedio anual. Esta información permitió realizar un mapa de isoyetas y caracterizar el régimen pluviométrico.

Escurrimiento fluvial

La escorrentía o escurrimiento fluvial es la cantidad del agua de lluvia, riego o deshielo que excede la capacidad de infiltración del suelo. Cuando ese exceso de agua supere la capacidad de almacenamiento del suelo, se formará un cuerpo de agua que fluirá en sentido longitudinal a la pendiente, desembocando en arroyos, quebradas, ríos, lagos, embalses y océanos (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

Si en determinada zona se pretende construir una obra hidráulica y se conoce un régimen muy alto de escurrimiento, se deberá de considerar la implementación de

algún tipo de obra auxiliar al momento de la construcción de la obra principal, pues un escurrimiento violento podría dañar o destruir la estructura.

Para el cálculo del volumen medio anual de escurrimiento natural en el área de estudio, debido a que no se cuenta con suficiente información del volumen de escurrimiento, este fue calculado utilizando un método indirecto denominado “precipitación-escurrimiento” propuesto en la NOM-011-CONAGUA-2015, el cual se encuentra descrito en el (Anexo A).

Evapotranspiración

Proceso que resulta del efecto combinado de la evaporación del agua de un suelo húmedo y la transpiración correspondiente de las plantas. La transpiración es la pérdida de agua por la planta a través del sistema foliar. El agua es captada del suelo a través del sistema radicular y circula por la estructura de la planta hasta salir nuevamente de ella (Matus Silva, 2007).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial en el área de estudio, se realizó aplicando el método indirecto propuesto por Thornthwaite, la cual consiste en calcular para cada mes la evapotranspiración potencial, y así, calcular la evapotranspiración anual mediante la suma de todos los meses. La ventaja que supone este método radica en las variables necesarias para su cálculo, la primera es la latitud del lugar que se estudia y la segunda es la temperatura media mensual de la zona, la cual pudo ser determinada a partir del registro de las mismas estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo de la precipitación.

Su expresión general es:

$$U_j = 1.6k_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Ecuación 4. Expresión general de la evapotranspiración

Donde:

U_j : Uso consuntivo en el mes j, en cm

T_j : Temperatura media en el mes j, en °C

a, I : Constantes

Ka : Constante de la duración media diaria de la luz solar para una determinada latitud y mes del año (Anexo B).

Las constantes I (Índice de eficiencia de temperatura) y a se calcula de la siguiente manera. Ecuación 5, 6 y 7

$$I = \sum_{j=i}^{12} ij$$

Ecuación 5. Cálculo de la constante I

Donde:

$$ij = \left(\frac{Tj}{5}\right)^{1.514}$$

Ecuación 6. Cálculo de la constante i

y j : Número de mes

$$a = (675 \times 10^{-9} I^3) - (771 \times 10^{-7} I^2) + (179 \times 10^{-4} I) + 0.492$$

Ecuación 7. Cálculo de la constante a

Infiltración eficaz

Proceso por el cual, el riego o el agua de lluvia, ingresa al suelo a través de la superficie hacia capas inferiores, de manera vertical u horizontal (Comisión Nacional de Riego, s.a.) por acción de la gravedad. Un porcentaje del agua infiltrada será utilizada por las plantas, y otro más logrará desplazarse a capas más abajo del suelo, alimentando así los mantos acuíferos (Matus et al., 2009).

Para el cálculo de la infiltración se utilizó el modelo analítico de (Schosinsky & Losilla, 2000), también conocido con el nombre de Balance Hídrico de suelos. Este modelo busca establecer una ecuación que permita determinar la infiltración de una precipitación mensual, utilizando los datos obtenidos del análisis de las bandas pluviométricas, para obtener las intensidades de lluvias diarias, mensuales o anuales. Consiste en la correlación entre la infiltración potencial mensual, el valor de la infiltración básica del suelo y la precipitación mensual. Los

valores de infiltración dependen de la pendiente topográfica, cobertura vegetal y la interceptación de la lluvia en la hojarasca (Ramos, 2018).

La ecuación utilizada para determinar la infiltración fue la siguiente (Schosinsky & Losilla, 2000):

$$I = 0.88 * C (k_p + k_v + k_{fc}) * P$$

Ecuación 8. Cálculo de la Infiltración

Donde:

I: Infiltración

C: Coeficiente de Infiltración

K_p: Fracción que infiltra por efecto de la pendiente

K_v: Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

K_{fc}: Fracción que infiltra por textura del suelo

P: Precipitación

Tabla 1. Coeficientes de infiltración para diferentes usos de la tierra, propuestos por (Schosinsky & Losilla, 2000).

Coeficiente de infiltración propuestos	
POR TEXTURA DEL SUELO	K_{fc}
Arcilla compacta impermeable	0,10
Combinación de limo y arcilla	0,20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0,40
POR PENDIENTE	K_p
Muy plana (0,02% - 0,06%)	0,30
Plana (0,3% - 0,4%)	0,20
Algo plana (1% - 2%)	0,15
Promedio (2% - 7%)	0,10
Fuerte (mayor de 7%)	0,06
POR COBERTURA VEGETAL	K_v
Cobertura con zacate (menos del 50%)	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate (más del 75%)	0,21

3.3.3 Factores que determinan el potencial de recarga

Uno de los parámetros más importantes que se consideran al momento de contemplar la construcción de cualquier obra de recarga hídrica será el potencial de recarga hídrica que presente el terreno, para dicho propósito existe una gran cantidad de metodologías, las cuales proponen distintos factores a evaluar para determinar dichas áreas, la elección de una u otra metodología estará condicionada principalmente por la bibliografía existente sobre las características del terreno parte del estudio.

Dentro de las distintas metodologías propuestas en la literatura se decidió utilizar la metodología propuesta por (Matus, Faustino, & Jiménez, Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica : aplicación práctica en la subcuenca del Río Jacuapa, Nicaragua., 2009) para determinar el potencial de recarga hídrica, debido a que considera factores del terreno que ya conocemos para nuestra área, como tipo y uso del suelo, tipo de roca, pendiente del terreno y cobertura vegetal. Su metodología consiste en asignar un valor de entre 1 (menor potencial de recarga), hasta 5 (mayor potencial de recarga) para cada uno de los factores. Al final se deberá de realizar un cálculo simple con cada una las ponderaciones y determinar del 1 al 5, el grado de potencial hídrica presente en nuestra zona. Cabe aclarar que, dentro de la investigación, todos estos factores pudieron ser determinados a través de una descripción visual en campo, o con ayuda de mapas, sin embargo, la pendiente del terreno y su forma, resultan en ocasiones complejos de establecer, ya sea por la falta de mapas o su poco detalle, por lo que en el Anexo C se describe una metodología para tomar mediciones de pendientes en campo. A continuación, se describirán las variables propuestas por Matus y su respectiva ponderación.

3.3.3.1 Tipo de suelo

Es importante evaluar el tipo de suelo con el que se cuente en la zona geográfica al momento de determinar la construcción de una obra de recarga, pues la infiltración depende en gran medida de la textura, porosidad, permeabilidad y compactación que presente nuestro suelo. Las zonas de recarga hídrica deben ser muy permeables para asegurar una alta capacidad de infiltración; en suelos

con textura gruesa, porosos - y, por lo tanto, permeables - se dan buenos niveles de recarga hídrica. Por el contrario, en suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados, la recarga hídrica se verá disminuida (Matus et al., 2009). La ponderación es la siguiente:

Tabla 2. Ponderación de la capacidad de recarga hídrica del suelo según su textura (Matus et al., 2009).

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelos franco-arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración (más de 25 cm/h).	Muy alta	5
Suelos francos, con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración (12,7 – 25 cm/h).	Alta	4
Suelos franco-limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2 – 12,7 cm/h).	Moderada	3
Suelos franco-arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración (0,13 – 2 cm/h).	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menos de 0,13 cm/h).	Muy baja	1

3.3.3.2 Uso del suelo

Se trata de unos de los factores más cambiantes debido a la influencia de la actividad humana, se ha demostrado que un uso inapropiado del suelo por parte de las actividades humanas puede disminuir la capacidad de recarga de agua a un acuífero hasta en un 50%, a la vez de que aumentan los riegos naturales y la pérdida de suelo por erosión hídrica o eólica (Matus et al., 2009). Por lo que este parámetro busca establecer las actividades que favorecen la infiltración hídrica, como los sistemas silvopastoriles y agroforestales o los asociados de cultivo, y por otro lado las actividades que favorecen la compactación y erosión del suelo,

aumentando así la evaporación hídrica, y disminuyendo por lo tanto su capacidad de infiltración al subsuelo.

En caso de no disponer de un mapa que contenga dicha evaluación del suelo, para conocer el uso que se le da al terreno en el que se plantea construir una obra de recarga hídrica, será suficiente con dar un recorrido de campo en compañía de habitantes que conozcan el lugar y puedan brindar información sobre el uso que se le ha dado al suelo durante los últimos meses. La ponderación propuesta de evaluación es la siguiente:

Tabla 3. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso del suelo (Matus et al., 2009).

Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque donde se dan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy Alta	5
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo y agua	Regular	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Baja	2
Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy Baja	1

3.3.3.3 Pendiente

Se define como el grado de inclinación que tenga el terreno y puede ser expresado en grados o porcentaje de pendiente (Rendón & Bermúdez, 2017). La capacidad de recarga hídrica estará fuertemente condicionada por el tiempo de contacto entre el agua y la superficie del terreno, siendo que, en las pendientes más fuertes, se favorece el escurrimiento superficial, disminuyendo por consiguiente la recarga hídrica; por otro lado, en las pendientes más suaves tendremos un mayor tiempo de contacto agua-superficie, aumentando así su capacidad de infiltración (Matus et al., 2009).

Dentro de los distintos sistemas de clasificación de pendientes que existen, el propuesto por (Matus et al., 2009), establece 5 clases de gradiente de la pendiente según la descripción del terreno. Considerando que, en el mapa utilizado para el presente trabajo, de Inclinación de la pendiente para la zona de El Laurel y El Terrero elaborado por Ramos Reyes, 2018, los valores de pendiente fueron

expresados en grados, se optó por realizar una conversión de porcentajes a grados de las clases de gradiente propuestos por Matus, de tal manera que resultara más sencillo visualizar e interpretar los valores obtenidos en el mapa. En el caso de los valores de pendiente requeridos por cada obra detallados posteriormente, fueron establecidos directamente en porcentaje al momento de su descripción.

Tabla 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno (Matus et al., 2009).

Clase	Descripción	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
1	Plano a casi plano, con o sin rugosidad	0-6	Muy Alta	5
2	Moderadamente ondulado o cóncavo	6-15	Alta	4
3	Ondulado/cóncavo	15-45	Moderada	3
4	Escarpado	45-65	Baja	2
5	Fuertemente escarpado	>65	Muy Baja	1

El procedimiento para la conversión de porcentajes a grados se llevó a cabo con ayuda de la siguiente tabla de conversión de unidades de porcentaje a grados (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016).

Tabla 5. Conversión de unidades de porcentaje a grados (FAO, 2009).

Porcentaje	Grados/min/seg
0,50%	0°17'10"
1%	0°35'
2%	1°08'40"
5%	2°51'40"
10%	5°42'40"
20%	11°18'36"
30%	16°42'
40%	21°48'05"
50%	26°33'55"
100%	45°

Así, por ejemplo, para realizar la conversión de una pendiente de 15 por ciento a grados es igual a (10+5) por ciento, lo cual equivale a $5^{\circ}42'40'' + 2^{\circ}51'40'' = 7^{\circ}93'80'' = 8^{\circ}34'20'' = 8.531^{\circ}$ aprox.

Una vez realizada esta conversión de unidades, el cuadro de clases de gradiente de la pendiente (Matus et al., 2009). quedo de la siguiente manera:

Tabla 6. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según la pendiente del terreno (Matus et al., 2009). Pendiente expresada en grados.

Clase	Descripción	Pendiente (grados)	Posibilidad de recarga	Ponderación
1	Plano a casi plano, con o sin rugosidad	$0^{\circ} - 3.4^{\circ}$	Muy Alta	5
2	Moderadamente ondulado o cóncavo	$3.4^{\circ} - 8.5^{\circ}$	Alta	4
3	Ondulado/cóncavo	$8.5^{\circ} - 24^{\circ}$	Moderada	3
4	Escarpado	$24^{\circ} - 33^{\circ}$	Baja	2
5	Fuertemente escarpado	$>33^{\circ}$	Muy Baja	1

De manera más específica, otra característica importante a considerar será la forma de la pendiente que presente nuestro terreno, esto se define como la forma general de la pendiente tanto en dirección vertical como horizontal. Se ha establecido la siguiente clasificación para las formas de pendiente; Plano (S), Cóncavo (C), Convexo (V), Terraceado (T) y Complejo irregular (X). (FAO, 2009).

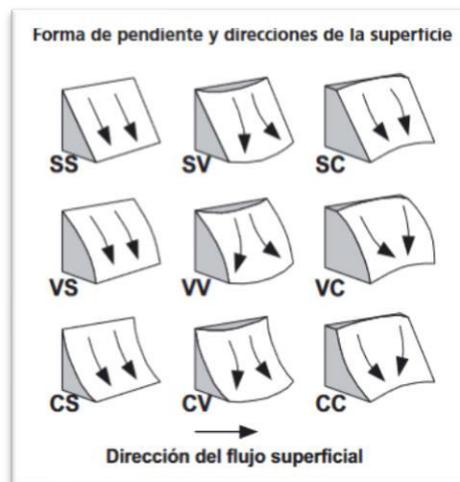


Figura 9. Clasificación para las formas de pendiente (FAO, 2009).

La forma que presente la pendiente deberá tomarse en cuenta al momento de implementar cualquier tipo de obra, pues este dato nos permitirá seleccionar la ubicación más adecuada dentro del terreno para alguna obra en particular. Por ejemplo, en las pendientes cóncavas-cóncavas gran parte del volumen de agua será dirigido a un área más pequeña y de manera más abundante, una pendiente plana-plana permitirá un escurrimiento y distribución más homogéneo del cuerpo de agua a lo largo de nuestra parcela, por el contrario, las pendientes con forma convexa-convexa tenderán a dirigir los escurrimientos hacia los flancos del talud. Bajo este parámetro, no sería aconsejable por ejemplo construir una obra con árboles frutales o especies perennes, en la parte baja de una pendiente cóncava-cóncava, pues una precipitación abundante sería suficiente dañar o destruir la obra.

Debido a que la pendiente y su forma pueden ser diferentes de un metro de terreno a otro, en ocasiones es difícil de visualizar detalladamente a través de un mapa, es por esto que en el (Anexo C) del presente trabajo se describe una metodología para tomar mediciones de pendiente de terreno en el campo, así pues el sitio exacto de construcción de la obra según la pendiente del terreno será establecido en campo bajo el criterio del personal responsable, tomando en cuenta las limitaciones estructurales y especificaciones que cada obra exige, las cuales también serán mencionadas en este trabajo.

3.3.3.4 Cobertura vegetal

Es el porcentaje de estratos vegetales perennes que tendremos en nuestra área de estudio. Es un factor importante en nuestra metodología, pues la cobertura vegetal reduce la velocidad de escorrentía, permitiendo así tener un tiempo de contacto mayor entre el suelo y el agua, favoreciendo de esta manera la recarga hídrica, inclusive en suelos arcillosos o muy duros (Matus et al., 2009)., además de disminuir la erosión, conservando así las características del suelo que favorecen la recarga, y brindando una protección natural a nuestras obras.

Matus et al., 2009 considera tres estratos para la cobertura vegetal: los árboles, los arbustos y las hierbas. Todos ellos contribuirán para formar la cobertura

vegetal de nuestra área, por lo que una buena cobertura vegetal nos brinda una buena infiltración.

Tabla 7. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según su cobertura vegetal (Matus et al., 2009).

Cobertura vegetal permanente (porcentaje)	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80	Muy alta	5
70 – 80	Alta	4
50 – 70	Moderada	3
30 – 50	Baja	2
<30	Muy baja	1

3.3.3.5 Tipo de roca

Se trata del tipo de roca que compone nuestra área y su disposición hasta llegar a la zona saturada (Matus et al., 2009). Su porosidad y permeabilidad, al igual que en el tipo de suelo, determinará la capacidad de infiltración hídrica, además nos permite conocer su capacidad como roca almacenadora de agua. Una roca muy compactada, con poros muy pequeños y disposición desfavorable o sin fracturación, no será una roca permeable que permita el flujo del agua hacia capas inferiores, por otro lado, una roca más suave, con poros más grandes e interconectados o presencia de fracturación, tendrá una permeabilidad mayor, favoreciendo así el flujo de agua y la infiltración hídrica.

Tabla 8. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca (Matus et al., 2009).

Roca	Posibilidad de recarga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo.	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación.	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	Moderada	3
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas.	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas.	Muy baja	1

3.3.3.6 Determinación de potencial de recarga de las zonas evaluadas

Una vez que se evalúan las características de zona considerando los elementos de la metodología y las tablas de evaluación, se procede a sustituir dichos valores obtenidos en campo en la siguiente ecuación:

$$ZR = [0.27 (Pend) + 0.23 (Ts) + 0.12 (Tr) + 0.25 (Cve) + 0.13 (Us)]$$

Ecuación 9. Determinación de potencial de recarga de las zonas evaluadas

Donde:

Pend: Pendiente y micro relieve

TS: Tipo de suelo

TR: Tipo de roca

Cve: Cobertura vegetal permanente

Us: Usos del suelo

De la ecuación obtendremos un valor entre 1 y 5, el cual corresponde a un número dentro de un rango de posibilidades de recarga hídrica, dicho rango se detalla en siguiente tabla.

Tabla 9. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto (Matus et al., 2009).

Possibilidad de recarga	Rango
Muy Alta	4,1 - 5
Alta	3,5 - 4,09
Moderada	2,6 - 3,49
Baja	2 - 2,59
Muy Baja	1 - 1,99

3.3.4 Propuesta de obras civiles de recarga hídrica por lluvia

La necesidad de tener acceso al agua dulce para consumo y riego, así como la posibilidad de almacenarla para disponer de ella en épocas de sequía o en ambientes desérticos, han motivado desde el principio de la civilización a desarrollar mecanismos de captación hídrica.

El Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2018) define como *obra hidráulica* a una construcción en el campo de la ingeniería civil en donde el elemento principal es el agua, por lo que una obra civil de recarga se considera en este rubro, ya que lo que se pretende es recargar agua de lluvia.

Los grandes asentamientos urbanos han implementado obras hidráulicas de recarga complejas que permiten manejar y recargar grandes volúmenes de agua para abastecer a toda su población, sin embargo, en la gran mayoría de las comunidades rurales no se han construido obras hidráulicas sofisticadas al resultar poco costeables, por el contrario, en estas comunidades aún se construyen obras de recarga simples con el objetivo de ser aprovechadas por un número menor de habitantes, las cuales en la mayoría de ocasiones son construidas de manera manual con herramientas sencillas y sin necesidad de maquinaria.

Estas obras cumplen varios propósitos dentro de la comunidad de El Laurel; el principal y más importante, es el de ser una fuente de recarga hídrica para los aprovechamientos utilizados por la comunidad para el consumo humano y del ganado, como la recarga de manantiales o pozos artesianos; el segundo sería la disminución de la velocidad de escorrentía para favorecer la humedad del suelo, permitiendo el desarrollo agrícola; y finalmente la posible recarga subterránea, contribuyendo así a la remediación de los acuíferos sobreexplotados por las grandes ciudades.

Las obras expuestas aquí forman parte de este tipo de infraestructura, por lo que se buscó proponer obras que atendieran a las necesidades de la comunidad de El Laurel, abasteciendo su manantial y favoreciendo su actividad agrícola, y las cuales pudieran ser construidas manualmente con la ayuda de la mano de obra de los propios miembros de la comunidad, haciendo uso de materiales orgánicos y pétreos naturales (Ministerio de Fomento, Gobierno de España, 2018), y herramientas simples. Dentro de los resultados se describen un conjunto de obras que resultan viables en una primera instancia por su facilidad de construcción. Posteriormente se presentará dentro de los resultados una comparativa de los parámetros de infiltración obtenidos en nuestra área, con los rangos óptimos recomendados para cada obra, y finalmente se propondrán las obras que más se adapten a las características topográficas, geológicas y edafológicas de nuestra área de estudio.

El conjunto de obras que resultan viables para la comunidad de El Laurel en una primera instancia gracias a la posibilidad de ser construidas manualmente, con materiales naturales, y con bajo costo son las siguientes:

3.3.4.1 Tinas Ciegas

Las tinajas ciegas tienen como nombre regional zanjas trinchera (Fernández, Martínez, & Ramírez, 2009) son excavaciones rectangulares que se hacen siguiendo la curva de nivel de forma discontinua, para capturar la escorrentía procedente de las partes altas y conservar la humedad para los árboles o plantaciones forestales.

Beneficios

Recarga de mantos acuíferos, mantener la humedad del suelo para favorecer el desarrollo de la vegetación natural, reducir la velocidad de escurrimiento superficial, así como cumplir la función de brecha corta fuegos. (Rubio, Martínez, & Sánchez, 2009).

Requerimientos técnicos

Estas obras se realizan manualmente con herramientas o con maquinaria y siguiendo una curva de nivel. En cuanto a la separación que deberemos tener entre tina y tina se proponen 0.80 m (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias., 2005) o 2.0 m (Fernández et al., 2009) distribuidas en forma alterna o al tresbolillo, por lo que un rango de separación comprendido entre 0.80 m y 2.0 m será aceptable.

En general las dimensiones recomendadas que debe tener una tina ciega son 2.0 m de longitud, 0.5 m de ancho y 0.5 m de profundidad, resultando en un volumen de captación de 0.5 m³ (Fernández et al., 2009).

Parámetros importantes que deberemos tomar en cuenta para su implementación serán la precipitación y las características texturales y de infiltración del suelo. Es recomendada su implementación en las áreas de captación de los manantiales, así como en regiones con lluvias superiores a 700 mm. Es aconsejable su construcción sobre suelos con alta permeabilidad relativa (tasas de infiltración superiores a la lluvia máxima en 24 hrs, para un período de retorno de 5 años, asumiendo que el evento ocurre en una hora). (Fernández et al., 2009)

Aunque estas obras se adaptan a una gran cantidad de texturas de suelo, en suelos arcillosos de baja infiltración será recomendable hacer zanjas más profundas, por otro lado, en suelos arenosos puede resultar difícil dar estabilidad a los taludes de las zanjas. En suelos de baja infiltración tendremos una mayor acumulación de agua en las zanjas, en estos casos será importante hacer zanjas más profundas, además de combinarlas con otras técnicas de Conservación de Suelos y Agua (CSA), que mejoren la infiltración en la superficie de la tina (Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central, PASOLAC, 2005), para obtener una buena infiltración será necesario implementar

la obra en suelos con abundante cobertura vegetal como hierba o arbustos y en litologías de moderada a altamente permeables.

La construcción de tinas ciegas se justifica sobre todo en pendientes de 5% a 10%. En este caso se pueden combinar con alguna obra de conservación de suelos para retener el suelo en la parcela y para reducir la entrada de suelo en las zanjas (PASOLAC, 2005).

Dentro de las estructuras complementarias (Fernández et al., 2009) recomienda la instalación de cajas de captación, cabeceo de cárcavas y cercado para el establecimiento de áreas de exclusión.

Como unidad de medida para inventario usaremos m^3 , y como unidad de medida para el impacto de la obra usaremos km^3 .



Figura 10. Tinas ciegas (Fernández et al., 2009).

3.3.4.2 Zanja-Bordo para Retención de Humedad

A este tipo de obras se les puede identificar también de manera regional con el nombre de zanjas a nivel (Fernández et al., 2009). Consiste en una serie de canales sin desnivel (Pizarro, Flores, Sangüesa, & Martínez, 2004) construidos en laderas de manera perpendicular a la pendiente y de una longitud igual al ancho de la parcela, diseñada y construida para interceptar la escorrentía procedente de las partes altas.

Beneficios

Favorecer la infiltración de agua al subsuelo, disminuyendo además los procesos erosivos ocasionados por las altas velocidades de escorrentía (Fernández et al., 2009), han demostrado también su eficiencia como retenedores de humedad, lo que genera un desarrollo más rápido de las plantaciones cercanas (Pizarro, Flores, Sangüesa, Martínez, & León, 2008).

Requerimientos técnicos

Estas obras se pueden construir manualmente con herramientas, minimizando los costos de la obra, o con maquinaria, incrementando su costo, pero minimizando su tiempo de construcción, permitiendo así cubrir una mayor extensión, siguiendo siempre las curvas de nivel. Es recomendada su construcción en regiones subhúmedas que presenten precipitaciones superiores a 700 mm anuales, por esta razón será importante que la zanja tenga el fondo a nivel, para evitar el estancamiento del agua en determinados tramos (Fernández et al., 2009). Un factor importante que tomar en cuenta al momento de diseñar e implementar zanjas de infiltración, es la cantidad de agua de lluvia que caerá en nuestra zona de impluvio, la cual deberá ser menor a la captada e infiltrada por nuestras zanjas, por tanto, la capacidad de estas no deberá de ser sobrepasada por el total de aportaciones (Flores, 2002).

Las dimensiones deseadas de las zanjas de nivel serán, a lo largo 20m permitiéndose en casos justificados hasta una longitud de 30 m, la profundidad estará definida por la topografía del lugar y no deberá ser menor a 0.5 m, el ancho de las zanjas podrá variar entre un mínimo de 0.40 m y un máximo de 0.90 m, en función de la capacidad de infiltración que tenga el terreno (UNATSABAR, 2003), por otro lado (Flores, 2002) recomienda una profundidad de 0.3 m y un ancho de 0.2 m, dando un espaciamiento entre zanja y zanja de 4.5 m.

Se deberá construir un bordo 10 cm aguas abajo de la zanja con el material excavado, el cual se deberá compactar y mantener con vegetación para evitar que los escurrimientos arrastren el suelo, de ser posible se deben sembrar pastos o árboles para estabilizar el bordo (Fernández et al., 2009). Las características de terreno que más se adaptan a este tipo de obras serán los terrenos que presenten

pendientes de 5% a 40 %, escasa vegetación natural, como podrían ser pastos o algunos matorrales, y suelos con textura franco-arenosa (Cotler, Cram, Martínez & Bunge, 2015), Para obtener infiltración subterránea, será conveniente instalar las obras en terrenos con roca moderada a altamente permeable.

Como estructuras complementarias Fernández et al., (2009) nos propone el suavizado de taludes de cárcavas y la construcción de canales de desagüe. Como unidad de medida para nuestro inventario usaremos m^3 , y como unidad de medida para el impacto de la obra usaremos km^3 .



Figura 11. Zanja-Bordo para Retención de Humedad (Fernández et al., 2009).

3.3.4.3 Terrazas de Bancos Alternos

Las terrazas de banco o bancales (Zamora, 1981), es un tipo de obra que consiste en la construcción de una serie de escalones, elaborados mediante la técnica de corte y relleno, en sentido perpendicular a la pendiente del terreno (Sánchez & Martínez, s.f). Debido a que este sistema puede resultar costoso a causa de las grandes cantidades de terreno que se deben mover, su uso resulta limitado y únicamente será justificado en zonas con escasas de suelo, o en zonas para la producción de cultivos de alto valor, una alternativa más económica y la cual se puede llevar a cabo de manera manual sin necesidad de maquinaria, son las terrazas de bancos alternas, construidas con fajas de terreno natural donde no se realiza ningún movimiento de tierra (Zamora, 1981).

Beneficios

Aunque el beneficio principal de este sistema de terrazas es controlar la erosión de laderas (PASOLAC, 2005), y lograr una mejor disponibilidad del terreno para las labores agrícolas, serán también útiles para disminuir la velocidad de escorrentía, favorecer la infiltración de agua al subsuelo y como retenedores de humedad permitiendo el desarrollo de vegetación (Fernández et al., 2009).

Requerimientos técnicos

Fernández et al., (2009) recomienda este tipo de obras para terrenos de ladera con pendientes moderadamente onduladas y mayores (>15 %), en los que exista buena disponibilidad de agua de lluvia y los escurrimientos tengan una alta capacidad erosiva. Las estructuras deberán de ser colocadas en forma alterna, y estas constarán de terraplén y talud. Es altamente aconsejable la protección de los taludes de cada terraza con muros de retención, tendremos que hacer el muro vertical en caso de construirlo con piedra, o con una inclinación de 30° en caso de construirlo con tierra.

Para las proporciones que deberán tener las terrazas, el ancho del terraplén estará condicionado directamente por la pendiente y profundidad del terreno, disminuyendo el ancho de la terraza conforme aumente la pendiente y viceversa, considerando por ejemplo, un ancho de terraplén de 4.0 m para una pendiente de 30%, disminuyendo hasta un ancho de 2.0 m para una pendiente de 50%, sin embargo; será importante considerar además la profundidad del suelo, pues entre más grande sea su espesor, nos podremos permitir un ancho de terraplén mayor, por lo tanto, en caso de tener un espesor de suelo bajo, el ancho de la terraza también deberá de ser menor (Ministerio de Agricultura y Riego, 2014).

La longitud del bancal estará limitada por los condicionantes de topografía y escurrimiento (Fernández et al., 2009), se recomienda un largo máximo de 100 metros en condiciones típicas para climas tropicales, por otro lado, para climas semi-áridos y áridos una terraza de mayor longitud será justificada (Sánchez & Menes, s.f). La altura del talud no deberá de ser mayor a los 2.0 m a fin de facilitar su proceso de mantenimiento (Sánchez & Martínez, s.f). La altura de talud estará

definida por la propia pendiente del terreno, siendo más alto entre mayor pendiente presente la zona.

Este tipo de obra se adaptará bien a suelos con buena cobertura vegetal y con textura franca, gracias a su alta capacidad de infiltración. En caso de que nuestra área presente suelo arcilloso, sumado a una tasa de precipitación muy alta, será necesaria la construcción como estructura complementaria un canal con pendiente longitudinal en la parte interna del bordo de la terraza para facilitar el drenaje de agua (MINAGRI, 2014), y así evitar su estancamiento. Para obtener infiltración subterránea, será conveniente instalar las obras en terrenos con roca moderada a altamente permeable.

Algunas estructuras más, que se recomiendan como complemento de la obra principal (Fernández et al., 2009) son; la plantación de especies perenes en los terraplenes de las terrazas, la siembra de pasto en los taludes de las terrazas, y canales de llamada para conducir el agua hacia las terrazas. Como unidad de medida para nuestro inventario usaremos m^3 , y como unidad de medida para el impacto de la obra usaremos km^3 .

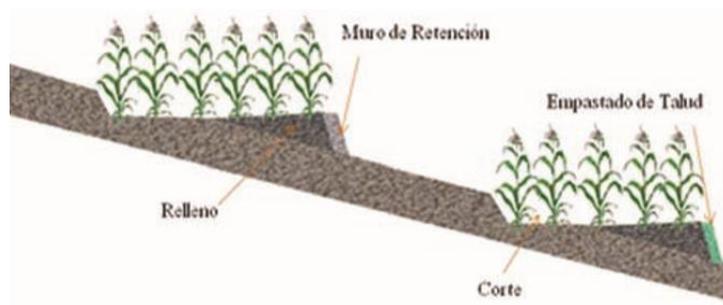


Figura 12. Terrazas de Bancos Alternos (Fernández et al., 2009).

3.3.4.4 Terrazas de Base Angosta

Conocidas de manera regional como terrazas de formación sucesiva, se trata de un conjunto de zanjas y bordos construidos a nivel o con desnivel, cuyo volumen de material excavado se coloca aguas abajo para conformar un bordo de tierra (Fernández et al., 2009).

Beneficios

Siendo parte de la familia de "Terrazas", su objetivo principal es el de reducir la erosión del suelo para favorecer labores forestales, sin embargo, por las características de este tipo de obra, serán efectivas también para reducir la velocidad de los escurrimientos de lluvia, y en el caso de que la terraza este trazada a nivel, incrementar la infiltración hídrica. Este tipo de terraza, al igual que las terrazas de bancos alternos, son una opción técnicamente más sencilla y económicamente menos costosa de construir que las terrazas de banco o bancales, pues debido a que el movimiento de tierra es mínimo, y las dimensiones de la obra son considerablemente menores, nos brindará la oportunidad de construir las terrazas de manera manual, con materiales y herramientas de fácil acceso.

Requerimientos técnicos

La construcción de este tipo de terraza se realizará siguiendo la curva de nivel, en donde se cava la zanja y con el material producto de la excavación se construye un bordo de tierra 10 cm aguas arriba o aguas abajo (Fernández et al., 2009), este bordo semi - compactado que realizaremos no será cultivable, por el contrario, se cubrirá con vegetación perene para protegerlo de los escurrimientos (Zamora, 1981). Este tipo de terraza se establece en terrenos con pendiente natural mayor al 6% (Murillo, 2010) o entre el 5% y 15% (Fernández et al., 2009). Será posible construir este tipo de obras bajo cualquier régimen pluviométrico, gracias a que el bordo se puede construir a nivel o considerando una pendiente de desagüe (Ochoa & Montoya, 1987).

Las dimensiones generales de este tipo de terrazas son de 1.0 a 2.0 m de ancho o de espaciamiento entre zanja y zanja, por otro lado, la longitud de las terrazas estará en función de la topografía y los escurrimientos, siendo tan largas como la topografía o la parcela lo permita. Los bordos deberán tener una altura de entre 0.4 m a 0.6 m, y un ancho de 1.2 m en la base y 0.6 m en la corona. La zanja deberá contar con 0.4 m de ancho por 0.4 m de profundo y debe de tener el fondo a nivel, para evitar la concentración de escurrimiento en un determinado tramo (Fernández et al., 2009).

Como el resto de las terrazas, su construcción se verá facilitada en suelos franco-arcillosos, sin embargo para que la eficacia de este tipo de terraza sea mayor, debe establecerse en suelos con más de 60 cm de profundidad y limpios de vegetación y tocones (Fernández et al., 2009), Como estructuras complementarias a la obra principal deberán también contemplarse el surcado al contorno, cultivos en fajas, rotación de cultivos, etc., se requiere además combinar las terrazas con un sistema completo de manejo del agua que deberá incluir drenes, desagües subterráneos, cauces empastados o estructuras de desviación, para controlar los excedentes de las escorrentías (Zamora, 1981). Para obtener infiltración subterránea, será conveniente instalar las obras en terrenos con roca moderada a altamente permeable.

Como unidad de medida para nuestro inventario usaremos m^3 , y como unidad de medida para el impacto de la obra usaremos km^3 .

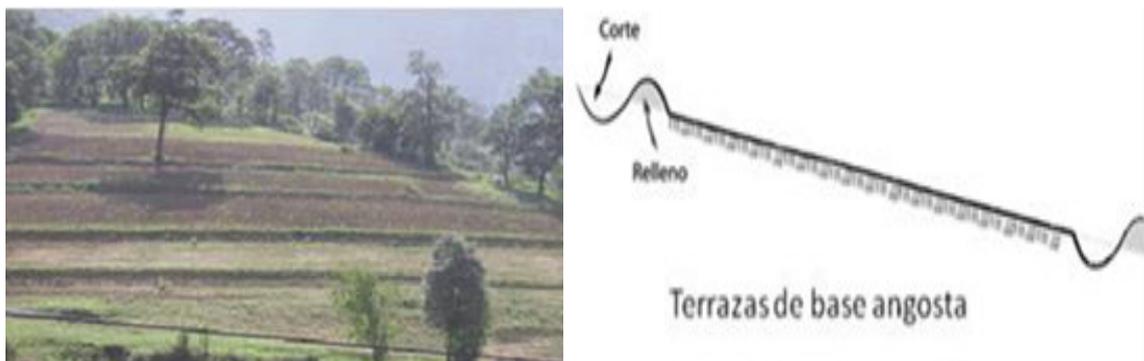


Figura 13. Terrazas de Base Angosta (Fernández et al., 2009).

3.3.4.5 Terraza Individual

La terraza individual o cajeteo, como se le conoce regionalmente (Fernández et al., 2009) es una pequeña plataforma individual de forma redonda, semicircular o cuadrada, que forma parte de las obras tipo “terrazza” en cuyo centro se siembra alguna especie vegetal, como podrían ser árboles frutales o especies perenes. Este tipo de terrazas se deberán construir con una leve inclinación contra la pendiente, será importante además que a la terraza le construyamos una barrera viva o muro de piedras al borde inferior del relleno (PASOLAC, 2005), cuyos

extremos de la barrera deberán de terminar sobre la curva de nivel (Fernández et al., 2009).

Beneficios

Reducir la pérdida de los escurrimientos superficiales, retener la humedad y favorecer la infiltración de agua subterránea (PASOLAC, 2005). Al tratarse de obras de tipo corte y relleno, de relativamente pequeñas dimensiones, será posible construirlas manualmente con herramientas simples, sin necesidad de utilizar maquinaria; lo que reduce considerablemente el costo de las obras.

Requerimientos técnicos

Las dimensiones generales de las terrazas serán de 1.2 m a 2 m de diámetro (PASOLAC, 2005), una vez realizada la delimitación del área que tendrá la terraza se procederá a rebajar la parte alta, cuyo suelo excedente se pasará a la parte inferior, que es a donde se va a construir propiamente el terraplén. El talud que construiremos en buena parte con ese material excedente, será necesario estabilizarlo con rocas para evitar que los escurrimientos lo destruyan, dicho talud deberá de tener una inclinación que variará de 2:1 a 3:1. Igualmente se procurará dar a la parte excavada un contrapendiente del 5-10%, la separación entre las terrazas dependerá del área de captación, del uso de la plantación y la capacidad de infiltración del suelo (Fernández et al., 2009).

El conjunto de terrazas deberá de ser construidas de manera diagonal descendiente (tresbolillo), con la finalidad de que estas puedan interceptar los escurrimientos procedentes de las partes más altas. Será necesario que la plantación de árboles frutales o especies perenes se realice en la parte alta de la terraza, así en tiempos de abundante lluvia evitaremos problemas a la planta por exceso de agua (Fernández et al., 2009). Este tipo de obras pueden ser implementadas en cualquier zona climática y régimen pluviométrico, siendo particularmente útiles en zonas secas con baja precipitación, en caso de implementarlas en zonas húmedas o con mayor tasa de precipitación será necesario incluir un pequeño desagüe para cada terraza con el fin de evitar estancamientos (PASOLAC, 2005).

Usado en pendientes escarpadas, se pueden construir en terrenos con pendientes que van del 10% al 50% (Fernández et al., 2009) o incluso con pendientes de hasta el 60% (PASOLAC, 2005). Se utiliza esta obra sobre todo en suelos profundos (mayores a 0.3 m), y de textura poco arenosa, pues esto complicaría la estabilidad de las terrazas, en tal caso sería necesaria la utilización de barreras muertas o vivas para dar estabilidad. Para incrementar la efectividad de las obras, será importante una escasa vegetación natural, como podrían ser pastos o algunos matorrales, y en caso de buscar la infiltración subterránea, será conveniente instalar las obras en terrenos con roca moderada a altamente permeable.

Como unidad de medida para nuestro inventario usaremos m^3 , y como unidad de medida para el impacto de la obra usaremos km^3 .

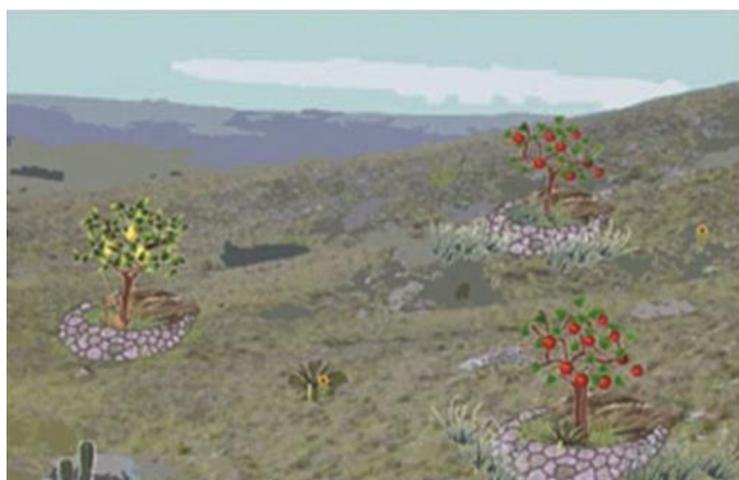


Figura 14. Terraza Individual (Fernández et al., 2009).

3.3.5 Marco Legal

Ante la sobreexplotación que presentan 105 de los 653 acuíferos que tiene México (Comisión Nacional del Agua, 2016) y la importancia de llevar un buen manejo del agua subterránea y su recarga, CONAGUA ha publicado dos Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que establecen pautas obligatorias a seguir desde el punto de vista técnico para la recarga de acuíferos mediante infiltración de agua residual tratada y de lluvia. La NOM-015-CONAGUA-2007 (Comisión Nacional del Agua, 2009) enfocada a la Infiltración artificial de agua a los acuíferos - características y

especificaciones de las obras y del agua. Y la NOM-014-CONAGUA-2003 (Comisión Nacional del Agua, 2009). Enfocada a los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

Para el objetivo del proyecto se apegará el mismo a la NOM-015-CONAGUA-200, pues establece las características y especificaciones de las obras de recarga artificial y las características que debe tener el agua de recarga.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

A continuación, se presenta bajo autorización de la autora (Ramos, 2018), el balance hídrico de la zona estudiada y una serie de mapas de clima, precipitación, uso y tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y tipo de roca para las comunidades de El Terrero y El Laurel, elaborados para su trabajo “Análisis hidrogeológico para identificar zonas potenciales de recarga hídrica en los manantiales de las comunidades, El Terrero y El Laurel del municipio de Guanajuato, Guanajuato”. con la finalidad de complementar la observación realizada en campo para el presente trabajo, mediante la interpretación personal de los mapas. Posteriormente, ya definido el potencial de recarga hídrica en la comunidad retomando la ponderación propuesta por (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009), se realiza la comparación de las características climáticas y de potencial de recarga hídrica requeridas por cada obra para garantizar su mayor eficiencia, y las presentes en la comunidad; estableciendo finalmente la viabilidad de implementación de cada obra propuesta.

4.1 Descripción del área de estudio

4.1.1 Clima

Con un clima de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano, prevalece en nuestra área de estudio una temperatura de 18°C en las partes altas y 20°C en la planicie (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1998). Interpretando el mapa de clima para la zona podemos observar que, según la Clasificación de Clima propuesta por Köppen, en el área que comprende a la comunidad del Terrero y El Laurel predominan los climas C(w1) y C(w2), los cuales corresponden a un clima de tipo templado-subhúmedo, en el que se presenta una temperatura media anual entre 12°C y 18°C. Durante el mes más frío las temperaturas oscilan entre los -3°C y 18°C, y la temperatura durante el mes más caliente rara vez sobrepasa los 22°C. La precipitación anual se sitúa entre los 200 mm a 1,800 mm, sin embargo, durante el mes más seco la tasa de precipitación oscila entre los 0 mm y los 40 mm; las lluvias de verano presentan

un índice P/T (Estimador de eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura) alto, entre 43.2% hasta más del 55%, con un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual (Arriaga et al., 2000).

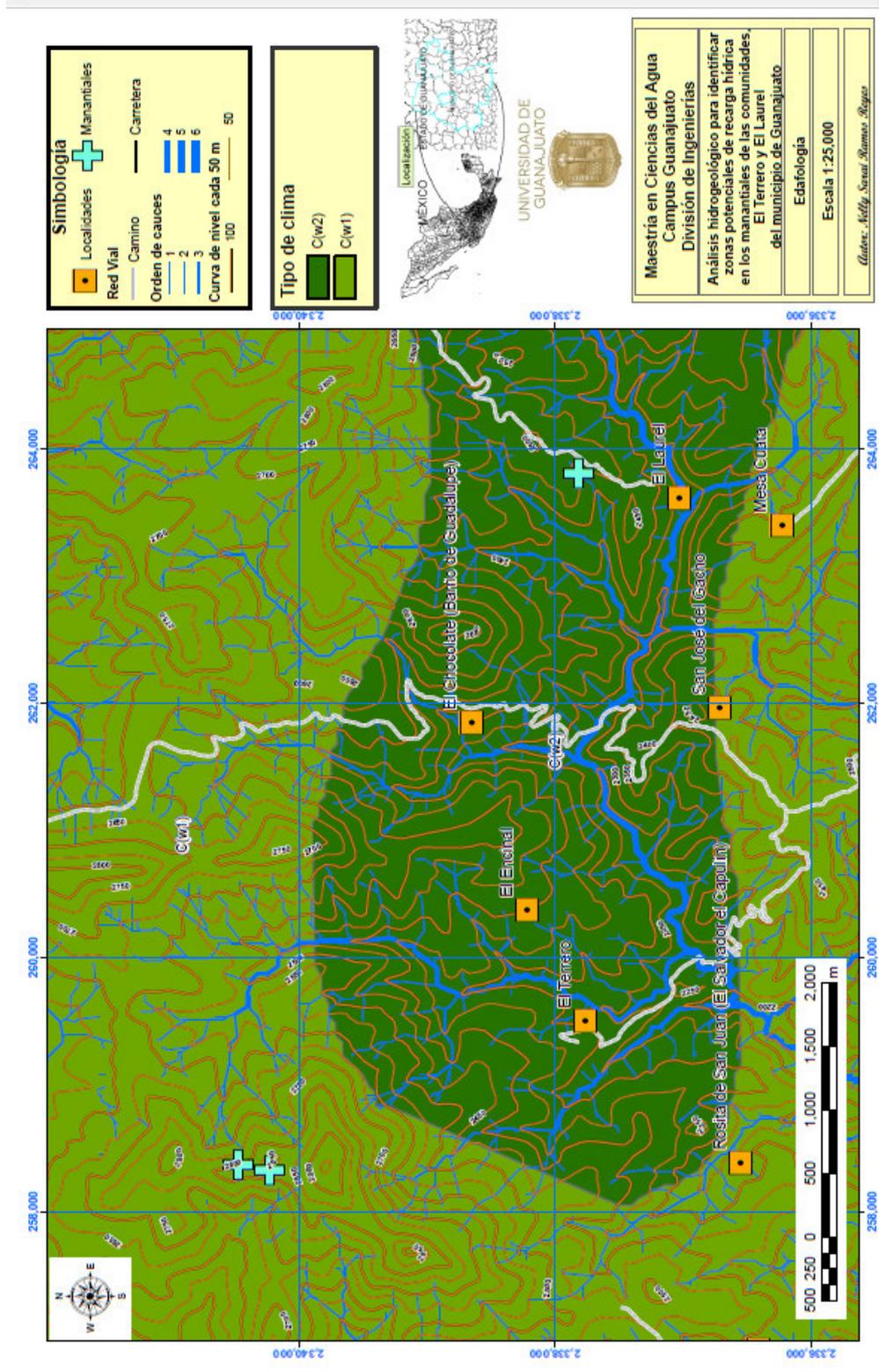


Figura 15. Mapa de clima para la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).

4.1.2 Precipitación

Considerando el mapa de precipitación de la zona, en la Comunidad de El Laurel el promedio anual de precipitación es de 680 mm/año, incrementándose ligeramente la precipitación hacia las faldas de la sierra de Guanajuato.

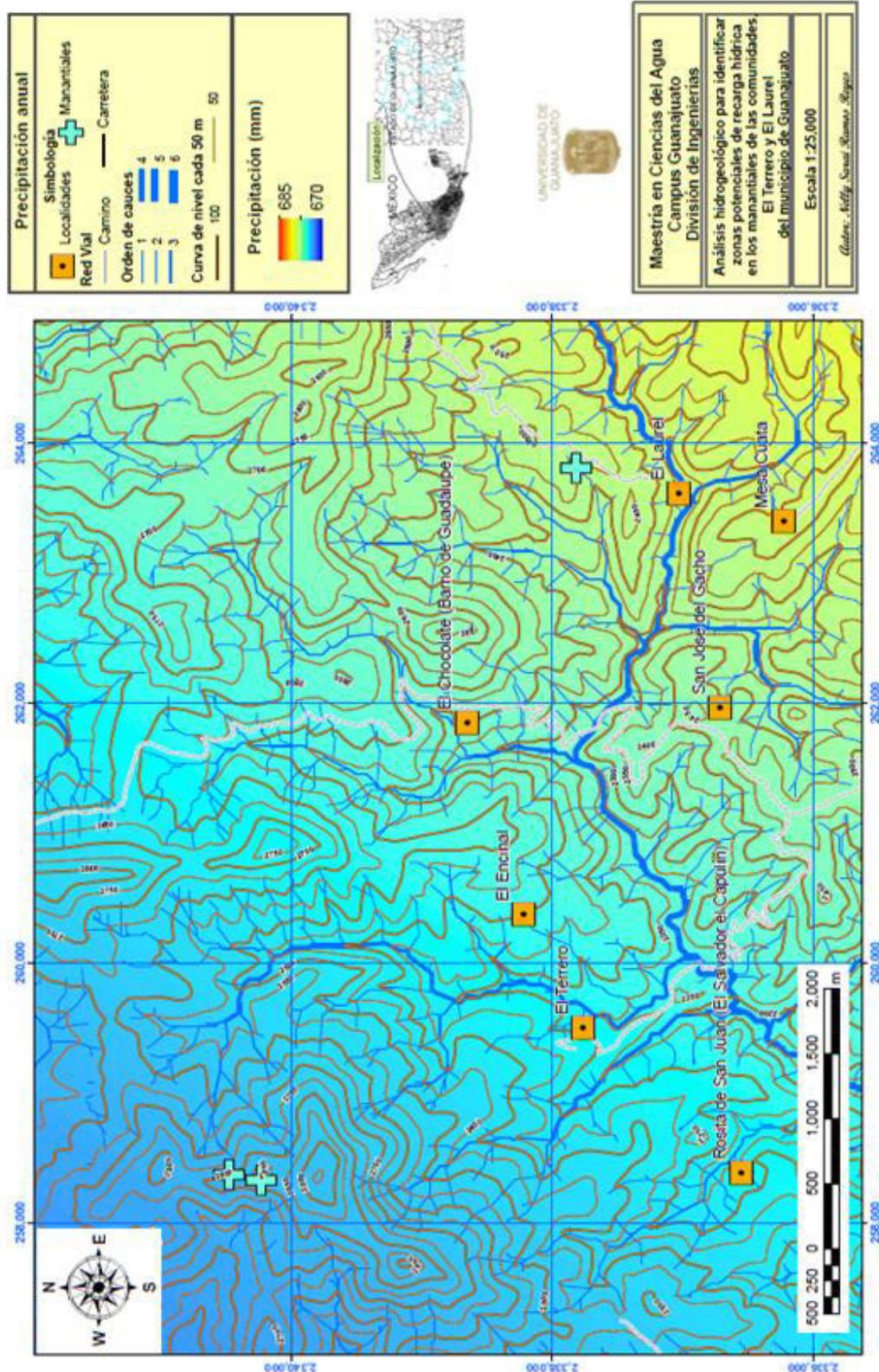


Figura 16. Mapa de valores de precipitación anual para la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).

4.1.3 Tipo de suelo

Nuestra área de estudio presenta dos unidades de suelo dominante bien diferenciadas. La Comunidad de El Laurel se encuentra sobre suelo tipo Phaeozem (Hh+l) o también conocido como Feozem, se trata de un suelo oscuro rico en materia orgánica, cuyo material parental es eólico, de till glaciar y otros materiales básicos no consolidados. La vegetación natural presente en este tipo de suelo es de praderas, pastos altos y bosques.

Es un suelo poroso y muy fértil, por lo que supone una excelente tierra de cultivo, además de servir para la cría y el engorde de ganado mediante pastos mejorados (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016). Por otro lado, al Este de la comunidad se tiene presencia de suelo de tipo Luvisol (Lo+l+Hh); suelo enriquecido en arcillas en la parte subsuperficial, presentando arcillas de alta actividad (migración), dicho suelo presenta como material parental una gran variedad de materiales no consolidados propios de depósitos eólicos, aluviales y coluviales. Es un suelo fértil, por lo que puede ser empleado para usos agrícolas, desde el cultivo de grano en zonas de baja pendiente, hasta la proliferación de bosques y huertos en las zonas de mayor pendiente, en zonas de alta pendiente será recomendable la implementación de medidas de control de erosión (FAO, 2016).

De acuerdo a la ponderación propuesta por Matus et al., 2009, de la capacidad de recarga hídrica del suelo según sus características texturales, podemos reconocer que, en el flanco oriental de El Laurel correspondiente al suelo tipo Luvisol, tenemos una alta presencia de arcilla, por lo que según esta clasificación hablamos de una zona con poca posibilidad de recarga, por el contrario, en la porción occidental, donde se encuentra ubicada la comunidad, encontramos material de tipo Feozem, por lo que si se tendría una posibilidad de recarga de moderada a alta. Sin embargo, se debe mencionar que el espesor del suelo en la Comunidad de El Laurel no supera los 0.60 m, siendo así un factor poco determinante para el potencial de recarga hídrica, pero importante para dar estructura a las obras.

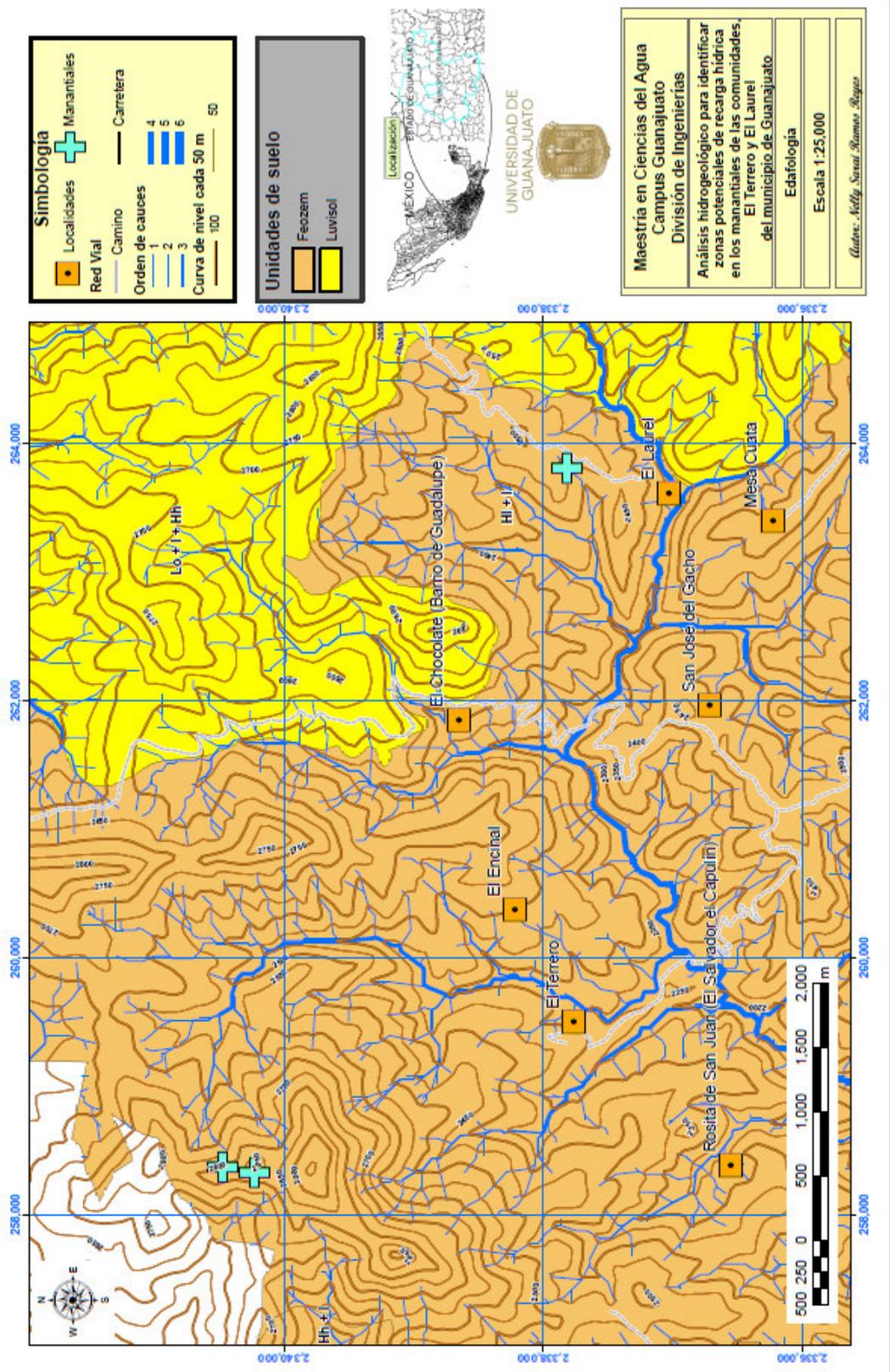


Figura 17. Mapa de Unidades de suelo para la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).

4.1.4 Cobertura vegetal y uso del suelo

La Comunidad de El Laurel se encuentra sobre una cobertura vegetal perenne de bosques de Quercus o encino, con poco uso de suelo, favoreciendo así su potencial de recarga. Ya hacia el norte y sur de la comunidad si es posible encontrar suelos con Agricultura temporal (Atp), lo cual reduciría en parte su capacidad de infiltración hídrica.

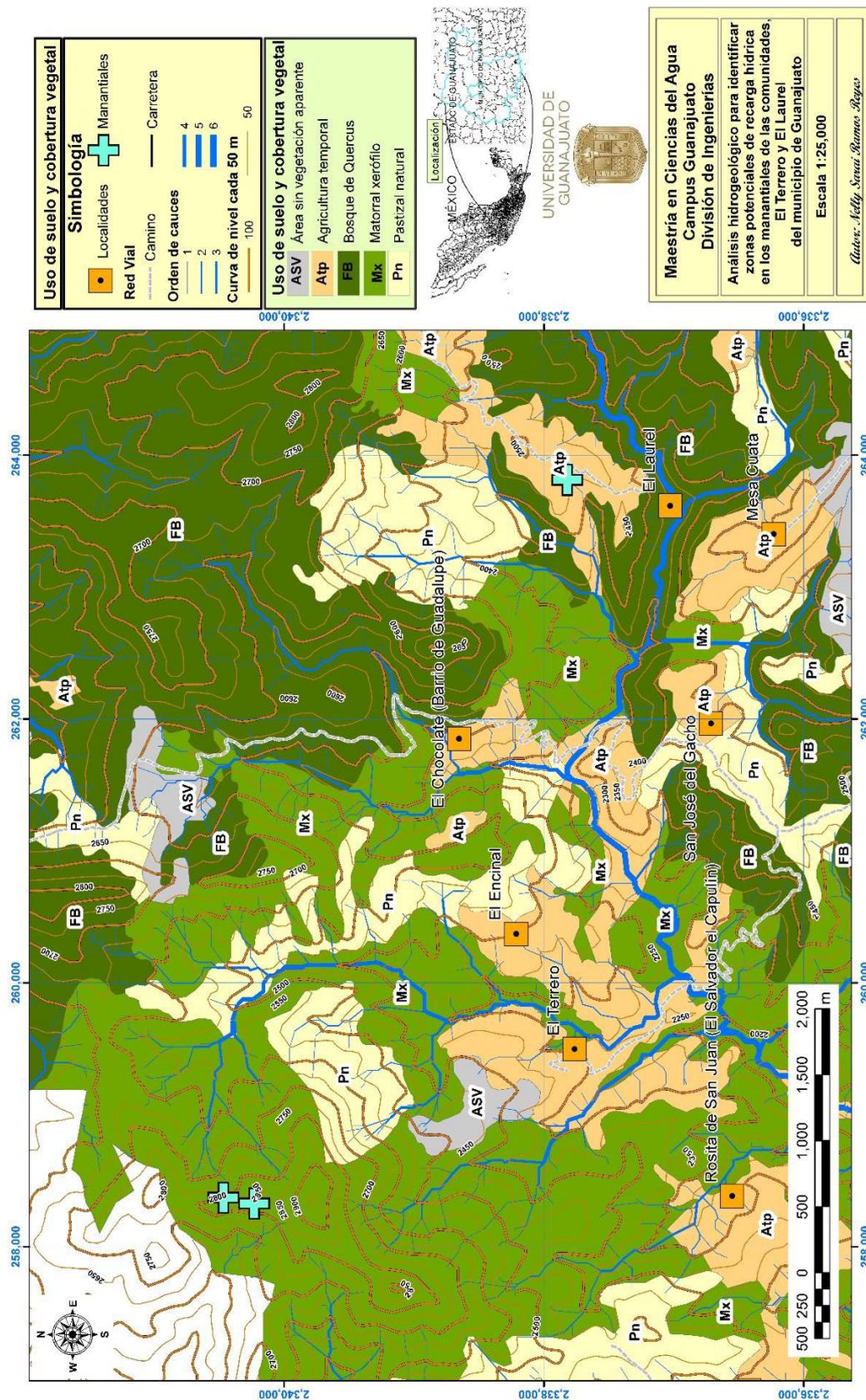


Figura 18. Mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de la zona de El Laurel y El Terrero (Ramos, 2018).

4.1.5 Pendiente del terreno

Evaluando el mapa de pendientes del terreno basándonos en las clases de pendiente propuestas por Matus, se puede observar que la Comunidad de El Laurel se encuentra asentada en una zona ligeramente inclinada, con ciertas porciones de tierra a su alrededor más o menos inclinadas, sin embargo se muestra un fuerte aumento en la inclinación de las pendientes buzando hacia los ríos y afluentes, por lo que se trata de un terreno versátil que muestra pendientes que van desde ligeramente inclinadas en el rango de los 2° a 5° (3.5% - 9%), hasta muy escarpadas, superando en algunas áreas los 45° (100%) de inclinación.

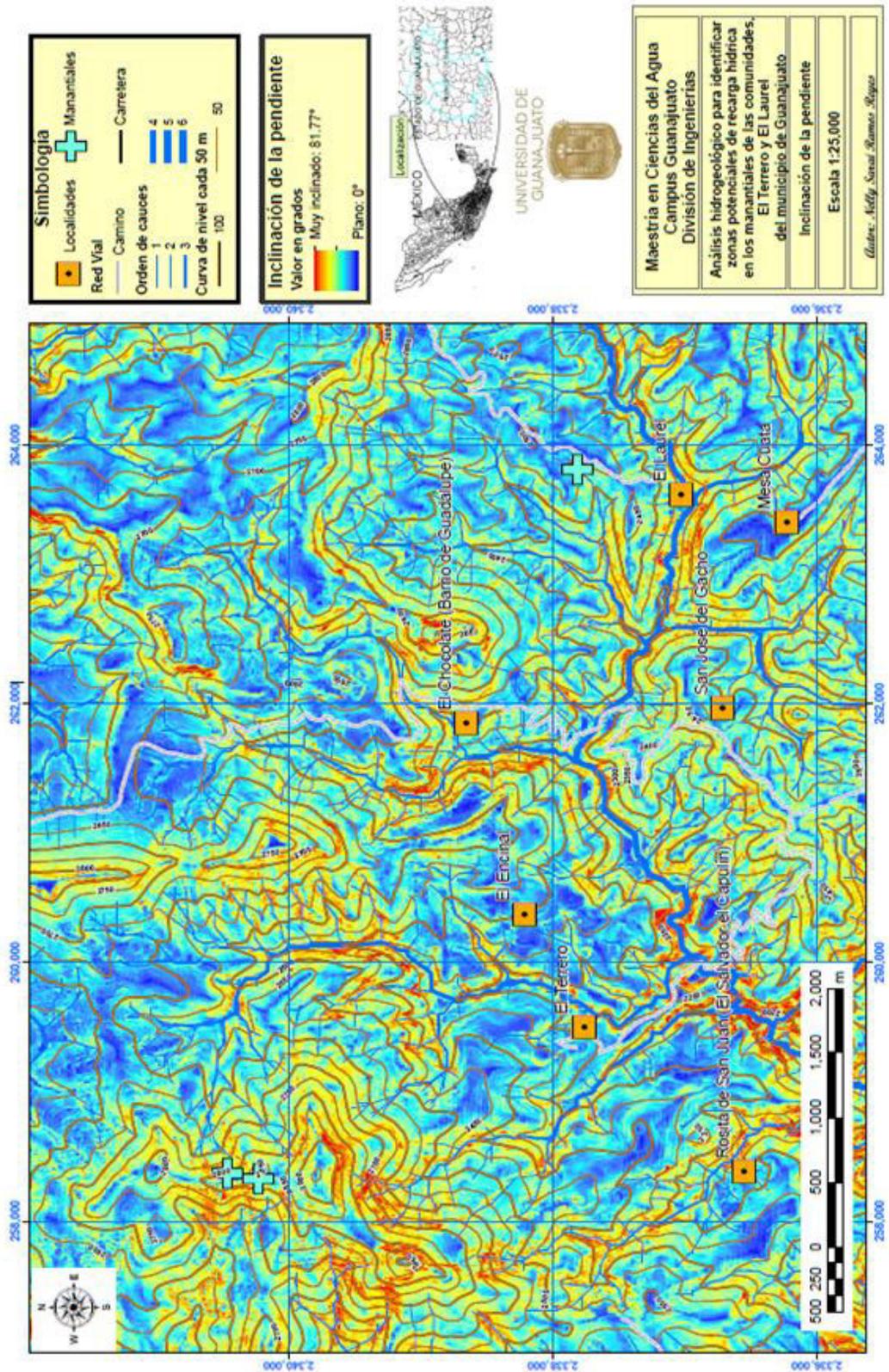


Figura 19. Mapa de Inclinación de la pendiente para las Comunidades de El Terrero y El Laurel (Ramos, 2018).

4.1.6 Tipo de roca

La Comunidad de El Laurel se encuentra fundamentalmente sobre rocas meta-volcánicas sedimentarias (Js-Ki (?) MVs) y Basalto (Js-Ki(?)B) del Jurásico Superior y Cretácico inferior. Estratigráficamente se ubica sobre cuerpos intrusivos de Tonalita (Js-Ki (?) Tn), y subyace a flujos riolíticos (ToR3) del Terciario Paleógeno. Tomando en cuenta la porosidad medianamente buena de las rocas meta-volcánicas sedimentarias, y de su distribución y posición estratigráfica dentro del área, cabría esperar un moderado potencial de recarga hídrica para la zona, con la posibilidad de encontrar almacenaje de agua subterránea gracias a la capa impermeable que representan los flujos de Tonalita.

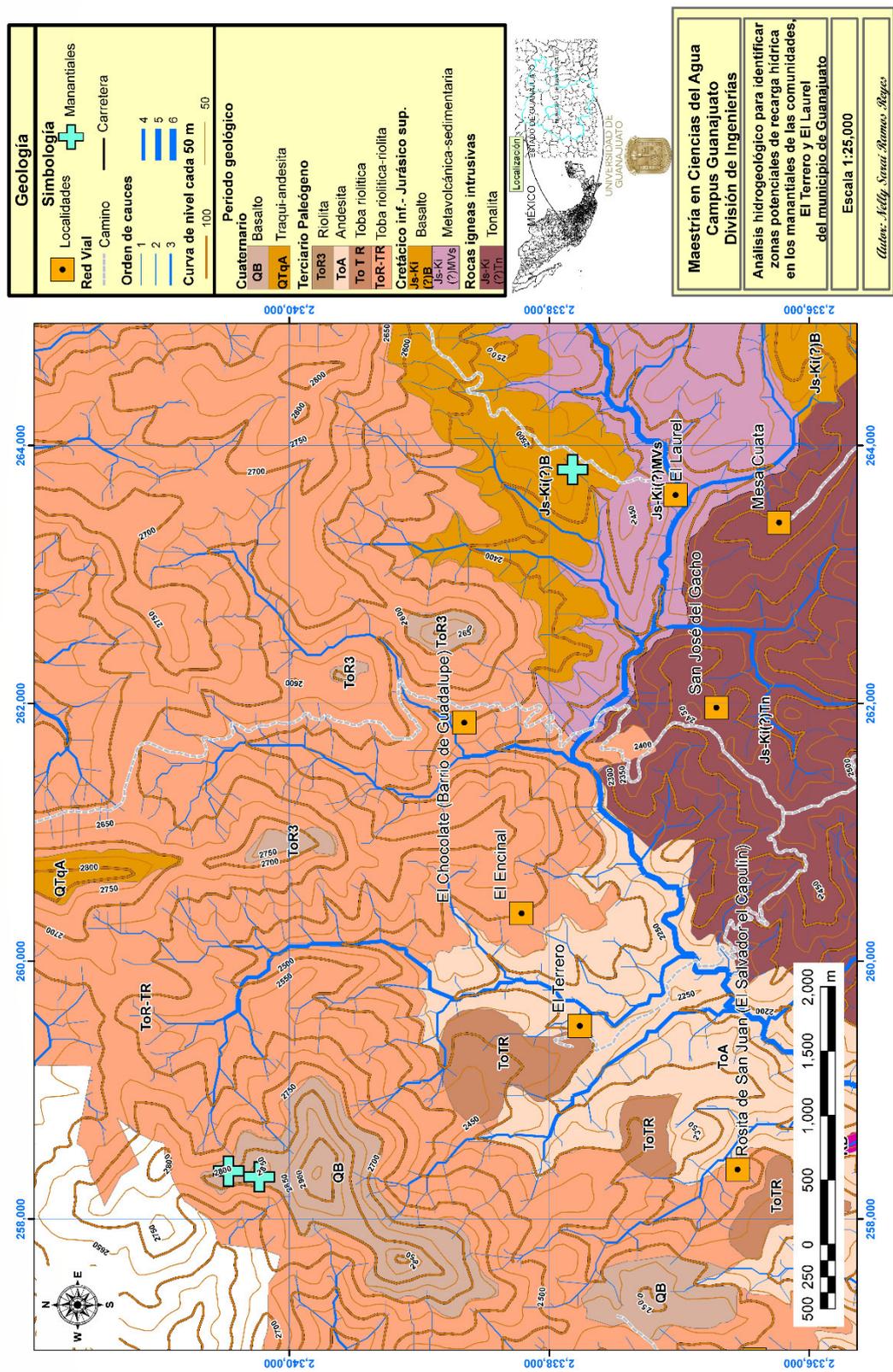


Figura 20. Mapa de Geología de las Comunidades de El Terrero y El Laurel (Ramos, 2018).

4.1.7 Potencial de recarga hídrica de la Comunidad El Laurel

Una vez detalladas las características presentes en la Comunidad de El Laurel se asignarán las ponderaciones establecida por Matus, y se determinará en un rango de 1 a 5 el potencial de recarga hídrica de la zona.

Tipo de suelo

Tomando en cuenta el poco espesor del suelo en la Comunidad de El Laurel y la presencia de suelo de tipo Phaeozem (Hh+I), con arcillas en la porción oriental, daremos una ponderación de 2.

Uso de suelo

En la Comunidad de El Laurel se encuentra cubierta por bosques de encino y no hay uso agrícola del suelo. A cientos de metros si existen zonas de uso agrícola de temporal, pero estas se encuentran a una distancia suficiente como para no influir en la comunidad. Se otorga una ponderación de 5.

Cobertura vegetal

La Comunidad de El Laurel se encuentra cubierta en un alto porcentaje por bosques de encino, se otorga una ponderación de 4.

Pendiente del terreno

La Comunidad de El Laurel se encuentra en una zona con pendientes que van desde ligeramente inclinadas en el rango de los 3.5% al 9%, hasta muy escarpadas, superando en algunas áreas el 100° de inclinación. Por lo que se le asigna una ponderación de 5 al tener un amplio rango de pendientes.

Tipo de roca

La Comunidad de El Laurel se encuentra sobre roca meta-volcánica sedimentaria con una moderada capacidad de infiltración, se le asigna una ponderación de 3.

Tabla 10. Ponderaciones obtenidas para la Comunidad de El Laurel para los factores que determinan el potencial de recarga hídrica según la metodología propuesta por Matus (2009).

Parámetro de potencial de recarga hídrica según Matus	Ponderación obtenida para la Comunidad de El Laurel
Tipo de suelo	2
Uso de suelo	5
Cobertura vegetal	4
Pendiente del terreno	5
Tipo de roca	3

Con estos valores una vez establecidos continuamos a determinar el potencial de recarga hídrica para nuestra zona evaluada, mediante la fórmula:

$$ZR = [0.27 (Pend) + 0.23 (Ts) + 0.12 (Tr) + 0.25 (Cve) + 0.13 (Us)]$$

Sustituyendo los valores de cada variable tenemos:

$$ZR = [0.27 (5) + 0.23 (2) + 0.12 (3) + 0.25 (4) + 0.13 (5)]$$

$$ZR = 3.82$$

Por lo tanto:

Potencial de recarga hídrica para la Comunidad de El Laurel = Alta

Haciendo una comparación con el mapa de potencial de recarga hídrico elaborado por (Ramos, 2018) considerando la misma metodología, se determina que el potencial de recarga que propone dicho trabajo para la Comunidad de El Laurel es de moderada, aumentando hacia alta para la zona oriental de la comunidad. Por lo tanto, se puede deducir tanto de su resultado, como del propuesto en el presente trabajo, que la Comunidad de El Laurel si presenta las características necesarias para que exista recarga hídrica.

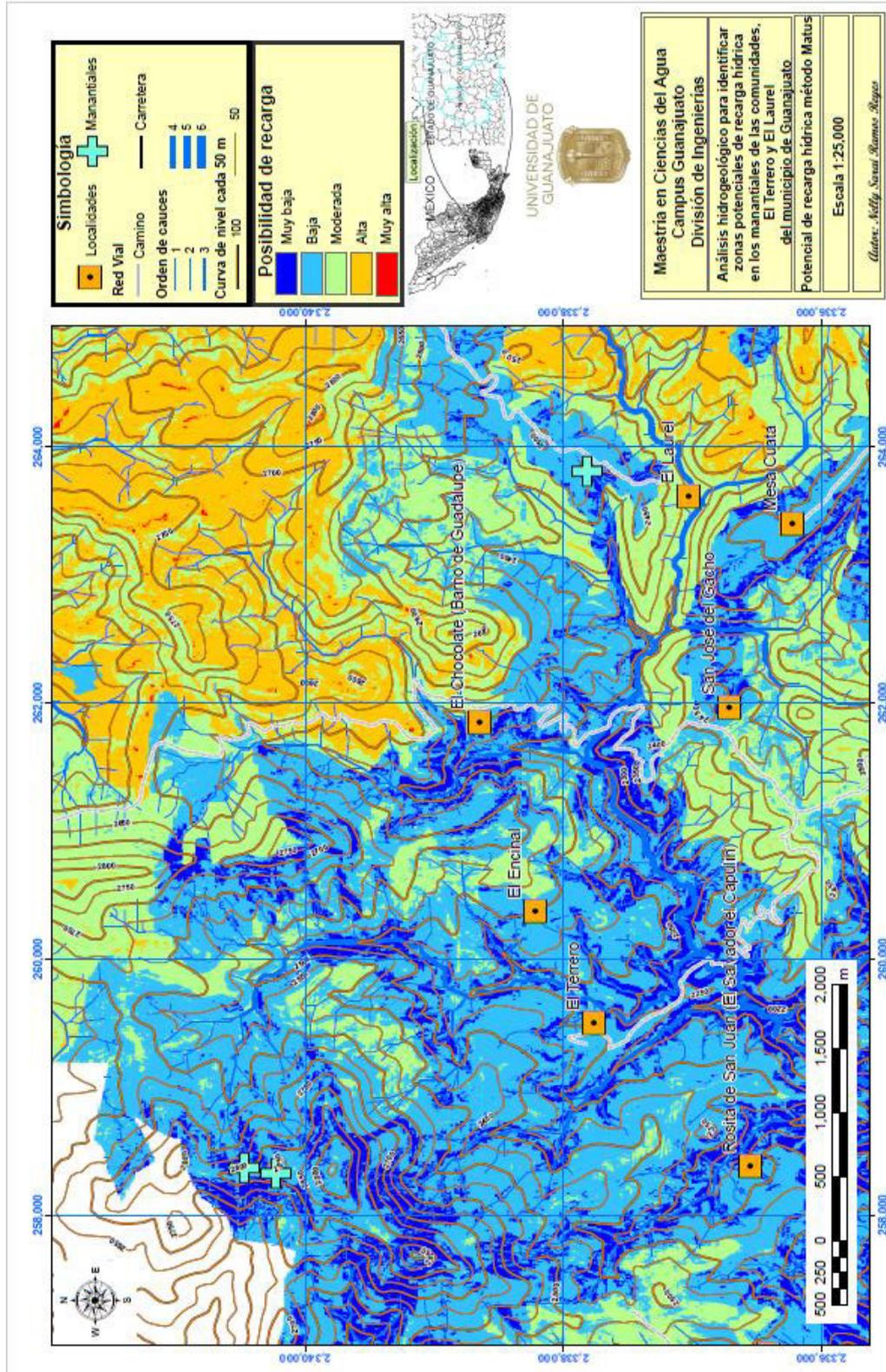


Figura 21. Potencial de recarga hídrica para las Comunidades de El Terrero y El Laurel por el método Matus (Ramos, 2018).

4.1.8 Balance hídrico en la Comunidad de El Laurel

Como resultado del análisis del balance hídrico climático estimado por (Ramos, 2018) para la zona, se puede observar que en el periodo comprendido entre finales de mayo a principios de octubre se tiene una mayor disponibilidad de agua para su captación gracias al aumento de las precipitaciones en esa época del año. Por el contrario, en el periodo que comprende, desde finales de octubre hasta principios de mayo, la disponibilidad de agua para su captación es baja, debido a la escasa presencia de precipitación en esa temporada del año. De igual manera se determinó que existe mayor probabilidad de tener recarga hídrica durante los meses de mayo a octubre, gracias a que durante esta temporada la tasa de precipitación supera a la de evapotranspiración, generando, en conjunto con las características del terreno, las condiciones óptimas para que exista recarga hídrica.

4.2 Propuestas de obras civiles para recarga hídrica por lluvia en la Comunidad El Laurel

Se presenta una tabla por cada obra propuesta, en la que se compararan los parámetros recomendados por la obra para su implementación, y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel, especificando al final de cada parámetro si: *Sí es viable su implementación, Podría ser viable su implementación, pero bajo ciertas condiciones o No es viable su implementación.* En el penúltimo caso las condiciones se detallan en la parte inferior de las respectivas tablas a manera de notas.

Tabla 11. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las tinajas ciegas y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.

Tinajas ciegas			
Parámetro	Recomendado por la obra	Presente en El Laurel	Viabilidad de Implementación
Clima	Subhúmedo	Templado - subhúmedo	Sí es viable
Precipitación	>700 mm/año	680 mm/año	Sí es viable
Tipo de suelo	Arcillosos	Franco-arcilloso	Sí es viable
Uso de suelo	Con cobertura vegetal	Bosque	Sí es viable
Cobertura vegetal	Alta	Alta	Sí es viable
Pendiente del terreno	5% - 10%	3.5% - 100%	Sí es viable
Tipo de roca	Moderada a altamente permeable	Moderadamente permeable	Sí es viable

Tabla 12. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Zanja-Bordo para Retención de Humedad y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.

Zanja-Bordo para Retención de Humedad			
Parámetro	Recomendado por la obra	Presente en El Laurel	Viabilidad de Implementación
Clima	Subhúmedo	Templado - subhúmedo	Sí es viable
Precipitación	>700 mm/año	680 mm/año	Sí es viable
Tipo de suelo	Franco - arenoso	Franco-arcilloso	Podría ser viable
Uso de suelo	Pastos y matorrales	Bosque	Podría ser viable
Cobertura vegetal	Escasa	Alta	Podría ser viable
Pendiente del terreno	5% - 40%	3.5% - 100%	Sí es viable
Tipo de roca	Moderada a altamente permeable	Moderadamente permeable	Sí es viable

Notas: Respecto al tipo de suelo, aunque la obra recomienda una textura franco-arenosa, el espesor de suelo que se tiene en la comunidad no resulta determinante para la infiltración, ya que teóricamente es poco permeable pero debido a su espesor, si permite el flujo de agua. Hablando de la cobertura vegetal, la obra recomienda implementarse en zonas con escasa cobertura, sin embargo, si recomienda el cultivo de pastos para protección de la obra y favorecer la infiltración, por lo que la obra, si pudiera implementarse en zonas de la comunidad que tengan pastos o matorrales, pero sin árboles.

Tabla 13. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Terrazas de Bancos Alternos y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.

Terrazas de Bancos Alteros			
Parámetro	Recomendado por la obra	Presente en El Laurel	Viabilidad de Implementación
Clima	Árido - Tropical	Templado - subhúmedo	Sí es viable
Precipitación	100 mm/año – 2000 mm/año	680 mm/año	Sí es viable
Tipo de suelo	Franco	Franco-arcilloso	Podría ser viable
Uso de suelo	Con cobertura vegetal	Bosque	Sí es viable
Cobertura vegetal	Alta	Alta	Sí es viable
Pendiente del terreno	>15%	3.5% - 100%	Sí es viable
Tipo de roca	Moderadamente permeable	Moderadamente permeable	Sí es viable

Notas: Este tipo de obra se puede adaptar a un gran tipo de suelos sin embargo en el caso de que nuestra área presente suelo arcilloso, sumado a una tasa de precipitación muy alta, será necesaria la construcción como estructura complementaria un canal con pendiente longitudinal en la parte interna del bordo de la terraza para facilitar el drenaje de agua (MINAGRI, 2014), y así evitar su estancamiento. Aunque en El Laurel tenemos suelo franco-arcilloso, la tasa de precipitación no es muy alta, por lo que no sería necesaria la construcción de ninguna estructura adicional.

Tabla 14. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Terrazas de Base Angosta y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.

Terrazas de Base Angosta			
Parámetro	Recomendado por la obra	Presente en El Laurel	Viabilidad de Implementación
Clima	Cualquier clima	Templado - subhúmedo	Sí es viable
Precipitación	Cualquier régimen pluviométrico	680 mm/año	Sí es viable
Tipo de suelo	Franco - arcilloso	Franco - arcilloso	Sí es viable
Uso de suelo	Sin vegetación	Bosque	Podría ser viable
Cobertura vegetal	Escasa	Alta	Podría ser viable
Pendiente del terreno	5% - 15%	3.5% - 100%	Sí es viable
Tipo de roca	Moderada a altamente permeable	Moderadamente permeable	Sí es viable

Notas: La obra recomienda una superficie libre de vegetación para potenciar la capacidad de infiltración de la obra, sin embargo, si se pudiera implementar en zonas con pastos.

Tabla 15. Comparación de los parámetros recomendados para la implementación de las Terrazas Individuales y los parámetros que se tienen en la Comunidad de El Laurel.

Terraza Individual			
Parámetro	Recomendado por la obra	Presente en El Laurel	Viabilidad de Implementación
Clima	Cualquier clima	Templado - subhúmedo	Sí es viable
Precipitación	Cualquier régimen pluviométrico	680 mm/año	Sí es viable
Tipo de suelo	Poco arenoso	Franco - arcilloso	Sí es viable
Uso de suelo	Pastos	Bosque	Podía ser viable
Cobertura vegetal	Escasa	Alta	Podía ser viable
Pendiente del terreno	10% - 60%	3.5% - 100%	Sí es viable
Tipo de roca	Moderada a altamente permeable	Moderadamente permeable	Sí es viable

Notas: La obra recomienda una superficie libre de vegetación para potenciar la capacidad de infiltración de la obra, sin embargo, si se puede implementar en zonas con pastos.

Obras que se pueden implementar en la Comunidad El Laurel

Una vez que evaluamos y comparamos cada parámetro de clima, precipitación, tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y tipo de roca, exigido por cada obra, comparadas con las características localizadas en la Comunidad de El Laurel, somos capaces de determinar cuáles de las 5 obras propuestas son viables para implementar y construir en la comunidad.

Tabla 16. Obras que se pueden implementar en la comunidad de El Laurel, una vez evaluados los parámetros de clima, precipitación, tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y tipo de roca.

Obra	¿Se pueden construir en la Comunidad de El Laurel?
Tinas Ciegas	Si
Zanja-Bordo Para Retención de Humedad	Si
Terrazas de Bancos Alternos	Si
Terraza de Base Angosta	Si
Terraza Individual	Si

CONCLUSIÓN

En el presente trabajo de investigación se proponen un conjunto de obras civiles para recarga hídrica por lluvia que resultan viables para implementar en la Comunidad de El Laurel en el municipio de Guanajuato, México. Para dicho fin se efectuó una amplia búsqueda bibliográfica, que permitió caracterizar el área de estudio y establecer las diferentes obras civiles hídricas que se implementan con efectividad hoy día a lo largo del mundo. Posteriormente se determinó la metodología que permitió conocer el potencial de recarga hídrica con que disponía la zona de estudio; así, tomando en cuenta la información recabada, se definió la Metodología Matus (2009), con la cual se dictó un alto potencial de infiltración hídrica en la comunidad, ya que se estableció un clima y un régimen pluviométrico favorable; además se determinó para la comunidad un suelo de tipo Luvisol y Phaeozem poco profundo con alta presencia de arcillas que aunque teóricamente permite muy poco flujo de agua, gracias a su poco espesor no reduce su potencial de infiltración; estableciéndose también una buena cobertura vegetal de bosques de coníferas con nada de uso de suelo, salvo ciertas porciones distantes, favoreciendo así la captación de agua y su posterior recarga.

Se decretó para la comunidad un amplio número de pendientes de terreno, adaptándose así a una gran cantidad de obras, y finalmente se dispuso que la Comunidad de El Laurel se encuentra situada sobre un conjunto de rocas meta-sedimentarias moderadamente permeables. Una vez caracterizada la Comunidad se describió un conjunto de obras económicas y técnicamente viables para nuestro objetivo, estableciendo que en la zona existe un balance hídrico favorable, se compararon las características de terreno recomendadas por cada obra descrita para garantizar su eficiencia, con las características presentes en la Comunidad de El Laurel.

Se determina que las cinco obras propuestas: Tinas Ciegas, Zanja-Bordo Para Retención de Humedad, Terrazas de Bancos Alternos, Terraza de Base Angosta y Terraza Individual, resultan completamente viables para su construcción en la Comunidad de El Laurel.

Sin embargo, de las cinco obras que se precisan como viables para implementar en la comunidad, algunas de ellas requieren de mayor mano de obra para su construcción, o trabajo de mantenimiento. De manera particular, evaluando los diversos factores como las ya descritos en referencia a las características del terreno, la dificultad de construcción, así como la dificultad y frecuencia con la que se deberá de dar mantenimiento a las obras y el beneficio que se obtendrá a partir de su construcción.

Por lo anteriormente expuesto, las obras civiles que se recomienda para implementar en la Comunidad de El Laurel son las terrazas individuales.

Con este tipo de obra se evita la implementación de estructuras auxiliares a la obra principal ya sea en forma de drenes, desagües subterráneos, cauces empastados o estructuras de desviación, y se favorece por la poca mano de obra requerida para ser construida, al no demandar el mover un gran volumen de material como serían en el caso de las tinas ciegas, las zanjas-bordo para retención de humedad o las terrazas de bancos alternos, permitiendo ser desarrollada la terraza individual por dos personas solamente con la única ayuda de un pico y una pala, permitiendo así la construcción de un número significativo de terrazas por día. Si se considera la capacidad de retención de agua por terraza individual que es de 10 lts. a 20 lts. (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, 2011), construyendo 50 terrazas, se podría disponer por cada lluvia abundante de hasta un 1m^3 de agua que infiltrarían al subsuelo contribuyendo a la recarga hídrica. Por ejemplo, en el caso de las tinas ciegas, considerando su dimensión 2 m de largo, un ancho de 0.5 m, y 0.5 m de profundidad, se obtendría un volumen de retención de agua de 0.5 m^3 por tina (Rubio, Martínez, & Sánchez, 2009), siendo mayor que en las terrazas individuales; sin embargo en ellas no se beneficia de manera directa durante el proceso de infiltración a los habitantes de la comunidad como si lo permiten las terrazas individuales; aprovechando la humedad del suelo para la plantación de vegetación endémica, y si así se deseara, la plantación de especies perennes favoreciendo además la actividad agrícola.

Hablando de la frecuencia y la complejidad de los trabajos de mantenimiento, es notablemente menor a las requeridas en otras obras como las terrazas de bancos alternos o a las terrazas de base angosta, en la que los altos y largos bordos que

se realizan con el material escarbado se verían constantemente afectados por los escurrimientos superficiales, siendo necesario dar mantenimiento a las obras con relativa frecuencia. En el caso de las terrazas individuales su mantenimiento se limita a extraer la lama acumulada en la terraza después de una lluvia abundante, y reacomodar las piedras que constituyen su barrera de protección cada vez que estas se muevan (Rivas, 2014), actividad que fácilmente puede ser llevada a cabo por los propios habitantes de la comunidad. Dentro de los problemas que las terrazas individuales podrían propiciar; sería la erosión del suelo, sin embargo, este problema es fácilmente minimizado con la adecuada construcción de una pequeña barrera de piedra sobre el bordo de cada terraza. Por consiguiente, y considerando la información que el presente trabajo de investigación sustenta, se determina la implementación de terrazas individuales en la Comunidad de El Laurel, Guanajuato, México; como obras civiles para favorecer la recarga natural por lluvia en la comunidad.

Con el presente trabajo de investigación se busca el establecimiento del potencial que poseen infinidad de zonas del país para la infiltración hídrica, la remediación de los mantos acuíferos y el desarrollo de la actividad agrícola, sin la necesidad primaria de continuar destinando artificialmente grandes volúmenes de agua potable para atender dicha demanda. La construcción de este tipo de obras no solo brinda beneficios para las comunidades que las implementan, sino que suponen una gestión hídrica más limpia, sana y responsable para el mundo entero y sus habitantes.

REFERENCIAS

- Aparicio, F. J. (2006). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ciudad de México: Limusa.
- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Ballén, J. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia*. Joao Pessoa (Brasil): VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua.
- Comisión Nacional de Riego . (s.a). *Cartilla de Infiltración de Agua en el Suelo*. Talca : Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA).
- Comisión Nacional del Agua . (2016). *Estadísticas del Agua en México, edición 2016*. Ciudad de México : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial*. México, D.F.: DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN .
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.-*. México, D.F.: DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN .
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. México, D.F.: Coordinación General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez T. y V. Bunge. (2015). "Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trincheras". México D.F.: Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 88, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 6-18, dx.doi.org/10.14350/rig.47378.
- Cruickshank, C. (1992). *Relación entre las aguas superficiales y las subterráneas en una cuenca*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Diario Oficial de la Federación. (2006). *ACUERDO por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala*. México, D.F: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Echegoyén , J., Romero , M., & Velázquez, S. (1970). Geología y Yacimientos Minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato. *Consejo de Recursos Naturales No Renovables, Boletín 75*.
- Fernández, D. S., Martínez, M. R., & Ramírez, M. d. (2009). *CATÁLOGO DE OBRAS Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA APOYADAS CON EL COMPONENTE DE CONSERVACIÓN Y USO SUSTENTABLE DE SUELO Y AGUA (COUSSA) DEL PROGRAMA USO SUSTENTABLE DE RECURSOS NATURALES PARA LA PRODUCCIÓN*

PRIMARIA. Montecillos, Texcoco, Estado de México.: Colegio de Postgraduados, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.

Flores, J. (2002). *DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN BAJO CRITERIOS DE INGENIERÍA HIDROLÓGICA*. Talca: Universidad de Talca.

Food and Agriculture Organization. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma : Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Food and Agriculture Organization. (24 de 09 de 2010). *Information System on Water and Agriculture, Aquastat*. . Obtenido de <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es>

Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. (2011). *Proyecto Promoción de Sistemas Agroforestales de Alto Valor con Cacao en Honduras, Guía sobre prácticas de conservación de suelos / Proyecto Promoción de Sistemas Agroforestales de Alto Valor con Cacao en Honduras. — 2a ed. —*. La Lima: FHIA.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1998). *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*. Aguascalientes, Ags.: Dirección General de Difusión.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2005). *Prácticas para la conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas*. México, D. F.: Campo Experimental San Luis-CIRNE-INIFAP.

Martínez, J. G., Castellanos, Z., Rivera, M., Núñez, G., & Faz, R. (2006). Contaminación por nitratos en acuíferos del norte de México y del estado de Guanajuato. *AGROFAZA: publicación semestral de investigación científica*, vol. 6, no 3, p. 379-388.

Matus, O. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua*. Turrialba: Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica : aplicación práctica en la subcuenca del Río Jacuapa, Nicaragua*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

Mengelle, J. J., Canet, C., Prol, R. M., González, E., & Camprubí, A. (2013). Secuencia vulcano-sedimentaria La Esperanza (Cretacico Inferior) al norte de Guanajuato, México: Importancia en la exploración de sulfuros masivos vulcanogénicos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 65, núm 13, p.511-525.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2014). *Cartillas para la conservación del suelo, Terrazas de banco (Andenes)*. Lima: Dirección Zonal Agrorural Ayacucho.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España. (20 de 11 de 2018). *Puerto de Marín, Autoridad Portuaria de Marín y Ría de Pontevedra*. Obtenido de http://apmarin.com/download/211_infr1.pdf

Murillo, M. (2010). *“EL CULTIVO EN CONTORNO, UNA PRÁCTICA PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LOS SUELOS”*. La Paz: Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras.

- Ochoa, F. J., & Montoya, C. (1987). *Diseño y Trazo de Terrazas de Base Angosta Utilizando Dos Criterios de Espaciamiento Entre Terrazas*. Marín: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Ordoñez, J. J. (2011). *¿Qué es una Cuenca Hidrológica?* Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez, J. J. (2011). *Aguas Subterráneas - Acuíferos*. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Estudio FAO, Riego y Cultivo.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Roma: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (24 de noviembre de 2016). *MEDICIÓN DE ÁNGULOS VERTICALES Y DE PENDIENTES*. Obtenido de GENERAL: http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707s/x6707s02.htm#79a
- Orozco, F. J. (2014). *Mineralogía y génesis del "clavo de Rayas" de la zona central de la Veta Madre de Guanajuato*. Juriquilla: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Pérez, P. I. (2015). *Visualización de Mallas de Terreno e Identificación de Patrones de Deranaje en Cuencas*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ciencias de la Computación.
- Pizarro, R., Flores, J. P., Sangüesa, C., Martínez, E., & León, L. (2008). *Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile*. Talca: Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Gestión Forestal y Ambiental.
- Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., & Martínez, E. (2004). *Monografías ZANJAS DE INFILTRACIÓN*. Talca: Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda.,.
- Price, M. (2003). *Agua Subterránea*. México, D.F.: Limusa .
- Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central, PASOLAC. (2005). *Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua*. San Salvador, El Salvador.: New Graphic, S.A. de C.V.
- Ramos, N. S. (2018). *Análisis hidrogeológico para identificar zonas potenciales de recarga hídrica en los manantiales de las comunidades, El Terrero y El Laurel del municipio de*

Guanajuato. Guanajuato: Universidad de Guanajuato / División de Ingenierías, Maestría en Ciencias del Agua.

- Rendón, J. R., & Bermúdez, L. N. (2017). *Criterios para el establecimiento de cultivos de café en Colombia*. Manizales: Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ).
- Rivas, B. A. (7 de mayo de 2014). *Terrazas Individuales*. Obtenido de Practicas y Obras de Conservación de Suelos:
<http://barbaraazucenarivasayala.blogspot.com/2014/05/terrazas-individuales.html>
- Rubio, E., Martínez, M. R., & Sánchez, B. (2009). *Tinas ciegas*. Montecillos, Estado de México.: Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados.
- Sánchez, B., & Martínez, M. R. (s.f). *Terrazas de Banco*. s.c: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (SAGARPA).
- Sánchez, F. J. (2017). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología, Clasificación de las Formaciones Geológicas según su Comportamiento Hidrogeológico*. Salamanca, España: Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.
- Sánchez, F. J. (2017). *El Ciclo Hidrológico*. Salamanca, España: Departamento de Geología.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base a la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 2-14.
- Schulz, C. J., & García, R. F. (2015). *Balance Hídrico y Recarga de Acuíferos*. s.c: Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Chileno.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de métodos de investigación (versión en Español)*. Madrid: Instituto de Hidrología de España-UNESCO.
- Tarbutck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson Education S. A.
- UNATSABAR. (2003). *Especificaciones técnicas para el diseño de zanjas y pozas de infiltración*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Zamora, N. C. (1981). *La Erosión del Suelo y sus Métodos de Control Aprobados*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, Escuela de Agricultura.

ANEXOS

Anexo A

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2015, CONSERVACIÓN DEL RECURSO AGUA-QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES Y EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS NACIONALES.

Apéndice Normativo "A"

Métodos para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural

A.1.2 Métodos Indirectos

En caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información de registros hidrométricos o ésta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural se aplica el método indirecto denominado: precipitación-escurrimiento.

A.1.2.1 Precipitación-escurrimiento

El volumen medio anual de escurrimiento natural se determina indirectamente, mediante la siguiente expresión:

$$\text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA} = \text{PRECIPITACIÓN ANUAL DE LA CUENCA} * \text{ÁREA DE LA CUENCA} * \text{COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO}$$

A.1.2.1.1 Precipitación anual en la cuenca

A) La información pluviométrica de la cuenca deberá abarcar un periodo mínimo de 20 años. En caso de que falten datos de un máximo de 5 años para completar el periodo, el usuario calculará dichos años faltantes mediante algún método que apruebe la Comisión Nacional del Agua. La precipitación anual deberá determinarse a partir del análisis de los registros de las estaciones ubicadas dentro y vecinas a la cuenca, mediante el método de Polígonos de Thiessen o Isoyetas.

B) Cuando en la cuenca en estudio no se cuenta con información pluviométrica o ésta sea escasa, la precipitación anual se podrá obtener con apoyo de los planos de Isoyetas Normales Anuales editados por la Comisión.

A.1.2.1.2 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se determina a partir de los siguientes procedimientos:

A) Transferencia de información hidrométrica y climatológica de cuencas vecinas, hidrológicamente homogéneas.

- En la cuenca vecina se determinan los coeficientes anuales de escurrimiento (C_e), mediante la relación del volumen de escurrimiento anual (V_e), entre el volumen de precipitación anual (V_p) correspondiente.

$$C_e = V_e / V_p$$

- Con los valores del volumen de precipitación anual y el coeficiente de escurrimiento anual obtenidos en la cuenca vecina, se establece una correlación gráfica o su ecuación matemática.

- Con apoyo de la ecuación matemática o en la gráfica; y al utilizar los valores del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio, se estiman los correspondientes coeficientes anuales de escurrimiento.

B) En función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual, de la cuenca en estudio.

- A falta de información específica, con apoyo en los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 1 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K (véase Plan Nacional de Obras de Riego para el Desarrollo Rural "Pequeños Almacenamientos". Secretaría de Recursos Hidráulicos, adaptación del Libro: Small Dams).

TABLA 1 VALORES DE K, EN FUNCIÓN DEL TIPO Y USO DE SUELO

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hileras	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,14	0,20	0,28
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo	0,24	0,28	0,30
Más del 75% - Poco -	0,07	0,16	0,24
Del 50 al 75% - Regular -	0,12	0,22	0,26
Menos del 50% - Excesivo -	0,17	0,26	0,28
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,26	0,29	0,32
Cubierto del 50 al 75%	0,27	0,30	0,33
Cubierto del 25 al 50%	0,18	0,24	0,
Cubierto menos del 25%			
Zonas urbanas			
Caminos			
Pradera permanente			

- Si en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.
- Una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes:

K: PARÁMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (Ce)
Si K resulta menor o igual que 0,15	$Ce = K (P-250) / 2000$
Si K es mayor que 0,15	$Ce = K (P-250) / 2000 + (K-0,15) / 1.5$

P= Precipitación anual, en mm.

Rango de validez. - Las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2150 mm.

La evapotranspiración está incluida en el coeficiente de escurrimiento.

C) En aquellos casos en que se cuente con estudios hidrológicos y se conozcan los coeficientes de escurrimiento, éstos se podrán usar para el cálculo del escurrimiento.

Información requerida:

- Procedimiento de cálculo y metodología utilizados para determinar la precipitación media anual en la cuenca.
- Procedimiento de estimación y consideraciones para determinar el coeficiente de escurrimiento.
- Relación de las estaciones climatológicas utilizadas para determinar los escurrimientos, indicando sus coordenadas geográficas, así como las entidades federativas a las que pertenecen, poblaciones próximas importantes y cualquier otra información de utilidad que permita hacer más claro el cálculo del volumen anual de escurrimiento natural.

En el caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información hidrométrica ni pluviométrica o ambas sean escasas, el volumen medio anual de escurrimiento natural se determina indirectamente transfiriendo la información de otras cuencas vecinas de la región, mismas que se consideran

homogéneas y que cuentan con suficiente información hidrométrica o pluviométrica.

Además de la información requerida en los puntos A.1.1.1 y A.1.2.1 es necesaria, la siguiente:

- Descripción del método aplicado, así como la justificación de su empleo en esa cuenca, subcuenca o punto específico.

- Relación de las variables significativas de la cuenca, empleadas en el cálculo del coeficiente de escurrimiento.
- Resultados de las pruebas de homogeneidad hidrológica, climatológica y fisiográfica de las cuencas vecinas y/o registros empleados en la transferencia de información.

Anexo B

Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes (hemisferio norte). Fuente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006).

Tabla 17. Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes (hemisferio norte). Fuente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006).

Hemisferio Norte												Lat. grad.
Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
0,0	6,6	11,0	15,6	21,3	24,0	24,0	17,6	12,8	8,3	2,3	0,0	70
1,1	7,3	11,1	15,3	19,7	24,0	22,3	17,0	12,7	8,7	4,1	0,0	68
3,9	7,8	11,2	14,9	18,7	22,0	20,3	16,4	12,7	9,0	5,2	1,9	66
5,0	8,2	11,2	14,7	17,9	20,3	19,2	16,0	12,6	9,3	6,0	3,7	64
5,7	8,5	11,3	14,4	17,3	19,2	18,4	15,7	12,6	9,5	6,6	4,8	62
6,4	8,8	11,4	14,2	16,8	18,4	17,7	15,3	12,5	9,7	7,1	5,6	60
6,9	9,1	11,4	14,1	16,4	17,8	17,2	15,1	12,5	9,9	7,5	6,2	58
7,3	9,3	11,5	13,9	16,0	17,3	16,8	14,8	12,4	10,1	7,9	6,7	56
7,7	9,5	11,5	13,8	15,7	16,8	16,4	14,6	12,4	10,2	8,2	7,1	54
8,0	9,7	11,5	13,6	15,4	16,5	16,0	14,4	12,4	10,3	8,5	7,5	52
8,3	9,8	11,6	13,5	15,2	16,1	15,7	14,3	12,3	10,4	8,7	7,9	50
8,6	10,0	11,6	13,4	15,0	15,8	15,5	14,1	12,3	10,6	9,0	8,2	48
8,8	10,1	11,6	13,3	14,8	15,5	15,2	14,0	12,3	10,7	9,2	8,5	46
9,1	10,3	11,6	13,2	14,6	15,3	15,0	13,8	12,3	10,7	9,4	8,7	44
9,3	10,4	11,7	13,2	14,4	15,0	14,8	13,7	12,3	10,8	9,6	9,0	42
9,5	10,5	11,7	13,1	14,2	14,8	14,6	13,6	12,2	10,9	9,7	9,2	40
9,6	10,6	11,7	13,0	14,1	14,6	14,4	13,5	12,2	11,0	9,9	9,4	38
9,8	10,7	11,7	12,9	13,9	14,4	14,2	13,4	12,2	11,1	10,1	9,6	36
10,0	10,8	11,8	12,9	13,8	14,3	14,1	13,3	12,2	11,1	10,2	9,7	34
10,1	10,9	11,8	12,8	13,6	14,1	13,9	13,2	12,2	11,2	10,3	9,9	32
10,3	11,0	11,8	12,7	13,5	13,9	13,8	13,1	12,2	11,3	10,5	10,1	30
10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	28
10,5	11,1	11,8	12,6	13,3	13,6	13,5	12,9	12,1	11,4	10,7	10,4	26
10,7	11,2	11,8	12,6	13,2	13,5	13,3	12,8	12,1	11,4	10,8	10,5	24
10,8	11,3	11,9	12,5	13,1	13,3	13,2	12,8	12,1	11,5	10,9	10,7	22
10,9	11,3	11,9	12,5	12,9	13,2	13,1	12,7	12,1	11,5	11,0	10,8	20
11,0	11,4	11,9	12,4	12,8	13,1	13,0	12,6	12,1	11,6	11,1	10,9	18
11,1	11,5	11,9	12,4	12,7	12,9	12,9	12,5	12,1	11,6	11,2	11,1	16
11,3	11,6	11,9	12,3	12,6	12,8	12,8	12,5	12,1	11,7	11,3	11,2	14
11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	12
11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	10
11,6	11,7	11,9	12,2	12,4	12,5	12,4	12,3	12,0	11,8	11,6	11,5	8
11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	6
11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	4
11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	2
12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	0

Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes (hemisferio sur). Fuente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006).

Tabla 18. Insolación máxima diaria (N) para diferentes latitudes para el día 15vo del mes (hemisferio sur). Fuente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006).

Lat. grad.	Hemisferio Sur											
	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
70	24,0	17,4	13,0	8,4	2,7	0,0	0,0	6,4	11,2	15,7	21,7	24,0
68	21,9	16,7	12,9	8,7	4,3	0,0	1,7	7,0	11,3	15,3	19,9	24,0
66	20,1	16,2	12,8	9,1	5,3	2,0	3,7	7,6	11,3	15,0	18,8	22,1
64	19,0	15,8	12,8	9,3	6,1	3,7	4,8	8,0	11,4	14,7	18,0	20,3
62	18,3	15,5	12,7	9,6	6,7	4,8	5,6	8,3	11,4	14,5	17,4	19,2
60	17,6	15,2	12,6	9,8	7,2	5,6	6,3	8,7	11,5	14,3	16,9	18,4
58	17,1	14,9	12,6	9,9	7,6	6,2	6,8	8,9	11,5	14,1	16,5	17,8
56	16,7	14,7	12,5	10,1	8,0	6,7	7,2	9,2	11,6	13,9	16,1	17,3
54	16,3	14,5	12,5	10,2	8,3	7,2	7,6	9,4	11,6	13,8	15,8	16,9
52	16,0	14,3	12,5	10,4	8,6	7,5	8,0	9,6	11,6	13,7	15,5	16,5
50	15,7	14,2	12,4	10,5	8,8	7,9	8,3	9,7	11,7	13,6	15,3	16,1
48	15,4	14,0	12,4	10,6	9,0	8,2	8,5	9,9	11,7	13,4	15,0	15,8
46	15,2	13,9	12,4	10,7	9,2	8,5	8,8	10,0	11,7	13,3	14,8	15,5
44	14,9	13,7	12,4	10,8	9,4	8,7	9,0	10,2	11,7	13,3	14,6	15,3
42	14,7	13,6	12,3	10,8	9,6	9,0	9,2	10,3	11,7	13,2	14,4	15,0
40	14,5	13,5	12,3	10,9	9,8	9,2	9,4	10,4	11,8	13,1	14,3	14,8
38	14,4	13,4	12,3	11,0	9,9	9,4	9,6	10,5	11,8	13,0	14,1	14,6
36	14,2	13,3	12,3	11,1	10,1	9,6	9,8	10,6	11,8	12,9	13,9	14,4
34	14,0	13,2	12,2	11,1	10,2	9,7	9,9	10,7	11,8	12,9	13,8	14,3
32	13,9	13,1	12,2	11,2	10,4	9,9	10,1	10,8	11,8	12,8	13,7	14,1
30	13,7	13,0	12,2	11,3	10,5	10,1	10,2	10,9	11,8	12,7	13,5	13,9
28	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8
26	13,5	12,9	12,2	11,4	10,7	10,4	10,5	11,1	11,9	12,6	13,3	13,6
24	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
22	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3
20	13,1	12,7	12,1	11,5	11,1	10,8	10,9	11,3	11,9	12,5	13,0	13,2
18	13,0	12,6	12,1	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	11,9	12,4	12,9	13,1
16	12,9	12,5	12,1	11,6	11,3	11,1	11,1	11,5	11,9	12,4	12,8	12,9
14	12,7	12,4	12,1	11,7	11,4	11,2	11,2	11,5	11,9	12,3	12,7	12,8
12	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7
10	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6
8	12,4	12,3	12,1	11,8	11,6	11,5	11,6	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5
6	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3
4	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2
2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1
0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

Anexo C

Método para determinar la pendiente del terreno propuesto por (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2016)

Para calcular la pendiente del terreno con una precisión media a alta, se mide la diferencia de nivel del suelo (en metros) entre dos puntos a lo largo de la línea más empinada de la pendiente (llamada eje de la pendiente), utilizando únicamente un nivel de albañil y una regla graduada. Este método será recomendable para pendientes con distancias entre 2.5m y 3 m, en caso de necesitar calcular una pendiente más larga será conveniente la ayuda de dos personas más.

Proceder de la siguiente manera para calcular la pendiente:

- 1) A lo largo del eje de la pendiente, se mide la diferencia de nivel AC entre dos puntos A y B marcados en el suelo, como se muestra en la figura

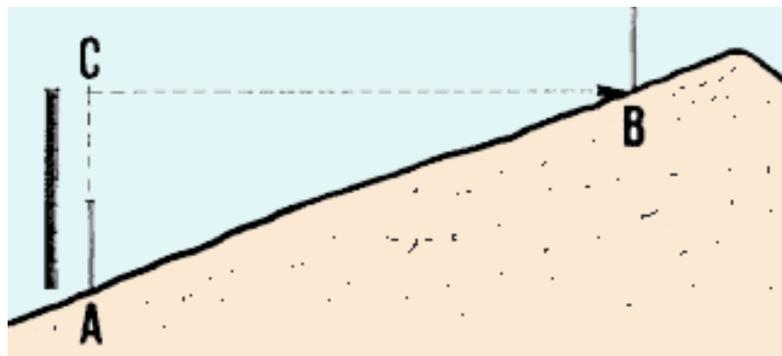


Figura 22. Diferencia de nivel AC

- 2) Se mide la distancia horizontal CB entre los puntos A y B, como se muestra en la figura

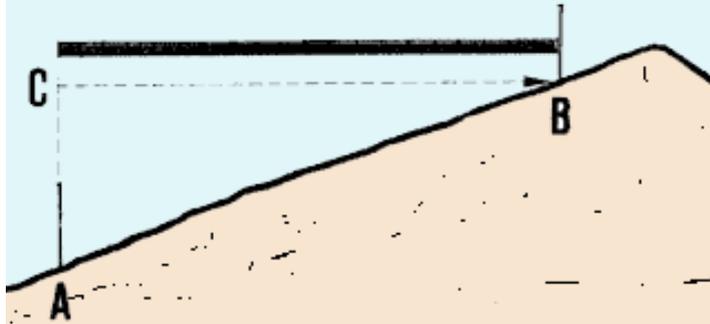


Figura 23. Distancia horizontal CB

- 3) Se calcula la pendiente S en porcentaje, mediante la fórmula:

$$S\% = 100 * (AC / CB)$$

Ecuación 10. Cálculo de Porcentaje

Donde:

S%: Valor de la Pendiente en porcentaje

AC: Diferencia de nivel entre dos puntos A y B

CB: Distancia horizontal entre dos puntos A y B

Recuerde: Siempre se debe medir la distancia horizontal.